

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 3 (45) Т.2 2019



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



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 (45) Т.2 2019 www.morintex.ru

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

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

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

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

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

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

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

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

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

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 (45) V.2 2019 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

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

G.N. Muru, PhD, Executive Director, 51 CCIS

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"

V.Yu. Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

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

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

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index <http://vak.ed.gov.ru>

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

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

190121, Russian Federation

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



24 августа 2019 года АО «51 Центральный конструкторско-технологический институт судоремонта» исполняется 65 лет.

От лица редакции поздравляем Вас с Юбилеем! Примите наши искренние поздравления и пожелания в дальнейшем процветании. Желаем Вам дальнейшего развития, выгодных контрактов, новых проектов и интересных задач, устойчивого финансового положения, интересных плодотворных идей и возможностей для их воплощения.

Пусть удача, успех и признание всегда будут Вашими постоянными спутниками.

С Юбилеем!

Редакция журнала
«Морские интеллектуальные технологии»





51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

Разработка технической документации для обеспечения модернизации, ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ.

Разработка документов по стандартизации (ГОСТ РВ, ОСТВ и др.).

Сбор и хранение копий технических условий на продукцию, разработанную по заказам Минобороны России и поставка их исполнителям ГОЗ.





ТРУДЫ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СОДЕРЖАНИЕ	стр
О журнале.....	
К 70-летию Александра Исааковича Фрумена	12
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Бесядовский А.Р., Зуев О.А., Раилкин А.И. Прибор для измерения адгезии обрастателей.....	13
Алешин И.В., Гончаров В.К., Зуева Е.К., Гетман В.Э. Борьба с аварийными разливами нефти в замерзающих морях России.....	18
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Яковлев А.Ю. Метод расчета гидродинамических характеристик осевых рабочих колес.....	25
Семенова В.Ю., Баканов К.И., Голуб В.А. Определение возмущающих сил и сил волнового дрейфа , возникающих при поперечной качке накрененного судна.....	31
Али Рами, Тряскин Н.В. Влияние параметров турбулентности на характеристики переходного режима течения при обтекании профиля NACA 0012.....	39
Крыжевич Г.Б. Эффективность мер по снижению нагрузок на шельфовые сооружения ото льда умеренной толщины.....	45
Крыжевич Г.Б. Экспериментальное обоснование способов снижения ледовых воздействий на шельфовые сооружения и методов расчета нагрузок.....	52
Ионов Б.П., Мухина М.Л., Сандаков М.Ю., Скобелева И.Ю. Исследование мореходных качеств плавающей гусеничной машины средствами компьютерной графики.....	60
Борисов Р.В., Лузянин А.А. О разработке проекта требований правил РС с учетом корректировки кодекса IMO по остойчивости в части ограничений продольной качки.....	65
Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Исследование динамической прочности роторной системы перспективных вспомогательных судовых энергетических установок.....	70
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Букшев А.В., Сунь Тяньши Определение количества балласта на начальных этапах проектирования танкера.....	77
Гайкович А.И., Никитин Н.В., Вай Ян Вин Хтве Подход к оценке безопасности судна по остойчивости на начальных стадиях проектирования.....	81
Тряскин В.Н., Юй Синьянь Методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций.....	87
Плотников К.В., Тряскин В.Н. Постановка и решение задачи проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части крупнотоннажных нефтеналивных судов с использованием аппарата аппроксимации метода планирования эксперимента.....	93
Медведев В.В., Зуев В.В. Анализ возможности выполнения перспективных требований к конструктивному коэффициенту энергетической эффективности за счет выбора материала корпуса судна.....	101
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Пласкеева Е.И., Трусев В.И. Защита от коррозии труднодоступных конструкций отсеков судов.....	107
Мурзин В.В., Киав М.С., Карпов В.М. Исследование влияния режима подводной сварки на газообразование.....	111
Абрамов А.В., Фирсова А.В., Хмара Д.С. Экспертно-аналитическое сопровождение процесса определения трудоемкости и установления цен в судостроении.....	116
Бронникова Г.А., Бронникова Л.В. Методика социально – экономической оценки производственного травматизма судостроительного производства.....	122

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Максимова М.А. Компенсация неактивной мощности в судовых электроэнергетических системах.....	127
Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Воршевский П.А., Москалев А.Н. Методы улучшения качества электрической энергии в СЭЭС.....	135
Нифонтов Ю.А., Герасимов А.М., Бурцев И.Н., Карпунина В.А. К вопросу о переработке низкосортных углей и получении беззольного угольного топлива для прямого ввода в газовую турбину.....	142

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Шарфарец Б.П., Легуша Ф.Ф. О диссипации энергии за счёт выделения джоулева тепла в электроосмотическом процессе при работе электроакустического преобразователя.....	151
---	-----

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Николаев И.А., Фрумен А.И. Обеспечение развития искусственного интеллекта.....	157
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Семенов Н.Н., Шилин М.М. Имитационная модель телеуправления подводными аппаратами.....	163
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Волостных В.В., Иванкович А.В. Чем вымощен путь к кризису?.....	171
Бокатов А.Ю., Ефремов С.В., Плехов Е.В. Оценка профессиональных рисков судовых сварщиков.....	179

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Нечаев Ю.И. Проблемы повышения активности обучения при построении курса лекций ГМТУ «Компьютерная математика – прикладные аспекты».....	184
Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Моделирование динамической непотопляемости – возникновение и развитие аварийной ситуации в штормовых условиях.....	192
Нечаев Ю.И., Турчак А.А. Эволюционная динамика судна активного ледового плавания в нестационарной среде под управлением нейронной сети глубокого обучения.....	200
Янчин И.А., Петров О.Н. Сравнительный анализ регрессионных моделей и искусственных нейронных сетей при решении задачи прогноза изменения глубин.....	206

CONTENTS	page
About journal	
For Aleksander I. Frumen 's 70-th anniversary	12
SHIP BUILDING	
Alexander R. Besyadovskiy, Oleg A. Zuev, Alexander I. Railkin The Device to measure adhesion of foulings.....	13
Igor V. Aleshin, Vadim K. Goncharov, Ekaterina S. Zueva, Valentina E. Getman Oil spill response in the Russian freezing seas.....	18
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Aleksey Yu. Yakovlev Calculation method of axial impeller hydrodynamic characteristics.....	25
Viktoriya Yu. Semenova, Kirill I. Bakanov, Vadim A. Golub The determination of the exciting forces and wave drift forces arising during lateral motions of the heeled ship.....	31
Ali Rami, Nikita V. Tryaskin Effects of turbulence variables on transition flow characteristics over NACA 0012 airfoil at moderate Reynold number.....	39
Gennady B. Kryzhevich Effective measures for decrease of loads on offshore structures caused by moderate thickness ice.....	45
Gennady B. Kryzhevich Experimental justification of methods for mitigation of ice actions on offshore structures and for ice loads calculation.....	52
Boris P. Ionov, Milena L. Mukhina, Mihail Yr. Sandakov, Irina Yr. Skobeleva Analytical research of a navigation qualities of a floating tracked machine.....	60
Rudolf V. Borisov, Alexander A. Luzyanin On the development of the project of requirements of the rules of register of shippingtaking into account the correction of the imo code for stability in part of limitations for pitching.....	65
Vladimir A. Korshunov, Dmitry A. Ponomarev, Alexander A. Rodionov Investigation of dynamic strength of a rotor system of perspective auxiliary shipboard power units.....	70
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Anatoliy V. Bukshev, Sun Tianshi Determining the amount of ballast on the initial stages of designing of tanker.....	77
Alexander I. Gaikovich, Nikolay V. Nikitin, Vay Jan Vin Khtve The approach to assessing the safety of the ship for stability at initial design stages.....	81
Vladimir N. Tryaskin, Yu Xinyan Methodology of hull girder cross-sectional characteristics estimation on the preliminary stage of large containerships structural design.....	87
Kirill V. Plotnikov, Vladimir N. Tryaskin Structural design of oil tankers transverse webs using design of experiments method.....	93
Valery V. Medvedev, Vladislav V. Zuev Analysis of the possibility of implementation of the perspective requirements to the constructive energy efficiency coefficient by choosing the material the ship's hull.....	101
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Ekaterina I. Plaskeeva, Valery I. Trusov Protection against corrosion of difficulty availadle designs of ship's compartments.....	107
Victor V. Murzin, Kyaw Min Soe, Vyacheslav M. Karpov Research of influence of modes of underwater welding on gas.....	111
Alexey V. Abramov, Anna V. Firsova, Dmitriy S. Khmara Expert and analytical maintenance of process of determination of labor input and establishment of the prices in shipbuilding.....	116
Galina A. Bronnikova, Liliya V. Bronnikova Method of social-economic assessment of work-related fatalities, injuries, and illnesses in shipbuilding industry.....	122

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Boris F. Dmitriev, Sergey Ya. Galushin, Andrey N. Kalmykov, Marina A. Maksimova Compensation of inactive power in ship's electric power systems.....	127
Boris F. Dmitriev, Sergey Ya. Galushin, Andrey N. Kalmykov, Petr A. Vorshevsky, Andrey N. Moskaev The improving quality methods of the electric energy in ship electric power systems	135
Yuri A. Nifontov, Andrei M. Gerasimov, Igor N. Burtsev, Victoria P. Karpunina The issue of processing low-grade coals and getting ash-free coal as a fuel for direct input into the gas turbine.....	142

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Boris P. Sharfarets, Fedor F. Legusha On energy dissipation due to the release of joule heat in an electroosmotic process during the operation of an electroacoustic converter.....	151
--	-----

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

Ivan A. Nikolaev, Aleksander I. Frumen To ensure the development of artificial intelligence.....	157
---	-----

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Nikolay N. Semenov, Mikhail M. Shilin Simulation model of remote control of underwater vehicles.....	163
---	-----

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Vadim V. Volostnykh, Anna V. Ivankovich By what the way to defeat is paved?.....	171
Anton Y. Bokатов, Sergey V. Efremov, Evgeny V. Plekhov Assessment of professional risks ship welders.....	179

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Yuri I. Nechaev Problems of increasing the activity of training when creating a course of lectures «Computer mathematics - applied aspects» in SMTU.....	184
Yuri I. Nechaev, Oleg N. Petrov Modeling of dynamic unsinkability – occurrence and development of an emergency situation in storm conditions.....	192
Yuri I. Nechaev, Aleksandr A. Turchak The evolutionary dynamics of an ice classed vessel in a non-stationary environment under the control of a deep learning neural network.....	200
Ivan A. Yanchin, Oleg N. Petrov Comparative analysis of linear regression models and artificial neural networks for depth change prediction.....	206

О ЖУРНАЛЕ

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

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

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

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

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

The magazine subject corresponds to the following specialties 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

К 70-летию Александра Исааковича Фрумена

23 сентября 2019г. исполняется 70 лет заместителю главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» Александру Исааковичу Фрумену.

Александр Исаакович Фрумен, с отличием окончил в 1972 году Ленинградский кораблестроительный институт (ныне СПбГМТУ), где прошел путь от инженера до профессора.

В 1979 году он защитил кандидатскую диссертацию, результаты которой внедрены в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, на ЛМЗ и ряде КБ. В 1995г. получил звание доцента. Работал заведующим отраслевой НИЛ «Прочности и надежности судовых конструкций» (1978-1996), зам. декана по НР (1982-1991), заместителем



исполнительного директора Ассоциации «Океанотехника» (1991-2001) и по совместительству, ученым секретарем факультета (2001-2007) и университета (с 2007 по н/в). Являлся руководителем актуальных научных работ: «Технология-АТПМУ», «Прототип-Отгрузка» и «Глайдер-НДС».

В 2005 году был избран на должность профессора кафедры строительной механики корабля.

Области научной и практической деятельности: Расчеты корпусных конструкций глубоководной техники; Прочность и вибрация корабельных конструкций; Статические и динамические задачи механики; Надежность и безопасность конструкций и инженерных сооружений; Вычислительная механика. Имеет более 100 печатных научных трудов (включая 17 авторских свидетельств и патентов, монографию и учебник, учебные пособия). Являясь руководителем и ответственным исполнителем НИР оборонной и важной народнохозяйственной тематики, выпустил более 60 итоговых научных отчетов. Их результаты используются на «Севмашпредприятии», в «Крыловском ГНЦ» и ЦНИИ ТС, в ЦКБ МТ «Рубин» и СПМБМ «Малахит», НПО «Дальняя связь», ЦКБ «Алмаз», ЦКБ «Айсберг» и ЦКБ «ЦКБ Лазурит», в «Северном ПКБ», на заводах «Адмиралтейские верфи» и «Балтийский завод», на ЛМЗ и ряде других предприятий. Научно-преподавательскую деятельность осуществлял также в КнаАПУ, Польше, Китае, Вьетнаме, Германии, Норвегии. Участник и организатор целого ряда международных конференций-выставок по морской тематике и математическому моделированию.

В 2004 году он принят в действительные члены Международного института морских инженеров, ученых и технологов (IMarEST, UK) и получил сертификат Чартерного инженера (SEng, UK). Член бюро секции «Строительная механика» при Доме Ученых РАН, заместитель главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии». С 2019 года избран в член-корреспонденты Международной Академии Холода (МАХ).

**Редколлегия журнала поздравляет А.И. Фрумена с Юбилеем
и желает дальнейших творческих успехов!**

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 532.583.4, 57.043

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АДГЕЗИИ ОБРАСТАТЕЛЕЙ**Александр Романович Бесядовский**

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

Олег Алексеевич Зуев

инженер

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: ozuev@mail.ru

Александр Иванович Раилкин

доктор биологических наук

генеральный директор ООО «БиоМорЗащита»
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9
e-mail: railkin@yandex.ru

Аннотация

В работе предлагается описание прибора для измерения адгезии – силы сцепления объекта с подстилающей поверхностью. В процессе эксплуатации корпус судна обрастает различными организмами. Это увеличивает сопротивление движению, снижает скорость судна и повышает расход топлива. При разработке методов борьбы с обрастанием важным фактором является сила, с которой обрастатели удерживаются на корпусе судна. Для определения этой величины был разработан прибор - адгезиометр. Он позволяет экспериментальным путем измерить силу адгезии различных объектов.

Прибор оформлен в виде измерительного комплекса на базе микропроцессора. Он может быть использован в лабораторных, полевых, а также в эксплуатационных условиях. Конструкция прибора позволяет в широком диапазоне варьировать измеряемую силу адгезии. Это важно из-за большого разнообразия организмов, участвующих в обрастании.

Для работы с прибором создан ряд программных комплексов, позволяющих спроектировать датчик с необходимыми параметрами, а также отобразить процесс измерений на персональном компьютере в виде удобных для анализа графиков.

Использование прибора, позволит облегчить поиск решения проблем, связанных с обрастанием судна.

Ключевые слова: морское обрастание, адгезия, гидродинамика судна, сопротивление воды, измерение сил, измерительная система, динамометры, шероховатость.

DEVICE FOR MEASURING BIOFOULING ADHESION STRENGTH**Alexander R. Besyadovsky**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Hydromechanics and Marine Acoustics

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

Oleg A. Zuev

engineer

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

Alexander I. Railkin

Grand PhD in Biological sciences

General Director of "BioMorZashchita" LLC
199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab., 7-9
e-mail: railkin@yandex.ru

Abstract

This paper proposes a description of the device for measuring adhesion - the force of adhesion of an object with the underlying surface. During operation, the hull of the vessel is fouled with various organisms. This increases the resistance to motion, reduces the speed of a vessel and increases fuel consumption. When developing anti-fouling methods, an important factor is the force with which the biofouling agents are held on the hull. To determine this value, an adhesion metering device was developed. It allows experimentally measuring the adhesion force of various objects.

The device is designed as a microprocessor-based measuring complex. It can be used in laboratory, field, and also in operational conditions. The design of the device allows varying the measured adhesion force in a wide range. This is important because of the wide variety of organisms involved in fouling.

To work with the device, a number of software systems have been created, allowing designing the sensor with the necessary parameters, as well as displaying the measurement process on a personal computer in the form of graphs that are convenient for analysis.

The use of the device will make it easier to find a solution to the problems associated with vessel fouling.

Key words: marine fouling, adhesion, vessel hydrodynamics, water resistance, force measurement, measuring system, dynamometers, roughness.

Введение

При эксплуатации судов серьезной проблемой является их обрастание различными организмами (водорослями, губками, гидроидами, полихетами, усоногими раками, моллюсками, мшанками, иглокожими и др.), которые прочно удерживаются на подводной части корпусов судов даже в условиях высокой скорости их движения. Обрастание увеличивает сопротивление движению, снижает скорость судна и повышает расход топлива. Применяемые в настоящее время противообрастающие покрытия лишь частично решают эту проблему. И не освобождают судовладельцев от необходимости время от времени ставить суда в сухой док для очистки корпуса (рис. 1).

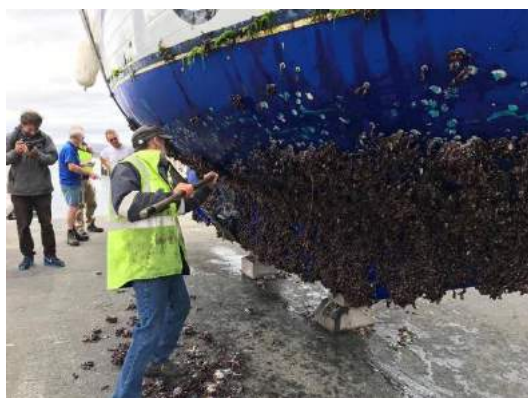


Рис. 1. Очистка судна от обрастания

Обрастание тесно связано с гидродинамическими характеристиками обтекания судна: полями скоростей и давлений [1, 2, 3]. Поскольку величина скорости потока около корпуса судна меняется в широких пределах, то меняется и спектр биологических объектов, оседающих на корпусе. Одни предпочитают зоны, где скорость больше, другие – участки с меньшей скоростью течения [1, 4]. Это объясняется многими факторами, как физическими, так и биологическими. С точки зрения гидромеханики обрастатели, осевшие на поверхность твердого тела, – аналоги бугорков шероховатости на поверхности корпуса судна [5]. Поэтому при движении судна на них действуют силы, создаваемые набегающим потоком.

Полная гидродинамическая сила, действующая на обрастателей, имеет все три компоненты. Основными среди них являются продольная и поперечная проекции силы. Одна стремится сдвинуть обрастателя вдоль поверхности, а вторая

– оторвать его. Поэтому способность того или иного вида обрастателей удерживаться на подводной части корпуса судна зависит от силы адгезии, которой он обладает.

Размеры обрастателей колеблются в очень широких пределах [1, 6] от долей миллиметра (бактерии, диатомовые водоросли, простейшие) до сантиметров и десятков сантиметров (губки, полихеты, морские утки, моллюски мидии, морские звезды и др.). Естественно, что сила адгезии также изменяется в широких пределах.

Для специалистов, занимающихся борьбой с обрастанием, важно знать величину этой силы. Известны различные способы измерения силы адгезии обрастателей [7].

1. Прибор для измерения силы адгезии

Сотрудниками кафедры гидроаэромеханики и морской акустики (ГАММА) С.-Петербургского государственного морского технического университета и С.-Петербургского государственного университета был разработан адгезиометр – прибор, позволяющий измерять силу адгезии и оценивать ее значение в цифровом эквиваленте (рис. 2).

Идея прибора состоит в том, что к обрастателю прикладывается усилие, величина которого может быть измерена. Направление приложенной силы может быть выбрано любым, по усмотрению экспериментатора. Сила, направленная на отрыв обрастателя, меняет свою величину вплоть до отрыва обрастателя от поверхности. Прибор фиксирует значение силы и позволяет сохранить эту информацию. Максимальная величина силы, измеренная прибором, может быть принята за величину адгезии данного обрастателя.



Рис. 2. Общий вид адгезиометра

Датчик силы состоит из трех балок. Одна из них измерительная и две – компенсирующие. Конструкция обеспечивает измерение только одной компоненты вектора силы. На измерительной балке наклеены тензодатчики, преобразующие ее деформацию в электрический сигнал. Датчики соединены в четырехплечий мост Уитстона. Такая схема позволяет с одной стороны увеличить чувствительность прибора, а с другой компенсирует влияние температуры на показания датчиков. Это важно, поскольку прибор может использоваться в широком диапазоне температур.

Электронный блок (рис. 3) базируется на микропроцессоре C8051F060. Этот прибор включает АЦП, преобразующее аналоговый сигнал динамометра в цифровой код. Программа, записанная в память микропроцессора, преобразует полученный сигнал в значение силы в системе СИ. Для этого используется величина тарировочного коэффициента, который определяется для каждого динамометра и хранится в памяти устройства.



Рис. 3. Электронный блок адгезиометра

В микропроцессоре сигнал проходит предварительную обработку по заданной программе. При этом он может усиливаться с программно устанавливаемым коэффициентом усиления от 1 до 128 и осредняться по требуемому количеству измерений (от 2 до 256). Микропроцессор имеет настраиваемые фильтры, позволяющие обеспечить дополнительную защиту от внешних помех.

Текущее измеренное значение сохраняется в энергонезависимой памяти. Измерения проводятся с частотой 100 кГц, которая может быть изменена программно.

2. Работа с прибором

Для обеспечения работы микропроцессора была написана программа на языке С, управляющая процессом измерений, обменом

информацией с компьютером и хранением файлов данных.

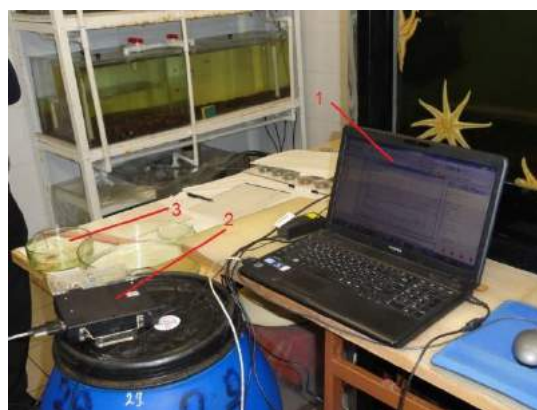


Рис. 4. Основные блоки системы адгезиометра (съемка в аквариальной лаборатории СПбГУ)
1 – управляющий компьютер, 2 – адгезиометр, 3 – изучаемый объект

После включения питания адгезиометр готов к работе (рис. 4). Когда изучаемый объект подсоединен к динамометру, нажимается кнопка «СТАРТ», запускающая процесс измерений. При этом загорается информирующий светодиод. Измерения проводятся непрерывно до нажатия кнопки «СТОП». При этом диод гаснет, а на табло отражается номер выполненного измерения. После нажатия кнопки «СТОП» файл данных сохраняется. Предусмотрены два вида хранения файлов. При лабораторных измерениях они сохраняются на жестком диске компьютера, к которому подключен адгезиометр. В случае полевых измерений, когда компьютер отсутствует, файлы данных сохраняются на карте памяти. При емкости карты 1 Гб на ней можно сохранить до 1000 файлов данных.

Во время лабораторных измерений результаты в реальном времени отображаются на экране компьютера в виде графика (рис. 5). При полевых измерениях, после их окончания, карта памяти переносится из адгезиометра на компьютер и результаты также представляются в графической форме.

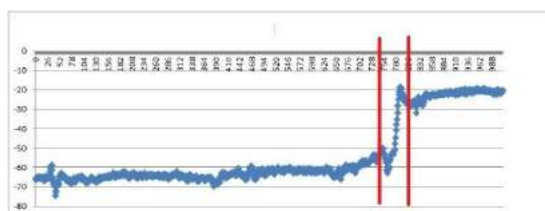


Рис. 5. Типичный график процесса измерений

Питание прибора в полевых условиях осуществляется от четырех элементов АА. Для обработки данных, их хранения, проведения тарировок и работы с адгезиометром нами была разработана программа для компьютера с дружественным интерфейсом (рис. 6).

Она позволяет выбрать порт для работы с микропроцессором, считывать файлы с карты памяти в адгезиометре, имеет кнопки «Измерение начать» и «Измерение закончить», дублирующие кнопки «Пуск» и «Стоп» прибора и позволяющие

управлять процессом измерений непосредственно с компьютера.

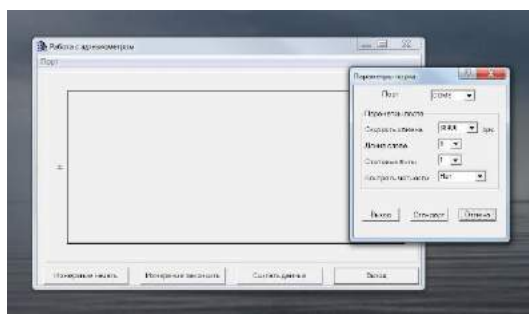


Рис. 6. Интерфейс программы

Поскольку сила адгезии разных обрастателей меняется в широких пределах, динамометр адгезиометра сделан съемным. Это позволяет при необходимости быстро заменить его на датчик другой чувствительности.

Для проектирования динамометра, обладающего нужными характеристиками, студентами кафедры ГАММА СПбГМУ А.Саттаровой и Ю.Буцан была написана программа расчета параметров такого прибора. Она позволяет для заданного диапазона измеряемых сил выбирать геометрические характеристики датчика (рис. 7).

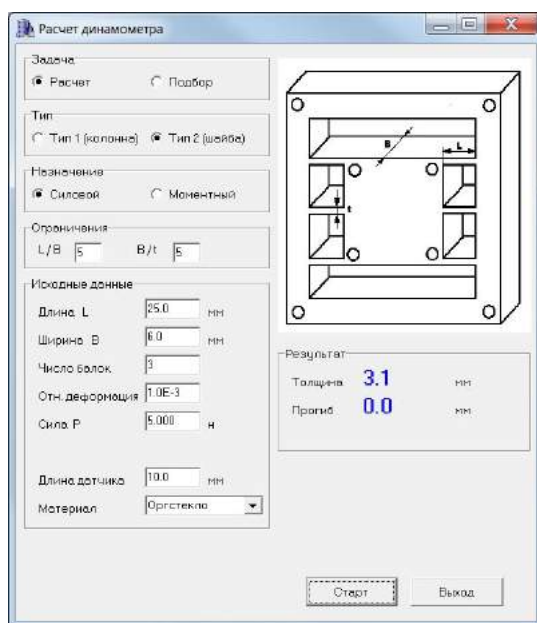


Рис. 7. Программа, позволяющая рассчитать параметры адгезиометра

Для калибровки системы и определения ее передаточных коэффициентов, используемых в программе обработки результатов, к динамометру прикрепляют грузы известной величины. При этом определяются коэффициенты преобразования, при которых полученные на компьютере результаты будут соответствовать приложенной силе. Эти коэффициенты вводятся в программу обработки и запоминаются там. В зависимости от конструкции измерительной системы, эти коэффициенты могут иметь постоянную величину

или меняться в разных точках диапазона измерений.

В процессе калибровки и измерений определяются статистические параметры – дисперсия, среднеквадратичное отклонение и другие. Это позволяет оценивать величину погрешности определения калибровочных коэффициентов и результатов измерений.

Основной проблемой при использовании данного устройства является соединение динамометра с обрастателем, адгезия которого измеряется. Из-за огромного разнообразия внешней морфологии и размеров биологических объектов, найти общее решение крайне затруднительно. Выбор варианта соединения динамометра с обрастателем осуществляется практическим путем.

При этом необходимо помнить, что крепление не должно наносить вред изучаемому животному, а также не искажать результаты измерения величины адгезии. На рис. 8 представлена морская звезда, которая подготовлена для проведения измерений.

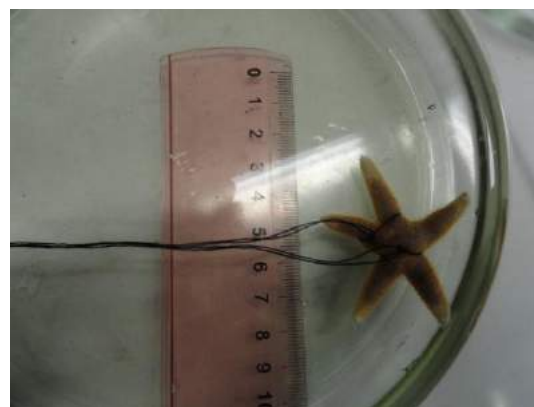


Рис. 8. Морская звезда в процессе измерения силы адгезии

График процесса измерения показан на следующем рисунке. На основе проведенных экспериментов была разработана следующая методика измерения силы адгезии.

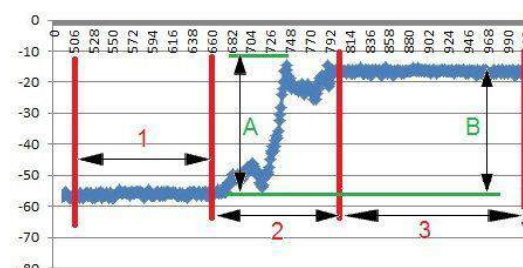


Рис. 9. Фазы измерения адгезии
1 – подготовка к измерению, 2 – процесс измерения, 3 – окончание измерения силы адгезии

Объект крепится к динамометру с помощью шлейки, не влияющей на его связь с подстилающей поверхностью, после чего экспериментатор перемещает прибор в выбранном направлении – обычно перпендикулярно стенке, увеличивая силу, отрывающую объект от поверхности.

На рис. 9 показан этап подготовки к измерениям (зона 1). Зона 2 – процесс измерений. Величина силы адгезии определяется отрезком А. Зона 3 – окончание измерения силы адгезии, прибор фиксирует вес объекта.

В момент отрыва (точка в районе 748 измерения) показания прибора максимальны. После этого обрастатель повисает на системе крепления. Прибор при этом показывает вес объекта.

Предварительные отладочные опыты показали, что величина максимальной адгезии близка к весу изучаемого объекта, но превосходит его на небольшую величину.

Более подробная информация для различных видов обрастателей может быть получена при

проведении большой серии опытов с использованием описанного прибора.

Выводы

Разработанный прибор – адгезиометр позволяет производить измерения адгезии как биологических объектов, так и любых других систем. В отличие от ранее разработанных способов измерения адгезии биологических объектов предлагаемый подход отличается тем, что в нем совмещены параметры объекта измерения, способ сопряжения объекта с датчиками, датчики для измерения адгезии, компьютер, который обеспечивает обработку текущей информации, поступающей от датчиков и фактически представляет оперативные данные об адгезии объекта измерения.

Литература

1. Раилкин А. И. *Колонизация твердых тел бентосными организмами*. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 427 с.
2. Раилкин А. И., Бесядовский А. Р. *Горизонтальное распределение обрастания и измерение его обилия*. Междунаро. науч.-практ. конф. «Перифитон и обрастание: теория и практика. СПб: Зоол. ин-т РАН, 2008. С. 22-24.
3. Раилкин А. И., Бесядовский А. Р., Амфилохийев В. Б., Бабков А. И. *Влияние течения на краевой эффект перифитонных диатомовых водорослей*. Вестник Ленингр. Ун-та. Сер. 3. 1988. Вып. 3 (№17). С. 28-36.
4. Мощенко А. В. *Роль микромасштабной турбулентности в распределении и изменчивости бентосных животных*. Владивосток: Дальнаука, 2006. 321 с.
5. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. *Гидромеханика*. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.
6. Раилкин А. И., Бесядовский А. Р., Колдунов А. В., Примаков И. М. *Взаимодействие прибрежных бентосных сообществ Белого моря с придонным слоем*. СПб: Изд-во СПб ун-та, 2012, 408 с.
7. Young G. A., Crisp D. J. *Marine animals and adhesion*. Adhesion. Vol. 6 (ed. Allen K. W.). London et al. Appl. Sci. Pubs. P. 19-39.

References

1. Railkin A. I. *Kolonizatsiya tverdykh tel bentosnymi organizmami*. SPb: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2008. 427 p.
2. Railkin A. I., Besyadovskiy A. R. *Gorizonta'l'noe raspredelenie obrastaniya i izmerenie ego obiliya*. Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. «Perifiton i obrastanie: teoriya i praktika. SPb: Zool. in-t RAN, 2008. p. 22-24.
3. Railkin A. I., Besyadovskiy A. R., Amfilokhiev V. B., Babkov A. I. *Vliyanie techeniya na kraevoy effekt perifitonnykh diatomovykh vodorosley*. Vestnik Leningr. Un-ta. Ser. 3. 1988. Vyp. 3 (№17). p. 28-36.
4. Moshchenko A. V. *Rol' mikromasshtabnoy turbulentnosti v raspredelenii i izmenchivosti bentosnykh zhivotnykh*. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 321 p.
5. Voytkunskiy Ya. I., Faddeev Yu. I., Fedyaevskiy K. K. *Gidromekhanika*. L.: Sudostroenie, 1982. 456 p.
6. Railkin A. I., Besyadovskiy A. R., Koldunov A. V., Primakov I. M. *Vzaimodeystvie pribrezhnykh bentosnykh soobshchestv Belogo morya s pridonnym sloem*. SPb: Izd-vo SPb un-ta, 2012, 408 p.
7. Young G. A., Crisp D. J. *Marine animals and adhesion*. Adhesion. Vol. 6 (ed. Allen K. W.). London et al. Appl. Sci. Pubs. P. 19-39.

УДК 629.12.001.2

БОРЬБА С АВАРИЙНЫМИ РАЗЛИВАМИ НЕФТИ В ЗЕМЕРЗАЮЩИХ МОРЯХ РОССИИ

Игорь Владимирович Алешин

доктор технических наук, профессор,
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: aleshin-igor@mail.ru

Вадим Константинович Гончаров

доктор технических наук, профессор,
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: vkgonch@mail.ru

Екатерина Сергеевна Зуева

аспирант Кафедры океанотехники и морских технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: zueva_ekaterina_smtu@mail.ru

Валентина Эдуардовна Гетман

студентка Кафедры океанотехники и морских технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: getmanvalya@mail.ru

Аннотация

В статье формулируется системная постановка проблемы борьбы с разливами нефти в ледовых условиях, и рассматриваются практические возможности решения задачи обнаружения нефтяного загрязнения при наличии ледового покрова акватории. Специфика обеспечения экологической безопасности на морских нефтегазовых комплексах в замерзающих морях России обусловлена экстремальными климатическими условиями в них. Процедура ликвидации аварийных разливов нефти в работе рассмотрена, как информационная система, состоящая из пяти подсистем (предотвращение разлива, его обнаружение, прогнозирование динамики разлива, ограничение его дальнейшего распространения и физическая ликвидация нефтяного загрязнения морской среды). Выполненный анализ показал, что использование традиционных оптических методов экологического мониторинга затрудняет низкая прозрачность снежного и ледового покрова, а также морской воды. Применение тепловидения и геолокации требует теоретических исследований и обоснования методов интерпретации, получаемых паттернов – изображений загрязненных нефтью и чистых снежных и ледовых покровов.

Ключевые слова: морские технологии, защита окружающей среды, нефтяное загрязнение, ледовые условия.

COMBATING ACCIDENTAL OIL SPILLS IN THE RUSSIAN FREEZING SEAS

Igor V. Aleshin

Dr.Sci.Tech, Professor
Professor, Department of Ocean Engineering and Marine Technology
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: aleshin-igor@mail.ru

Vadim K. Goncharov

Dr.Sci.Tech, Professor
Professor, Department of Ocean Engineering and Marine Technology
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: vkgonch@mail.ru

Ekaterina S. Zueva

Postgraduate Student, Department of Ocean Engineering and Marine Technology
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: zueva_ekaterina_smtu@mail.ru

Valentina E. Getman

Student, Department of Ocean Engineering and Marine Technology
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: getmanvalya@mail.ru

Abstract

The article formulates the system-based problem definition of combating oil spills in ice conditions, and discusses the practical possibilities of solving the problem for detecting oil pollution in the presence of ice-sheet in the water area. The specifics of ensuring environmental safety in offshore oil and gas complexes in the freezing seas of Russia are determined by the extreme climatic conditions in them. The procedure for liquidation of accidental oil spills was considered as an information system consisting of five subsystems (spill prevention, detection, prediction of the spill dynamics, localization of its further propagation, and physical elimination of oil pollution of the marine environment). The analysis showed that the use of traditional optical methods of environmental monitoring is difficult due to low transparency of snow and ice cover, as well as sea water. The use of thermal imaging and geolocation requires theoretical studies and substantiation of the methods for interpretation of obtained patterns - images of polluted with oil and clean snow and ice covers.

Key words: marine technologies, environmental protection, oil pollution, ice conditions.

Борьба с аварийными разливами нефти в замерзающих морях России

Ликвидация аварийных разливов нефти (ЛАРН) в замерзающих морях Мирового океана в настоящее время является одной из наиболее сложных экологических проблем современного морского недропользования, особенно актуальных для России, значительная часть перспективных запасов ископаемых углеводородов которой сосредоточена на континентальном шельфе арктических морей, наиболее уязвимых для негативного антропогенного воздействия / 1 /.

В соответствии с современными представлениями /2/ процедуру ЛАРН можно представить себе как информационную систему, состоящую из 5 информационных подсистем, каждая из которых представляет собой один из 5 последовательных этапов борьбы с аварийным нефтяным загрязнением морской среды, в т.ч.:

1. предупреждение этой чрезвычайной ситуации (ЧС);
2. обнаружение и картирование аварийного нефтяного разлива (АНР);
3. оценка масштабов нефтяного загрязнения морской среды и прогнозирование его динамики;
4. ограничение дальнейшего распространения АНР;
5. собственно физическая ликвидация нефтяного загрязнения морской среды

В данной работе мы более подробно рассмотрим второй и третий из этих этапов, поскольку именно оперативное выявление и оценка АНР, а также моделирование его динамики, обеспечивают разработку эффективной стратегии дальнейших действий по стабилизации экологической обстановки в месте ЧС.

Специфика обеспечения экологической безопасности на морских нефтегазовых комплексах в замерзающих морях России обусловлена экстремальными климатическими условиями в них /1/, в т.ч. наличием постоянного или сезонного снежно-ледового покрова на поверхности моря, что во многих случаях существенно ограничивает применение традиционных методов и средств ЛАРН, давно и широко используемых в умеренных и тропических широтах Мирового океана.

1. Анализ современных методов обнаружения разливов нефти в замерзающих морях**1.1 Постановка задачи**

В соответствии с / 3 / для оперативного обнаружения АНР в морской среде при отсутствии на её поверхности снежно-ледового покрова обычно применяются традиционные дистанционные и контактные методы обнаружения нефтяного загрязнения в морской среде, основанные на существовании контраста между физико-химическими свойствами нефти и нефтепродуктов и аналогичными параметрами окружающей среды. Согласно современным представлениям к таким методам относятся /4/:

- фототелевизионная регистрация обратного рассеяния морской поверхностью нисходящего от солнца и небосвода потока естественного светового излучения (**оптический или цветовой контраст**);
- активное зондирование поверхности морской среды электромагнитным излучением видимого или радиоволнового диапазона спектра (**лидарный и радиолокационный контраст**);
- регистрация флуоресценции (послесвечения) морской среды при возбуждении её коротковолновым излучением в УФ диапазоне спектра (**флуоресцентный контраст**);
- регистрация собственного теплового излучения морской поверхности в инфракрасном диапазоне спектра (**тепловой контраст**).

Главной задачей данного раздела является изучение возможностей обнаружения АНР в замерзающих морях. Выбор конкретного способа решения этой актуальной задачи существенно зависит от состояния морской среды и атмосферы в момент наблюдения. При наличии снежно-ледового покрова на поверхности моря нефть может находиться, растекаться и переноситься как на самом таком покрове, в его толще и под ним, так и на чистой ото льда морской поверхности и в разводах между льдинами.

Таким образом, объектами контроля АНР могут оказаться границы раздела:

- атмосферы с разлившейся нефтью, снегом, льдом, морской водой на поверхности моря (т.е. при наблюдении «сверху»);
- нижней поверхности льда с морской водой и разлившейся нефтью как при наблюдении из толщи моря с подводных носителей аппаратуры (т.е. при наблюдении «снизу»), а так же и из атмосферы сквозь ледовый покров, т.е. «через».

Проще всего обстоит дело, когда разлившаяся нефть находится в прямом контакте с атмосферой на открытой поверхности моря, в разводьях или на поверхности льда или снега. В этом случае можно использовать традиционные методы обнаружения нефтяного загрязнения.

Гораздо сложнее обстоит дело, если объектом наблюдения является нефтяное загрязнение морской среды под снежно-ледовым покровом в толще морской среды. В этом случае, с нашей точки зрения можно использовать и регистрацию АНР:

- при наблюдении через снежно-ледовый покров «сверху»,
- при лидарном зондировании нижней поверхности льда из толщи морской среды, т.е. «снизу»,
- при георадарном зондировании сквозь снежно-ледовый покров, т.е. «через»;
- при тепловизионном зондировании области поверхности снежно-ледового покрова над подледным нефтяным разливом, т.е. «сверху»

1.2 Фототелевизионная регистрация «сверху» подлёдного разлива нефти через снежно-ледовый покров

Начнём рассмотрение с оценки эффективности простейших методов регистрации нефтяного загрязнения при облучении поверхности моря естественным световым потоком от небосвода и солнца с большой высоты (т.е. «сверху») при помощи стандартной фототелевизионной системы (ФТС) /4/.

Распространение света в атмосфере, морской воде, снеге и морском льду сопровождается процессами поглощения и многократного рассеяния фотонов. Зависимости коэффициентов пропускания направленного света T (т.е. отношения интенсивностей прошедшего и падающего света) от толщины слоя снега a на льду приведена на рис.1.

Из анализа этого рисунка следует, что даже при толщине слоя снега на льду всего в несколько десятков сантиметров зондирующий его световой поток $E(z)$ ослабляется во много раз, что практически исключает возможность наблюдения подлёдного АР с помощью стандартной ФТС.

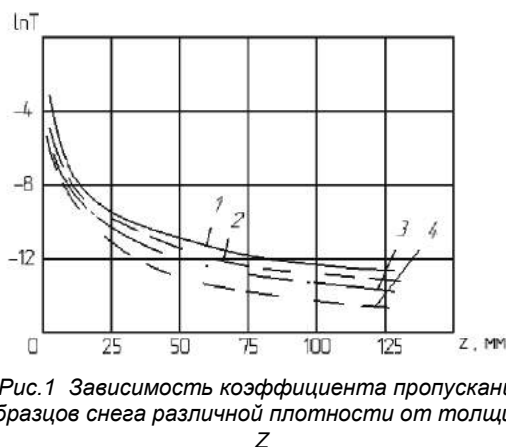


Рис.1 Зависимость коэффициента пропускания образцов снега различной плотности от толщины Z

1- $\rho = 224 \text{ кг/см}^3$, 2 - $\rho = 292 \text{ кг/см}^3$, 3- $\rho = 153 \text{ кг/см}^3$, $\rho = 122 \text{ кг/см}^3$ /5/

Поэтому упростим ситуацию и проанализируем применение рассматриваемого метода для чистого прозрачного льда при отсутствии на нём снежного покрова.

В качестве количественного критерия видимости подлёдного разлива выберем оптический контраст C /6/:

$$C = \frac{L_1 - L_2}{L_2} \quad (1)$$

где L_1 и L_2 - яркости изображения места ЧС на фотокатоде дистанционной ФТС, соответственно, при наличии и отсутствии нефтяного загрязнения подо льдом. Тогда как было ранее показано в нашей работе /7/:

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{\rho_{ice} \exp(2k_{ice}z)}{0,533\rho_w}} \quad \text{и} \quad C_0 = \frac{\rho_{oil} - \rho_w}{\rho_w} \quad (2)$$

где: k_{ice} показатель ослабления света в ледовом покрове; ρ_{ice} , ρ_{oil} , ρ_w - яркости льда, нефти и воды соответственно.

Входящие в эти формулы параметры изображения различаются для разных видов льда, в т.ч. для реального морского льда k_{ice} достигает $1,2 \text{ м}^{-1}$, а яркости (совпадающие в данном случае с альбедо) для молодого льда 0,07, для старого льда 0,12, а для воды 0,02 / 7 /.

На рис.2 приведены расчётные зависимости контраста C от толщины ледового покрова без снега (для максимальной чувствительности ФТС при $C=0,02$) для старого и молодого льда.

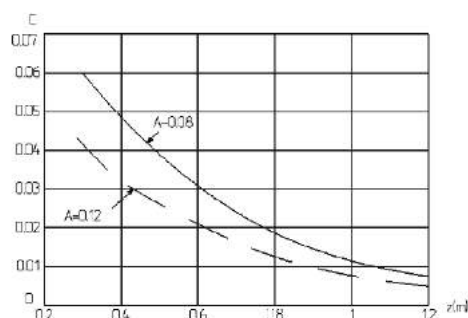


Рис.2 Зависимость контраста подлёдного разлива нефти от толщины слоя реального арктического льда /7/

Таким образом, обнаружение аварийного подлёдного разлива нефти с помощью стандартной ФТС возможно при толщине бесснежного ледового покрова от 0,8 до 2 м. А при наличии на льду снега такая методика обнаружения бесполезна.

1.3 Обнаружение нефтяного загрязнения в замерзающих морях при лидарном зондировании поверхности моря «сверху» из атмосферы и «снизу» из толщи моря

Для обнаружения АНР на снежно-ледовом покрове или в разводьях на чистой морской поверхности можно использовать стандартные методы лидарного зондирования нефтяного загрязнения моря из атмосферы, основанные на различии отражательной способности нефти, снега, льда или морской воды /3/. Задача

существенно усложняется, если зондирование АНР осуществляется из толщи морской среды по нижней границе раздела загрязненного нефтью ледового покрова и морской среды /7/.

В общем случае при зондировании шероховатой мишени с коэффициентом зеркального отражения R лидаром с выходной мощностью излучающего устройства P_0 , расходимостью зондирующего излучения θ_D , площадью входного зрачка приёмного устройства A_{int} , коэффициентом пропускания T среды, находящейся между лидаром и мишенью), мощность зеркальной компоненты P_R рассеянного мишенью зондирующего излучения в первом приближении для статистически шероховатой поверхности мишени будет иметь вид / 8,9 /:

$$\frac{P_R}{P_0} \approx \frac{R T A_{int}}{\pi L^2 (4a_s^2 + \theta_D^2)} \quad (3)$$

где предполагается, что лидар и мишень находятся на расстоянии L друг от друга, оптические оси излучающего и приёмного устройств лидара совмещены, зондирование осуществляется в «надир», т.е. перпендикулярно к поверхности мишени, а $4a_s^2$ - статистический параметр, учитывающий макрошероховатость мишени.

Возможность обнаружения АНР при лидарном зондировании поверхности моря «сверху» обусловлена различием отражательной способности нефти и граничащих с ней поверхностей морской воды, льда, снега. Например, на рис.3 приведена спектральная зависимость коэффициента зеркального отражения от нефти и воды / 10/.

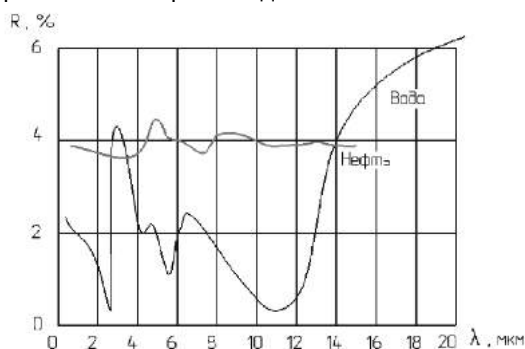


Рис.3 Спектральные коэффициенты отражения светового излучения от нефти и воды

Из этой зависимости следует, что коэффициент зеркального отражения нефти в видимом диапазоне спектра примерно вдвое больше, чем для отражения от воды. Кроме того, регистрируемый лидаром при разливе нефти на чистой воде сигнал зеркального отражения может возрастать в несколько раз из-за «успокаивающего» влияния разлившейся нефти на морское волнение, что приводит к уменьшению величины статистического параметра $4a_s^2$, характеризующего шероховатость зондируемой поверхности моря и к соответствующему возрастанию P_R . Это объясняет высокую обнаружительную способность рассматриваемого метода при обнаружении АНР «сверху» из атмосферы, причём из-за высокой прозрачности

атмосферы для зондирующего излучения при оценках формуле (3) обычно принимают $T \approx 1$.

Таким образом, при лидарном зондировании АНР, например, на чистой морской поверхности (или в разводах снежно-ледового покрова) формула (3) примет вид /9/:

$$\frac{P_R^{oil}}{P_0} \approx \frac{R_{oil} A_{int}}{\pi L^2 (4a_{oil}^2 + \theta_D^2)} \quad (4)$$

Таким образом, регистрируемый лидаром сигнал будет определяться техническими характеристиками конкретного лидара (т.е. P_0 , A_{int} , θ_D), а так же отражательной способностью разлившейся нефти, дистанцией зондирования L и уровнем макрошероховатости морской поверхности $4a_s^2$.

Совсем другая ситуация имеет место при использовании рассматриваемого метода для обнаружения АНР на нижней поверхности ледового покрова, т.е. при зондировании его «снизу» из толщи моря /7/. Морская вода обладает гораздо меньшей прозрачностью, чем атмосфера, (особенно в прибрежных акваториях моря) и поэтому приходится учитывать ослабления зондирующего излучения при двойном проходе по трассе зондирования от лидара к мишени и обратно. Будем для простоты считать, что нижняя поверхность ледового покрова и слой разлившейся нефти абсолютно гладкими. В этом случае формула (3) для нефти на нижней поверхности льда принимает вид /7,9/:

$$\frac{P_R^{oil}}{P_0} \approx \frac{R_{oil} T_w A_{int}}{\pi L^2 \theta_D^2} \quad \text{где } T_w = \exp(-2k_w L) \quad (5)$$

и, соответственно, для чистой поверхности льда без нефти:

$$\frac{P_R^{ice}}{P_0} \approx \frac{R_{ice} T_w A_{int}}{\pi L^2 \theta_D^2}$$

а при наличии АНР:

$$\frac{P_R^{oil}}{P_0} \approx \frac{R_{oil} T_w A_{int}}{\pi L^2 \theta_D^2} \quad (6)$$

где k_w - показатель ослабления зондирующего излучения морской водой.

Тогда под *лидарным контрастом* s в этом случае следует понимать:

$$s = \frac{P_R^{oil} - P_R^{ice}}{P_R^{ice}} \quad (7)$$

Величина контраста в этом случае определяется, прежде всего, соотношением отражательных способностей нефти. В то же время экспоненциальная зависимость ослабления мощности зондирующего излучения с увеличением дистанции зондирования является главным препятствием для широкого распространения этого метода на практике. В работе /4/ отмечено, что при интегральной прозрачности морской воды, соответствующей видимости белого диска 25 м (самый благоприятный случай для Чёрного моря, в то время, например, в Финском заливе Балтийского моря эта величина обычно не превышает 1,5-2 м), нефтяное загрязнение на нижней поверхности льда можно обнаружить рассматриваемым способом на дистанции порядка десятка метров.

Для размещения лидара могут быть использованы не только погружаемые подводные аппараты, но и конструктивные элементы подводных объектов морской инфраструктуры и даже само морское дно (на небольших глубинах).

1.4 Обнаружение подлёдного разлива нефти по тепловому контрасту снежно-ледового покрова над ним

Снежно-ледовый покров на поверхности замерзающих акваторий при возникновении АРН с точки зрения теплофизики представляет собой многослойную систему (снег, лёд, нефть), через которую осуществляется перенос тепла [11]. Теплопроводность верхнего слоя (снега) ниже теплопроводности нижнего слоя (льда), поэтому снежный покров в данном случае выполняет функцию теплоизоляции. Изменение температуры в примыкающих снежно-ледовому покрову средах, т.е. в атмосфере и морской воде, приводит к изменению потока тепла сквозь эту систему и сопровождается изменением поля температуры как внутри нее, так и на ее внешней границе (снеге).

При возникновении АРН под снежно-ледовым покровом нефть всплывает и образует пленку на нижней границе системы (льду), которая прекращает процесс намерзания льда и приводит к исчезновению потока тепла, сопровождающего кристаллизацию льда. Кроме того, нефтяная пленка дополнительно начинает выполнять функцию теплоизоляции. В результате меняется температура поверхности снежного покрова или льда (в случае отсутствия снега), т.е. возникает тепловая аномалия (тепловой контраст) на его поверхности над АРН.

В соответствии с нашей работой [11] температура внешней поверхности снежно-ледового покрова при отсутствии нефти под ним:

$$T_{as} = \frac{\varepsilon_a}{R_{hc}} T_c + \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{R_{hc}}\right) (1 + R_{hc} \mu F_{ho}) T_a. \quad (8)$$

а при возникновении АРН:

$$T_{asf} = \frac{\varepsilon_a}{R_{hf}} T_c + \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{R_{hf}}\right) T_a. \quad (9)$$

где T_c - температура воды, T_a - температура атмосферного воздуха, T_{asf} - температура внешней поверхности слоя снега, R_{hc} и R_{hf} - коэффициенты термического сопротивления, соответственно, для системы «снег-лёд» и «снег-лёд-нефть», F_{ho} - поток тепла кристаллизации льда; μ - коэффициент, определяющий долю теплоты кристаллизации льда, которая переходит в лед; $\varepsilon_a = 1/\alpha_{sa}$ и α_{sa} - коэффициент теплоотдачи.

Разница между температурой внешней поверхности снежно-ледового покрова без нефтяной пленки подо льдом и при её наличии в соответствии с [11] определяет *тепловой контраст*, зависимость которого от температуры воздуха приведена на рис.4

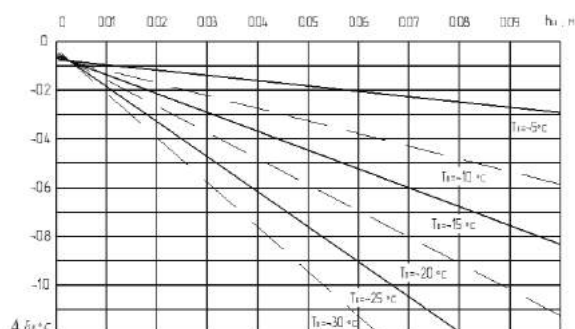


Рис. 4 Зависимость контраста температуры снежного покрова от температуры воздуха для различных толщин льда при одинаковой толщине слоя снега $h_{sn} = 0.05$ м.

Экспериментально обнаружить такой тепловой контраст можно при помощи инфракрасного радиометра (ИКР) или тепловизора.

В соответствии с нашей работой [8] регистрируемый приемной системой ИКР поток теплового излучения P_λ в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)$ от нагретой до температуры $T^\circ\text{К}$ чистой морской поверхности, находящейся на расстоянии L от МП в соответствии с законами теплового излучения можно вычислить по формуле:

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_{int} b_\lambda(T) \varepsilon_\lambda S \tau_f T_{atm}(\lambda)}{L^2} d\lambda \quad (10)$$

где A_{int} - площадь входного зрачка приемного ФПУ локатора, S - площадь зондируемого участка морской поверхности, τ_f - пропускание светофильтра, T_{atm} - прозрачность атмосферы, $b_\lambda(T)$ - спектральная светимость абсолютно черного тела с такой же температурой как у МП; ε_λ - коэффициент «серости» нагретой поверхности. В соответствии с законами теплового излучения от величины от P в формуле (8) можно перейти к яркостной температуре нагретой поверхности.

Современные тепловизоры и ИКР позволяют зарегистрировать тепловой контраст снежного покрова с точностью до нескольких сотых градуса Цельсия, что теоретически достаточно для обнаружения подлёдного АРН.

1.5 Использование георадиолокации для изучения структуры снежно-ледового покрова морской поверхности и её нефтяного загрязнения

Георадиолокация (или «подповерхностная радиолокация») является эффективным методом изучения структуры различных сред, в т.ч. воды, льда, грунта, строительных материалов и т.д. [12]. Георадар (Ground-penetrating radar GPR) излучает в изучаемую среду наносекундные импульсы электромагнитного излучения и регистрирует их отражение («эхо-сигнал») от границ раздела с другими контактирующими с ней средами. Глубина среды h до отражающей излучение границы с другой средой определяется формулой:

$$h = \frac{Vt}{2} \quad [\text{м}] \quad (11)$$

где V - скорость распространения импульса в изучаемой среде, t - время прихода «эхо-сигнала»

Первоначально этот метод использовался при изучения толщины ледового покрова в Антарктиде и вечной мерзлоты в арктических районах, а в настоящее время широко применяется для решения самого широкого спектра геотехнических задач.

Применение метода георадиолокации основано на различии электрических свойств зондируемых сред, в т.ч. удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости. Удельное электрическое сопротивление определяет затухание электромагнитного поля в среде, а, следовательно, и максимально достижимую глубину зондирования. Контрастность выделения границы зондируемых сред (в т.ч. льда, нефти, воды) определяется коэффициентом отражения от них электромагнитного излучения. Чем сильнее отличаются граничащие среды по диэлектрической проницаемости, тем больше коэффициент отражения и выше контраст /12/.

Количественно возможности георадиолокации характеризуется удельным затуханием (в дБ/м) и скоростью распространения излучения в среде и его разрешающей способностью, зависящей от частоты (табл.1 и табл.2) /12/

Сложность использования метода геолокации для изучения структуры многослойных сред заключается в том, что они, как правило, неоднородны и скорость распространения электромагнитного излучения в ней V является сложной функцией от диэлектрической проницаемости ϵ , магнитной проницаемости μ , удельного сопротивления среды ρ и частоты излучения ω . /12/. Это требует использования сложных алгоритмов обработки результатов зондирования.

Таблица 1
Электромагнитные свойства разных сред на частоте 100 МГц /13/

Тип среды	Удельное сопротивление ρ , Ом.м	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{отн.}$	Затухание дБ/м	V , м/сек
Пресная вода	> 1000	80	0,2-2	33
Морская вода	<0,25	80	10-300	33

Литература

1. И.В.Алешин, В.К.Гончаров, Е.В.Любимов, А.С.Портной, В.Н.Разуваев, Безопасность на морских нефтегазопромыслах, // Учебник для ВУЗов. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014, 325 стр.
2. И.В.Алешин, В.К.Гончаров, В.Н.Разуваев, А.С. Портной, Борьба с нефтяными разливами в мировом океане, Морские интеллектуальные технологии // №1, 2012, стр. 5-13
3. И.В.Алешин, В.К. Гончаров, И.М. Левин, В.Ю. Осадчий, Н.Ю. Клементьева, Современные дистанционные методы изучения экологического состояния морской среды // «Морской вестник», 2(26), июнь, 2008, стр.69-74
4. И.В. Алешин, В.К. Гончаров, В.Ю. Осадчий, И.М. Левин, Н.Ю. Клементьева, Джун Ли, Современные методы и технические средства обнаружения в толще морской среды аварийных утечек нефти // «Морской вестник» №2(18).2006, стр. 78-82.
5. Г.А. Лебедев., К.К Сухоруков. Распространение электромагнитных и акустических волн в морском льду // СПб.: Гидрометеиздат, 2001, 81

Морской лед	<1000	7-8	5-40	130-180
Нефть	1016	2-3	-	-

Таблица 2
Зависимость глубины проникновения электромагнитной волны от частоты для сред с малым затуханием (сухой снег, лед).

Рабочая частота, МГц	Максимальная глубина зондирования, м
50	20
150	12
400	5
700	3
1000	1,5

Эффективность использования георадара для обнаружения подледного нефтяного разлива осуществлялась в лабораторных условиях, например, в ледовом бассейне в Ганновере Дэвидом Диккенсом, Хансом Петером и Робертом Хагом в 2009-2011 годах /13/.

Слой нефти толщиной в несколько сантиметров находился под нижней поверхностью ледовой пластины толщиной около метра. Эксперименты продемонстрировали перспективность использования георадара для обнаружения нефтяных разливов подо льдом и позволили сформулировать основные направления дальнейших исследований.

Выводы и заключения

Проведенный в данной работе анализ существующих методов обнаружения аварийных разливов нефти в замерзающих морях показал, что для решения этой актуальной для морского недропользования проблемы можно с разным успехом использовать и традиционные методы экологического мониторинга, а также модифицировать эти методы с учётом существования снежно-ледового покрова над нефтяным разливом. Главными причинами снижения эффективности рассмотренных методов является низкое светопропускание этого покрова, низкая прозрачность морской воды, сложность интерпретации результатов геолокационного зондирования и недостаточная теоретическая разработанность проблемы.

6. И.В.Алешин, А.С.Портной, Экологический риск при освоении ресурсов Мирового океана (монография), СПб., Изд. СПбГМТУ, 2012, 174 с.
7. И.В.Алешин, В.К.Гончаров, А.С.Портной и др. Итоговый отчет СПбГМТУ «Обнаружение и мониторинг нефтяных разливов во льдах арктических и замерзающих морей России» по договору с компанией BP №182-08/9100/MC-2008-06 2008 г., 45 стр.
8. И.В.Алешин, В.А.Яковлев, Современные информационно-оптические технологии оперативного контроля состояния морской поверхности // Морской Вестник, № 3(7), 2003, с.83-87
9. В.Н.Гульков, В.А.Зайцев, М.А.Кропоткин, Е.Г.Пащенко, В.В. Тихонов, под ред. Е.Г. Пащенко, «Опτικο-физические средства исследования океана», Л., Изд. «Судостроение», 1984 г., 264 стр.
10. С.К. Золотарев В.Г., И.А.Китушина, С.М.Сутовский Оптические постоянные нефтей в диапазоне 0.4-15 мкм// Океанология. 1977, Т. 17, № 6, с. 1113-1117
11. V.K. Goncharov, I.V. Aleshin, E.S. Zueva, N. Yu.Klementieva. Evaluation of the Heat Contrast on Ice Cover Surface while the under Ice Oil Spill. Proceedings of the 40th AMOP Technical Seminar on Environment Contamination and Response, Calgary (Alberta), Canada, October 3 – 5, 2017, ON, 8 p., CD-ROM.
12. <http://geo.web.ru>
13. D.Dickens, H.Peter, R.Hag, Detecting oil – ice using Ground-penetrating radar, CRRL, Test Report, 2012, pp.23

References

1. I.V. Aleshin, V.K.Goncharov, E.V.Lyubimov, A.S.Portnoy, V.N.Razuvaev, Safety on offshore oil and gas fields, // Textbook for universities. SPb.: Publishing house SPbGMTU, 2014, 325 pp.
2. I.V. Aleshin, V.K.Goncharov, V.N.Razuvaev, A.S. Tailor, Fighting oil spills in the world's oceans, Marine Intellectual Technologies // №1, 2012, pp. 5-13
3. I.V. Aleshin, V.K. Goncharov, I.M. Levin, V.Yu. Osadchy, N.Yu. Klementyeva, Modern remote sensing methods for studying the ecological state of the marine environment // Morskoy Vestnik, 2 (26), June, 2008, pp. 69-74
4. I.V. Aleshin, V.K. Goncharov, V.Yu. Osadchy, I.M. Levin, N.Yu. Klementyeva, June Lee, Modern Methods and Technical Means of Detecting Emergency Oil Leaks in the Thickness of the Marine Environment // Morskoy Vestnik No. 2 (18) .2006, pp. 78-82.
5. G.A. Lebedev., K.K. Sukhorukov. The propagation of electromagnetic and acoustic waves in sea ice // SPb.: Gidrometeo-izdat, 2001, 81
6. I.V. Aleshin, A.S. Portnoy, Ecological risk during the development of the resources of the World Ocean (monograph), St. Petersburg., Ed. SPbGMTU, 2012, 174 p.
7. I.V. Aleshin, V.K.Goncharov, A.S. Portnoy and others. The final report of SPbSMTU "Detection and Monitoring of Oil Spills in the Ice of the Arctic and Freezing Seas of Russia" under an agreement with BP No. 182-08 / 9100 / MC-2008-06 2008, 45 p.
8. I.V. Aleshin, V.A. Yakovlev, Modern information-optical technologies of operational control of the state of the sea surface // Morskoy Vestnik, No. 3 (7), 2003, pp.83-87
9. V.N.Gulkov, V.A. Zaitsev, M.A. Kropotkin, E.G. Pashchenko, V.V. Tikhonov, ed. E.G. Pashchenko, "Optical-physical means of investigating the ocean", L., Ed. "Sudostroyeniye", 1984, 264 p.
10. S.K. Zolotarev, V.G., I.A. Kitushina, and S.M.Sutovsky, Optical Constants of Oil in the Range of 0.4–15 μm , Okeanologiya. 1977, T. 17, No. 6, p. 1113-1117
11. V.K. Goncharov, I.V. Aleshin, E. S. Zueva, N. Yu.Klementieva. Consumer Water Ice Cover Spill. Proceedings of the 40th AMOP Technical Seminar on Environment, Calgary (Alberta), Canada, October 3 - 5, 2017, ON, 8 p., CD-ROM.
12. <http://geo.web.ru>
13. D.Dicens, H.Peter, R.Hag, Detecting oil - ice using Ground-penetrating radar, CRRL, Test Report, 2012, pp.2

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.036

МЕТОД РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕВЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС**Алексей Юрьевич Яковлев**

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой Гидроаэромеханики и морской акустики,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kgm@smtu.ru

заместитель начальника отделения Ходкости кораблей и судов – начальник отдела управления проектами
Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр»
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44
e-mail: 10_otd@ksrc.ru

Аннотация

Быстродействующие методы расчета гидродинамических характеристик осевых рабочих колес необходимы для оптимизации геометрии лопастей. Современные CFD-пакеты обеспечивают хорошую точность, но требуют больших затрат времени. Методы на базе теории решеток, расчет которых осуществляется на основе решения граничных интегральных уравнений, обладают одновременно быстродействием и необходимой точностью. В работе представлен метод расчета силовых и кавитационных характеристик осевых рабочих колес. В отличие от традиционной методики, расчет выполняется для набора решеток профилей, соответствующих различным радиусам лопастей. Использование метода граничных интегральных уравнений позволяет оценить кавитационные характеристики. Для учета влияния вязкости и турбулентности течения на характеристики рабочего колеса был модифицирован известный метод В.Г. Мишкевича, применяемый для гребных винтов. Точность получаемых расчетных оценок подтверждена сопоставлением с результатами модельных испытаний. Метод используется при проектировании осевых рабочих колес.

Ключевые слова: осевые рабочие колеса, водометы, расчет, кавитация, силы и моменты, решетка профилей, эксперимент, метод граничных интегральных уравнений, вязкость

METHOD OF CALCULATING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AXIAL-FLOW IMPELLERS**Alexey Yu. Yakovlev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,
Head of the Department of Hydroelectric Mechanics and Marine Acoustics,
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kgm@smtu.ru

Deputy Head of the Ship and Vessel Propulsion Division - Head of Project Management Department
Federal State Unitary Enterprise "Krylov State Research Center"
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44
e-mail: 10_otd@ksrc.ru

Abstract

High-performance methods for calculating the hydrodynamic characteristics of axial-flow impellers are needed to optimize the geometry of the blades. Modern CFD packages provide good accuracy, but time-consuming. Methods based on the theory of lattices, the calculation of which is carried out on the basis of the solution of boundary integral equations, possess both high-performance and the required accuracy. The paper presents a method for calculating the power and cavitation characteristics of axial-flow impellers. In contrast to the traditional method, the calculation is performed for a set of lattices of profiles corresponding to different radii of the blades. Using the method of boundary integral equations allows estimating the cavitation characteristics. To take into account the effect of viscosity and flow turbulence on the impeller characteristics, the well-known method of V.G. Mishkevich used for propellers was modified. The accuracy of the calculated estimates obtained is confirmed by comparison with the results of model tests. The method is used in the design of axial-flow impellers.

Keywords: axial-flow impellers, water jets, calculation, cavitation, forces and moments, lattice of profiles, experiment, boundary integral equations method, viscosity

Введение

Рабочие колеса осевого типа (ОРК) широко используются в составе насосов и вентиляторов. В судостроении ОРК являются важнейшим элементом водометных движителей [1].

Для расчета характеристик ОРК широко применяется теория решеток. Несмотря на то, что в настоящее время для расчета таких лопастных систем можно применять 3-х мерные модели вычислительной гидродинамики, методы теории решеток остаются одним из эффективных инструментов. Для расчета обтекания плоской решетки профилей могут применяться как сложные модели вычислительной гидромеханики [2], так и более простые расчетные схемы [3]. Упрощенные подходы позволяют проводить быструю оценку характеристик лопастной системы, что важно для проектировочных расчетов. В настоящее время для проведения таких оценок вместо [3] стало возможно задействовать методы граничных интегральных уравнений, позволяющих рассчитать обтекание решетки профилей в рамках невязкой жидкости. Это позволяет существенно улучшить точность расчетных оценок и повысить качество проектирования осевых насосов и турбин.

В данной работе представлен такой метод для расчета гидродинамических характеристик ОРК. Метод в исходном варианте был разработан автором совместно с А.В. Васильевым [4], и в настоящее время успешно применяется для проектирования и оптимизации лопастных систем [5], [6], [7]. Характерными отличиями представленного метода являются: задание геометрии ОРК по цилиндрическим сечениям (как принято для гребных винтов), расчет течения в плоской решетке с помощью метода граничных интегральных уравнений для ряда цилиндрических сечений, введение специальных поправок учитывающих вязкость, расчет момента начала кавитации на лопастях ОРК.

Математическое описание геометрии лопастей

Геометрия лопастей ОРК задается, в соответствии с [8] в виде зависимостей от радиуса r следующих геометрических характеристик цилиндрических сечений лопастей: ширины C , саблевидности C_s , откидки X_r , максимальной толщины e и стрелки прогиба f , а так же шага P . Кроме того, на каждом радиусе задаются распределение толщины F_t и кривизны F_c вдоль хорды профиля.

Специальная технология аппроксимации геометрии лопастей [9] позволяет, с учетом всех введенных геометрических параметров, определить геометрию лопасти в цилиндрической системе координат, связанной с осью ГВ (рис. 1):

$$X = X_R + \left(C_S + \frac{C}{2} \tilde{\xi} \right) \sin \varphi + \left(f \cdot F_C \pm \frac{e}{2} F_T \right) \cos \varphi$$

$$Y = \left(C_S + \frac{C}{2} \tilde{\xi} \right) \cos \varphi - \left(f \cdot F_C \pm \frac{e}{2} F_T \right) \sin \varphi$$

где $\varphi = \arctg \frac{P}{2\pi r}$ - шаговый угол, «+»

соответствует засасывающей, а «-» - нагнетающей поверхности лопасти, координата ξ направлена вдоль хорды цилиндрических сечений лопасти и принимает значение -1 на выходящей и 1 на входящей кромке лопасти (см. рис. 1).

Такой подход позволяет для каждого цилиндрического сечения построить свою решетку профилей, рассчитать ее обтекание, а потом суммировать результаты расчетов по всем радиусам с тем, чтобы получить гидродинамические характеристики ОРК в целом.

Построение и расчет обтекания решетки профилей

Для моделирования работы ОРК на основе теории решеток, все поле течения разбивается соосными с осью ОРК цилиндрами на ряд слоев. Считается, что течения в этих слоях независимы друг о друга, а обтекание сечений лопастей рабочего колеса в каждом слое является одинаковым. Разворачивая цилиндрические сечения на плоскость и продолжая ряд профилей до бесконечности для обеспечения одинаковости их обтекания, получим набор плоских течений около бесконечных решеток с нулевым установочным углом. Форма профилей определяется геометрией цилиндрических сечений лопастей, определить которую позволяет математическое описание поверхности рабочего колеса [9]. Шаг решетки h определяется радиусом цилиндрического сечения r и количеством лопастей z .

$$h = \frac{2\pi r}{z}$$

Для расчета обтекания бесконечной решетки профилей используется метод распределенных особенностей (вихрей). В этом случае задача определения касательной скорости $V_\tau = V_\tau(x_1, y_1)$ на поверхности отдельного профиля сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода [8]

$$\begin{aligned} \frac{V_\tau}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_S V_\tau \cdot \frac{\partial}{\partial l} \left[\arctg \frac{\operatorname{tg}(\lambda \cdot (y - y_1))}{\operatorname{th}(\lambda \cdot (x - x_1))} \right] dl = \\ = V_{1X} \cdot T_1 + \left(V_{1Y} + \frac{1}{2h} \int_S V_\tau dl \right) \cdot T_2 \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{1X}, V_{1Y} - компоненты скорости набегающего на сечение лопасти потока (см. рис.1), $\lambda = \frac{\pi}{h}$, T_1 и

T_2 - компоненты касательной к контуру профиля.

Численные аспекты расчета решеток уже достаточно хорошо разработаны [10], [11] и останавливаться здесь на этом вопросе нет необходимости.

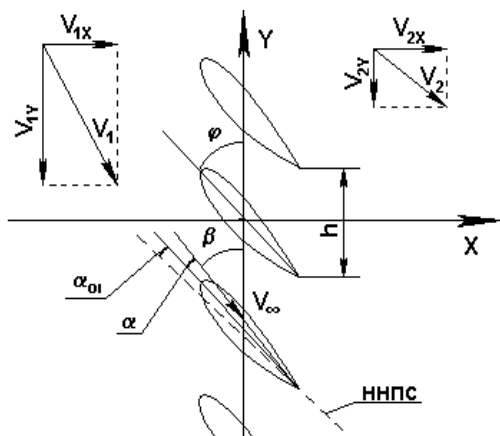


Рис. 1. Схема обтекания решетки профилей.

Скорость потока набегающего на решетку профилей от радиуса к радиусу может изменяться и должна вычисляться с учетом угловой скорости рабочего колеса:

$$\bar{V}_{1X} = \bar{V}_{PKX}(\bar{r}), \quad \bar{V}_{1Y} = -\bar{V}_{PK\Theta}(\bar{r}) - \frac{\pi \Gamma}{J} \quad (2)$$

Здесь индексом РК обозначены скорости в связанной с рабочим колесом неподвижной цилиндрической системе координат $0x\theta$. Черта над V_{1X} и V_{1Y} означает нормировку по средней скорости потока.

Учет вязкости для решетки профилей

Коэффициент подъемной силы одиночного профиля C_Y , в докритическом диапазоне углов атаки α с высокой степенью точности можно считать линейной функцией от α

$$C_Y = \frac{dC_Y}{d\alpha}(\alpha - \alpha_0) \quad (3)$$

где α_0 – угол нулевой подъемной силы.

Для случая единичного профиля хорошо зарекомендовали себя на практике поправки разработанные В.Г. Мишкевичем [9]. При вычислении подъемной силы в реальном потоке вводятся специальные поправочные коэффициенты, учитывающие изменение $dC_Y/d\alpha$

- μ_1 , и угла нулевой подъемной силы - κ_1 . Величину поправки - ΔC_Y , учитывающей влияние вязкости, к коэффициенту подъемной силы в идеальной жидкости C_{YI} удобно представить в виде

$$\Delta C_Y = \left(\frac{dC_Y}{d\alpha} \right)_I [\alpha(\mu_1 - 1) - \alpha_0(\mu_1 \kappa_1 - 1)] \quad (4)$$

где коэффициенты с индексом I соответствуют характеристикам обтекания профиля идеальной жидкостью

Поправки В.Г.Мишкевич для одиночного профиля справедливы в следующих диапазонах: $0 \leq e \leq 0,10$; $0 \leq f \leq 0,03$; $-0,1 \leq C_Y \leq 0,3$. Однако решетки, соответствующие ОРК, могут не попадать в эти диапазоны. Кроме того, в отличие от одиночного

профиля, подъемная сила профиля в решетки зависит не только от угла атаки, но и от густоты (отношение хорды профиля к шагу решетки) и от установочного угла. Однако, обычно на практике диапазон изменения углов атаки мал, что позволяет и для профиля в решетке считать зависимость подъемной силы от угла атаки линейной [12]. Исходя из этого, в работе предлагается вычислять изменение подъемной силы решетки в вязкой жидкости с помощью

формулы (4), подставляя в нее $\left(\frac{dC_Y}{d\alpha} \right)_I$ и угол α_{0I}

, вычисленные для решетки.

Обтекание решетки профилей идеальной жидкостью в самом общем виде можно получить путем линейной комбинации двух частных случаев обтекания решетки потоком V_1^0 и V_1^1 , имеющих одинаковые продольные компоненты скорости и различные поперечные составляющие. Тогда для циркуляции вокруг профиля имеем:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{V_{1Y} - V_{1Y}^0}{\Delta V_{1Y}} \Delta \Gamma \quad (5)$$

где $\Delta V_{1Y} = V_{1Y}^1 - V_{1Y}^0$, $\Delta \Gamma$ - разность расчетных циркуляций, Γ_0 - циркуляция соответствующая потоку V_0 .

Угол нулевой подъемной силы определяется из условия $\Gamma = 0$, в этом случае скорость V_{1Y} легко определяется по формуле (5), а V_{1X} считается постоянной. Поскольку при $\Gamma = 0$ скорость на бесконечности равна скорости в решетке, величина угла α_{0I} может быть вычислена следующим образом

$$\alpha_{0I} = \varphi - \beta_0, \beta_0 = -\arctg\left(\frac{V_{1X}}{V_{1Y}}\right) \quad (6)$$

Вычисляя производную поперечной компоненты скорости в решетке $V_{\infty Y}$ по углу атаки, получаем:

$$\left(\frac{dC_Y}{d\alpha} \right)_I = \frac{2}{C V_{\infty Y}^2} \left[\frac{d\Gamma}{dV_{\infty Y}} \frac{dV_{\infty Y}}{d\alpha} V_{\infty Y} - \frac{dV_{\infty Y}}{d\alpha} \Gamma \right] \quad (7)$$

где $\vec{V}_{\infty} = \frac{\vec{V}_1 + \vec{V}_2}{2}$ - средняя геометрическая скорость.

Поскольку скорость на бесконечности V_{1Y} , входящая в выражение для циркуляции (3), при ее выражении через скорость в решетке

$V_{1Y} = V_{\infty Y} - \frac{\Gamma}{2h}$, оказывается зависящей от

циркуляции, выражение (5) представляет собой неявную функцию относительно Γ . Вычисляя производную от этой функции по скорости в

решетке, и учитывая что $\frac{dV_{\infty Y}}{d\alpha} = -\frac{V_{1X}}{\sin^2 \beta}$, имеем

$$\left(\frac{dC_Y}{d\alpha} \right)_I = - \frac{2}{cV_{\infty Y}^2} \frac{V_{1X}}{\sin^2 \beta} \left[\frac{\Delta \Gamma}{\Delta V_{1Y}} \frac{V_{\infty}}{1 + \frac{1}{2h} \frac{\Delta \Gamma}{\Delta V_{1Y}}} - \cos \beta \Gamma \right] \quad (8)$$

$$\text{где } \beta = -\arctg\left(\frac{V_{1X}}{V_{\infty Y}}\right)$$

Подставляя полученные коэффициенты (6) и (8) в выражение (4), определяем уменьшение подъемной силы профиля в составе решетки обусловленное влиянием вязкости. Изменению подъемной силы ΔC_Y соответствует прямо пропорциональное изменение циркуляции скорости вокруг профиля $\delta \Gamma$

$$\delta \Gamma = \frac{V_{\infty} c}{2} \Delta C_Y \quad (9)$$

Помимо введенной поправки на циркуляцию, формулы В.Г.Мишкевича [9] позволяют оценить коэффициент сопротивления C_X профиля в решетке

$$C_X = \frac{0.05808(1+2.3e)}{Re^{0.1458}} \quad (10)$$

где Re - число Рейнольдса, соответствующее обтеканию профиля.

Учитывая обе поправки (9) и (10) можно получить окончательные выражения для расчета сил, приложенных к профилю в решетке

$$F_X = \rho(\Gamma + \delta \Gamma) \cdot V_{\infty X} + \rho \frac{V_{\infty}^2}{2} C_X \cdot \sin \beta$$

$$F_Y = -\rho(\Gamma + \delta \Gamma) V_{\infty Y} - \rho \frac{V_{\infty}^2}{2} C_X \cdot \cos \beta \quad (11)$$

Расчет силовых характеристик ОРК

Суммарный упор и момент, действующие на ОРК, определяются путем интегрирования по радиусу сил, действующих на элементарные сечения лопасти (11) и суммирования этих сил по всем лопастям. Для безразмерных коэффициентов упора и момента имеем:

$$K_T = - \frac{Z}{\rho n^2 D^4} \int_{r_{CT}}^R F_X dr$$

$$K_Q = - \frac{Z}{\rho n^2 D^5} \int_{r_{CT}}^R F_Y r dr \quad (12)$$

Для судовых движителей эти величины представляются в виде зависимости от так называемой внутренней поступи:

$$J = \frac{V_1(1 - r_{CT}^2)}{nD}$$

В то же время, они могут быть легко пересчитаны в насосные характеристики, поскольку, коэффициент расхода K_{Q0} связан с поступью:

$$K_{Q0} = \frac{\pi}{4} J$$

а коэффициент напора K_H – с коэффициентом K_T :

$$K_H = \frac{4}{\pi g} K_T$$

Разработанный метод применялся для расчета осевых насосов различной конфигурации. Метод показал хорошую точность определения насосных характеристик, что подтверждается сопоставлением с экспериментальными данными. Высокая точность (рис. 2) в значительной мере достигнута за счет использования представленной выше схемы учета вязкости. Расчет без поправок на вязкость приводит к существенному, завышению характеристик насоса.

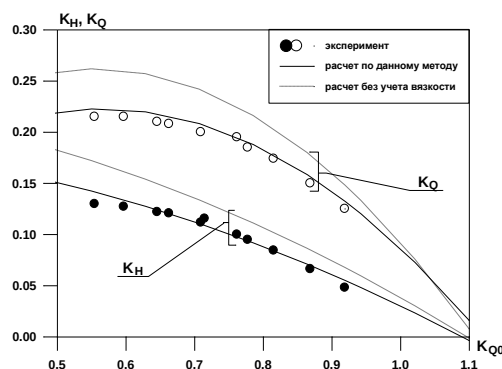


Рис.2. Влияние учета вязкости на точность прогнозирования характеристик ОРК.

Расчет кавитационных характеристик

Использование метода граничных интегральных уравнений позволяет определять скорость на поверхности профиля. Для того, чтобы получить давление необходимо применить интеграл Бернулли, записанный во вращающейся системе координат. В результате получается следующее выражение для коэффициента давления, вычисленного по скорости потока в неподвижной системе координат далеко перед диском РК:

$$C_p = \left(1 - r_{CT}^2\right)^2 + \left(\frac{\pi}{J} r\right)^2 - \bar{V}_{1X}^2$$

В общем случае для оценки кавитации лопастей ОРК требуется проводить расчет с моделированием формы кавитационных каверн. Однако, при анализе момента возникновения кавитации влиянием формы и размеров каверн на обтекание профиля можно пренебречь и использовать для построения кавитационных диаграмм минимальное давление на его поверхности. В таком случае число кавитации определяется непосредственно на основе C_p :

$$\sqrt{\sigma_t} = \sqrt{\frac{C_p}{\pi^2 n^2 D^2}}$$

Указанным образом можно построить кавитационные диаграммы для различных радиусов лопасти. Для ОРК в целом кавитационная диаграмма строится по минимальным значениям из чисел кавитации, полученных на радиусах лопастей.

Верификация расчетного метода

Выше был приведено сопоставление расчетных и экспериментальных силовых характеристик ОРК (рис. 2). В данном разделе более подробно рассмотрен еще один пример ОРК, для которого проводились и кавитационные испытания. Основные характеристики этого ОРК следующие: число лопастей – 4, диаметр – 0,2 м, проектная поступь – 1,43.

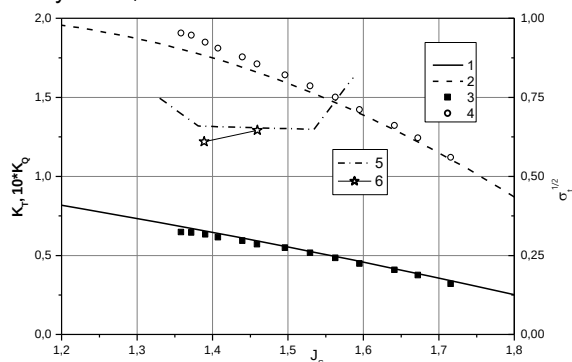


Рис. 4. Сопоставление расчетных (1 – K_T , 2 – K_Q , 5 – $\sigma_t^{1/2}$) и экспериментальных (3 – K_T , 4 – K_Q , 6 – $\sigma_t^{1/2}$) характеристик ОРК.

Из сопоставления расчета и эксперимента (рис. 4) следует, что они хорошо согласуются по K_T , но имеют место некоторые расхождения по K_Q , которые можно объяснить влиянием зазора между концом лопасти и внутренней поверхностью трубы, которое не учитывалось в расчетах. Результаты расчета профильной кавитации хорошо согласуются с экспериментом.

Заключение

Подводя итог, можно констатировать следующее:

- Разработан метод расчета силовых и кавитационных характеристик ОРК. Метод отличается от традиционной методики [3] непосредственным расчетом обтекания решетки профилей, что позволило оценить кавитационные характеристики. По сравнению с расчетом в пакетах CFD разработанный метод отличается быстродействием, обеспечивая при этом хорошую точность на проектном режиме работы ОРК.
- Точность получаемых расчетных оценок подтверждена сопоставлением с результатами экспериментов.

Быстродействие и точность расчетного метода позволили широко использовать его при выполнении проекторочных расчетов ОРК.

Дополнительная информация

Первый вариант данной статьи был подготовлен в 2007 году совместно с А.В. Васильевым, однако, в связи с его безвременной кончиной, публикация не состоялась. Настоящая статья является расширенной версией, отражающей изменения, внесенные в расчетный метод за прошедшие годы. Разделы статьи, написанные А.В. Васильевым, сохранены в исходной редакции. Данная публикация является данью памяти безвременно ушедшему коллеге.

Литература

1. Папир А. Н. Водометные движители малых судов. - Л.: Судостроение, 1970.
2. Пикушак Е.В., Миньков Л.Л. Метод расчета аэродинамического коэффициента полезного действия осевого вентилятора // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, №1(39), 2016, с.90 – 101.
3. Брусиловский И.В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов, М.: Машиностроение, 1986.
4. Васильев А. В., Яковлев А. Ю. Расчетный метод оценки гидродинамических характеристик осевых насосов // Тезисы докладов XL Крыловских чтений, 2001.
5. Яковлев А.Ю. Проектировочный расчет лопастных систем путем прямой оптимизации // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, вып. 35(320), 2008, с.111-121.
6. Яковлев А. Ю., Соколов М. А., Маринич Н. В. – Численное проектирование и экспериментальная проверка подруливающего устройства с кольцевым приводом – Труды Крыловского государственного научного центра. Выпуск 73 (357). СПб: Крыловский государственный научный центр, 2013, с. 17 – 32.
7. Маринич Н.В. Проектирование водометных движителей с двухступенчатой лопастной системой, Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, № 3(381), 2017, с. 43 – 49
8. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. Т.1.
9. Бавин В. Ф., Завадовский Н. Ю., Левковский Ю. Л., Мишкевич В. Г. Гребные винты. Современные методы расчета. - Л.: Судостроение, 1983.
10. Павловец Г. А. Методы расчета обтекания сечений крыла идеальным потоком // Труды ЦАГИ. - 1971. Вып. 1344.
11. Александров К. В., Семионичева Е. Я. Разработка новой профилировки цилиндрических сечений лопастей движителей и рабочих колес насосов // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. - 1998. Вып. 8 (292)
12. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. - М., 1951.

References

1. Papir A.N. (1970) Vodometnye dviziteli malih sudov [Waterjet of a small vessels] Leningrad, Sudostroenie.
2. Pikusach E.V., Minkov L.L. (2016) Metod rascheta aerodinamicheskogo koeffitsienta poleznogo dejstviya oseвого ventilatora [Calculation method of axial fan aerodynamic efficiency] Herald of Tomsk state university. Mathematic & Mechanic, 1(39), pp. 90 – 101

3. Brusilovsky I.V. (1986) Aerodinamichesky rasche osevih ventiljatorov [Aerodynamic calculation of axial fans] Moscow, Mashinostroenye.
4. Vasiljev A.V., Yakovlev A.Yu. (2001) Raschetny metod otsenki gidrodinamicheskikh harakteristik osevih nasosov [Calculation method of axial pumps hydrodynamic characteristics] Abstracts of XL Krylov readings.
5. Yakovlev A.Yu. (2008) Proektirovochniy raschet lopastnih system putem prjamoy optimizatsii [Design calculation of blade systems by direct optimization] Transactions of the KSRC, 35(320), pp.111-121.
6. Yakovlev A. Yu., Sokolov M.A., Marinich N.V. (2013) Chislennoe proektirovanie I eksperimentalnaja proverka podrulivajushchego ustrojstva s koltsevim privodom [Numerical design and experimental verification of a rim-driver thruster] Transactions of the KSRC, 73 (357), pp. 17 – 32.
7. Marinich N.V. (2017) Proektirovanije vodometyh dviziteley s dvuhstupenchatoy lopastnoy sistemoy [Design of waterjet with two-stage blade system] Transactions of the KSRC, 3(381), pp. 43 – 49
8. Voytkunsky Ya.I. (1985) Spravochnik po teorii korablja [Naval engineering handbook] Leningrad, Sudostroenie.
9. Bavin V.F., Zavadovsky N.Yu., Levkovsky Yu.L., Mishkevich V.G. (1983) Grebnie vinty. Sovremennije metody rascheta [Ship propellers. Modern calculation methods] Leningrad, Sudostroenie.
10. Pavlovets G.A. (1971) Metody rascheta obtekanija secheniy krila idealnym potokom [Calculation methods of ideal flow around wing cross sections] TsAGI transections, 1344.
11. Aleksandrov K.V., Semionicheva E.Ya. (1998) Razrabotka novoy profilirovki tsilindricheskyh secheniy lopastey dviziteley I rabochih koles nasosov [Design of a new cylindrical section profile of propellers blades and pumps impellers] Transactions of the KSRI, 8 (292)
12. Abramovich G.N. (1951) Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics] Moscow, GITTL.

УДК 629.12.073.243.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ И СИЛ ВОЛНОВОГО ДРЕЙФА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ КАЧКЕ НАКРЕНЕННОГО СУДНА

Виктория Юрьевна Семенова

д.т.н., профессор, заведующая кафедрой теории корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел. 8-905-229-71-98, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Кирилл Игоревич Баканов

бакалавр

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел. 8-911-180-18-53, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

Вадим Александрович Голуб

магистр

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел. 8-906-277-75-59, e-mail: ipodnano4@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается метод определения возмущающих сил и сил волнового дрейфа, действующих на несимметричные накренные шпангоутные контура. Потенциалы скорости движения жидкости определяются на основании метода интегральных уравнений и функции Грина для бесконечно-глубокой жидкости. Использование метода интегральных уравнений дает возможность учесть истинные формы контуров. Силы, действующие на судно определяются на основании гипотезы плоских сечений. Проводится апробация результатов. Рассмотрен случай поперечной качки судов при расположении лагом к волнению. Приводятся результаты расчетов возмущающих сил и сил волнового дрейфа, действующие на различные суда в зависимости от изменения угла крена. Показано многократное увеличение возмущающих моментов и моментов волнового дрейфа при увеличении угла крена. Увеличение угла крена также способствует изменению знака горизонтальных и вертикальных сил волнового дрейфа. Делается вывод о целесообразности дальнейшего использования данного метода при определении сил, действующих на накренные суда при произвольных курсовых углах, расчете амплитудно-частотных характеристик и статических перемещений.

Ключевые слова: возмущающие силы, силы волнового дрейфа, накренные контура, метод интегральных уравнений, регулярное волнение, потенциал, функция Грина, поперечная качка.

DETERMINATION OF DISTURBING AND WAVE DRIFT FORCES ARISING AT LATERAL MOTIONS OF LISTED SHIP

Victoria Y. Semenova

DScTech, Professor, Head of the Ship Theory Department
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10
tel. : 8-905-229-71-98, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Kirill I. Bakanov

bachelor

St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10
tel. : 8-911-180-18-53, e-mail: kirill.bakanov@mail.ru

Vadim A. Golub

master

St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10
tel. : 8-906-277-75-59, e-mail: ipodnano4@mail.ru

Abstract

The article discusses a method for determining the disturbing and wave drift forces acting on asymmetric listed frame profiles. The potentials of the liquid velocity are determined on the basis of the method of integral equations and the Green's function for an infinitely deep liquid. Using the method of integral equations makes it possible to take into account the true shape of the profiles. Forces acting on a ship are determined on the basis of the flat section hypothesis (slender body theory). The results are being tested. The case of lateral motions of ships with broadside position to disturbance is reviewed. The results of calculations of disturbing and wave drift forces, acting on various ships depending on changes in the angle of list, are presented. A multiple increase in disturbing and wave drift moments with

increasing list angle is shown. An increase in the angle of list also contributes to a change in the sign of the horizontal and vertical forces of the wave drift. The conclusion is drawn on the appropriateness of the further use of this method in determining the forces acting on listed ships at arbitrary heading angles, in calculating the amplitude-frequency characteristics and static displacements.

Keywords : disturbing forces, wave drift forces, listed profiles, the method of integral equations, regular waves, potential, Green's function, lateral motions.

Введение

Количество работ и исследований, посвященных расчетам гидродинамических характеристик наклоненного судна весьма ограничено. К наиболее значимым относятся работы Элис Я.М. [3], [4] в которых рассматривается определение коэффициентов присоединенных масс и демпфирования наклоненных шпангоутных контуров и судна. При этом используется метод конформных отображений наклоненного контура, который зачастую приводит к его неточной аппроксимации. Учесть истинную форму наклоненного контура возможно при использовании метода интегральных уравнений. Такой подход для определения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования был реализован в работе Живицы С.Г., Семенов В.Ю. [2].

В настоящей работе рассматривается решение линейной дифракционной задачи и определение на основании этого решения возмущающих сил, действующих на наклоненное судно и определение сил волнового дрейфа. Силы волнового дрейфа являются нелинейными постоянными силами второго порядка, но полностью определяются на основании решения линейной задачи о качке судна.

1. Описание метода расчета

Предположим, что на свободной поверхности тяжелой, однородной, идеальной, несжимаемой жидкости неограниченной глубины под действием набегающих на него прогрессивных волн с заданной частотой ω , колеблется плоский несимметричный контур, имеющий форму шпангоутного сечения [2]. Потенциал скорости движения жидкости должен $\Phi(\eta, \zeta, t)$ удовлетворять следующим условиям:

- граничному условию на свободной поверхности жидкости

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} = 0; \quad (1)$$

- граничному условию непротекания на смоченной поверхности контура

$$\nabla \Phi^{(1)} \cdot \vec{n} = \vec{V}_0^{(1)} \cdot \vec{n};$$

В случае плоской задачи выражения для векторов скорости $\vec{V}_0$ первого порядка, будут записан следующим образом:

$$\vec{V}_0^{(1)} = \begin{pmatrix} \varepsilon_2 \dot{\eta}_g^{(1)} - \varepsilon_4 \dot{\theta}^{(1)} z; \\ \varepsilon_3 \dot{\zeta}_g^{(1)} + \varepsilon_4 \dot{\theta}^{(1)} y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Phi^{(1)} = (\tilde{\varphi}_0 + \tilde{\varphi}_7^{(1)} + \tilde{\varphi}_2^{(1)} + \tilde{\varphi}_3^{(1)} + \tilde{\varphi}_4^{(1)}) \cdot e^{-j\omega t};$$

где:

$\tilde{\varphi}_0$ – потенциал набегающего волнения;

$\tilde{\varphi}_7^{(1)}, \tilde{\varphi}_2^{(1)}, \tilde{\varphi}_3^{(1)}, \tilde{\varphi}_4^{(1)}$ – потенциалы первого порядка дифрагированного движения жидкости, а также движения, вызванного поперечно-горизонтальными колебаниями (ПГК), вертикальными (ВК) и бортовыми (БК).

Выражение для вектора нормали первого порядка может быть представлено как:

$$\vec{n} = (\cos(n, y), \cos(n, z)) \quad (4)$$

учитывая, что:

$$\begin{aligned} \cos(n, y) &= \frac{dy}{dn} = \frac{dz}{ds} = \bar{z}; \\ \cos(n, z) &= \frac{dz}{dn} = -\frac{dy}{ds} = -\bar{y}' \end{aligned} \quad (5)$$

И подставляя (5), (4) в (2) получим:

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial n} = -j\omega \left[\left(\eta_g^{(1)} - \theta^{(1)} z \right) \frac{dz}{ds} - \left(\zeta_g^{(1)} + \theta^{(1)} y \right) \frac{dy}{ds} \right] \quad (6)$$

Граничные условия на бесконечном удалении от контура и на бесконечной глубине акватории, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}_j \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \pm jK \Phi^{(1)} \right) &= 0; \\ \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения потенциалов первого порядка, входящих в выражение (3) воспользуемся теоремой Грина. Данная функция была предложена Вехаузенем и Лейтоном [6], и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) &= \operatorname{Re}_i \left\{ \log \left(\frac{\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_1^*}{\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_1} \right) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_1)}}{k - k} dk - \right. \\ &\quad \left. - j2\pi e^{-ik(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_1^*)} \right\} = G_C(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) + jG_S(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1). \end{aligned} \quad (8)$$

где: $\tilde{\zeta} = \eta + j\zeta$; $\tilde{\zeta}_1^* = \eta_1 + j\zeta_1$; $\tilde{\zeta}_1 = \eta_1 - j\zeta_1$; j – мнимая единица.

Применив формулу Грина к граничным условиям задачи первого приближения, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} -\tilde{\varphi}_m^{(1)}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \tilde{\varphi}_m^{(1)}(\eta_1(s), \zeta_1(s)) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L F_m^{(1)} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds \end{aligned} \quad (9)$$

где: $m=2, 3, 4$ характеризует вид колебаний, а именно: горизонтальные колебания ($m=2$), вертикальные ($m=3$) и бортовые колебания ($m=4$); для дифракционной задачи ($m=7$);

$F_m^{(1)}$ – граничное условие, на контуре получаемое для каждого вида колебаний, будет иметь следующий вид:

$$F_m^{(1)} = \begin{cases} \cos(n, \eta) = \zeta'(s), m = 2; \\ \cos(n, \zeta) = -\eta'(s), m = 3; \\ \eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta) = -\eta(s)\eta'(s) - \zeta(s)\zeta'(s), m = 4; \\ -\frac{\partial \tilde{\varphi}_0}{\partial n} = -(\zeta' \cdot \frac{\partial \tilde{\varphi}_0}{\partial \eta} + \eta' \cdot \frac{\partial \tilde{\varphi}_0}{\partial \zeta}), m = 7. \end{cases}$$

Потенциал набегающего волнения жидкости, будем находить на основании выражения:

$$\tilde{\varphi}_0 = -g \frac{a_w}{\omega} e^{K\zeta} e^{jK\eta} \quad (10)$$

где: $K = \frac{\omega^2}{g}$; a_w – ордината волны.

$$\tilde{\varphi}_m^{(1)} = -j\omega \left(\varphi_m^{(1)} + j\phi_m^{(1)} \right) \quad (11)$$

Представим потенциал первого порядка в виде суммы мнимой и действительной частей (11), следовательно, можно получить систему линейных интегральных уравнений Фредгольма второго рода:

$$\begin{aligned} \varphi_m^{(1)}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \left\{ \varphi_m^{(1)}(\eta_1, \zeta_1) \cdot \frac{\partial G_C}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) - \right. \\ \left. - \phi_m^{(1)} \cdot \frac{\partial G_S}{\partial n} \right\} ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L F_m^{(1)} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds, \\ -\phi_m^{(1)}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \left\{ \varphi_m^{(1)}(\eta_1, \zeta_1) \cdot \frac{\partial G_S}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) + \right. \\ \left. + \phi_m^{(1)} \cdot \frac{\partial G_C}{\partial n} \right\} ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L F_m^{(1)} \cdot G_S(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds. \end{aligned} \quad (12)$$

Решение полученной системы уравнений, будет основано на методе предложенном Франком [5]. Данный метод, заключается в последовательном разбиении контура на отдельные сегменты, в средних точках получаемых прямых линий сегментов будет проводиться решение неизвестных функция.

Проведем разбиение накрещенного шпангоутного контура на N прямолинейных сегментов, схема разбивки приведена на рисунке 1.

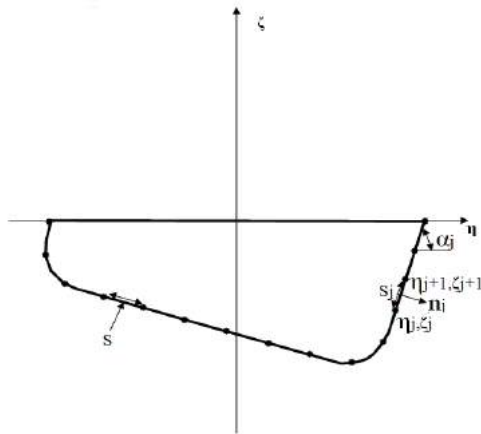


Рис. 1 Разбиение контура

После разбивки контура, для каждого полученного -того сегмента, определим угол наклона α_j относительно оси $O\eta$; длину сегмента S_j ; координаты расположения средней точки (η_j, ζ_j) и единичный вектор нормали n_j :

$$\alpha_j = \arctg \left(\frac{\zeta_{j+1} - \zeta_j}{\eta_{j+1} - \eta_j} \right);$$

$$|S_j| = \left((\eta_{j+1} - \eta_j)^2 + (\zeta_{j+1} - \zeta_j)^2 \right)^{0.5}; \quad (13)$$

$$(\eta_j; \zeta_j) = \frac{1}{2} (\eta_{j+1} + \eta_j; \zeta_{j+1} + \zeta_j);$$

$$n_j = (-\sin \alpha_j; \cos \alpha_j).$$

В итоге, система интегральных уравнений приводится к следующей системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} -2\pi \varphi_m^{(1)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_m^{(1)}(\eta_j, \zeta_j) I_{ij}^{(m)} - \\ - \sum_{j=1}^N \phi_m^{(1)} J_{ij}^{(m)} = \sum_{j=1}^N K_{ij}^{(m)}; \\ -2\pi \phi_m^{(1)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_m^{(1)}(\eta_j, \zeta_j) J_{ij}^{(m)} + \\ + \sum_{j=1}^N \phi_m^{(1)} L_{ij}^{(m)} = \sum_{j=1}^N L_{ij}^{(m)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициенты $I_{ij}^{(m)}, J_{ij}^{(m)}, K_{ij}^{(m)}, L_{ij}^{(m)}$ входящие в выражения (14) определяются на основании следующих выражений:

$$\begin{aligned} I_{ij}^{(m)} = \int \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \text{Re} \{ \log(\tilde{\zeta}_j - \zeta^*) - \\ - \log(\tilde{\zeta}_j - \bar{\zeta}^*) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\tilde{\zeta}_j - \bar{\zeta}^*)}}{K-k} dk \} ds; \\ J_{ij}^{(m)} = 2\pi \int_{S_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \text{Re} e^{-ik(\tilde{\zeta}_j - \bar{\zeta}^*)} ds \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} L_{ij}^{(m)} = -2\pi F_m^{(1)}(\eta_j, \zeta_j) \int_{S_j} \text{Re} e^{-ik(\tilde{\zeta}_i - \bar{\zeta}^*)} ds; \\ K_{ij}^{(m)} = F_m^{(1)}(\eta_j, \zeta_j) \int_{S_j} \text{Re} \{ \log(\tilde{\zeta}_i - \zeta^*) - \\ - \log(\tilde{\zeta}_i - \bar{\zeta}^*) + 2 \int_0^\infty \frac{e^{-ik(\tilde{\zeta}_i - \bar{\zeta}^*)}}{K-k} dk \} ds; \end{aligned} \quad (16)$$

Приведенные выше интегралы, находятся на основании формула квадратур благодаря тому, что сегмент прямолинейный.

В ходе решения дифракционной задачи, стоит представить потенциал набегающего волнения Φ_0 в виде суммы симметричной и не симметричной части:

$$\Phi_0 = \tilde{\varphi}_0 e^{-j\omega t} = (\tilde{\varphi}_{0S} + \tilde{\varphi}_{0A}) e^{-j\omega t} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_0 &= -g \frac{a_w}{\omega} e^{k\zeta} e^{jk\eta}; \\ \tilde{\varphi}_{0S} &= -g \frac{a_w}{\omega} e^{k\zeta} \cos K\eta; \\ \tilde{\varphi}_{0A} &= -jg \frac{a_w}{\omega} e^{k\zeta} \sin K\eta. \end{aligned} \quad (18)$$

На основании уравнения (2.34), представим дифракционный потенциал $\tilde{\varphi}_7^{(1)}$ в виде суммы двух частей:

$$\tilde{\varphi}_7^{(1)} = \tilde{\varphi}_{7S}^{(1)} + \tilde{\varphi}_{7A}^{(1)} \quad (19)$$

Соответственно, получим:

$$\begin{aligned} \varphi_7^{(1)} &= \varphi_{7S}^{(1)} + \varphi_{7A}^{(1)}; \\ \phi_7^{(1)} &= \phi_{7S}^{(1)} + \phi_{7A}^{(1)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Запишем граничные условия на контуре для симметричной и не симметричной части:

$$\begin{aligned} F_{7S}^{(1)} &= - \left(\zeta' \frac{\partial \tilde{\varphi}_{0S}}{\partial \eta} + \eta' \frac{\partial \tilde{\varphi}_{0S}}{\partial \zeta} \right); \\ F_{7A}^{(1)} &= - \left(\zeta' \frac{\partial \tilde{\varphi}_{0A}}{\partial \eta} + \eta' \frac{\partial \tilde{\varphi}_{0A}}{\partial \zeta} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Для определения сил волнового дрейфа, необходимо знать значения производных потенциалов $\varphi_{m\eta}^{(1)}$, $\varphi_{m\zeta}^{(1)}$, $\phi_{m\eta}^{(1)}$, $\phi_{m\zeta}^{(1)}$. Для этого воспользуемся следующим соотношением:

$$\begin{aligned} (\vec{n}\nabla)\varphi_m^{(1)} &= \varphi_{mn}^{(1)} = n_\eta \cdot \varphi_{m\eta}^{(1)} + n_\zeta \cdot \varphi_{m\zeta}^{(1)}; \\ (\vec{s}\nabla)\phi_m^{(1)} &= \phi_{ms}^{(1)} = s_\eta \cdot \phi_{m\eta}^{(1)} + s_\zeta \cdot \phi_{m\zeta}^{(1)}. \end{aligned} \quad (22)$$

где: n_η и n_ζ направляющие косинусы единичного вектора нормали $\vec{n}$:

$$n_\eta = -\sin \alpha_j; \quad n_\zeta = \cos \alpha_j,$$

s_η и s_ζ направляющие косинусы единичного вектора касательной $\vec{s}$:

$$s_\eta = \cos \alpha_j; \quad s_\zeta = \sin \alpha_j. \quad (23)$$

Из соотношений (2.47) находим значения производных потенциалов:

$$\begin{aligned} \varphi_{m\eta}^{(1)}(\eta(s), \zeta(s)) &= \varphi_{ms}^{(1)} \cos \alpha_j - F_m^{(1)} \sin \alpha_j; \\ \phi_{m\eta}^{(1)}(\eta(s), \zeta(s)) &= \phi_{ms}^{(1)} \cos \alpha_j; \\ \varphi_{m\zeta}^{(1)}(\eta(s), \zeta(s)) &= \varphi_{ms}^{(1)} \sin \alpha_j + F_m^{(1)} \cos \alpha_j; \\ \phi_{m\zeta}^{(1)}(\eta(s), \zeta(s)) &= \phi_{ms}^{(1)} \sin \alpha_j. \end{aligned} \quad (24)$$

Возмущающие силы и момент, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_H^{(1)} &= -\rho i \omega e^{-i\omega t} \int_s (\tilde{\varphi}_0 + \tilde{\varphi}_7) \zeta' ds; \\ F_V^{(1)} &= \rho i \omega e^{-i\omega t} \int_s (\tilde{\varphi}_0 + \tilde{\varphi}_7) \eta' ds; \\ M_X^{(1)} &= \rho i \omega e^{-i\omega t} \int_s (\tilde{\varphi}_0 + \tilde{\varphi}_7) (\eta \cdot \eta' + \zeta \cdot \zeta') ds. \end{aligned} \quad (25)$$

Общие выражения для сил и момента волнового дрейфа имеют вид:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_{CH}^{(2)} \\ F_{CV}^{(2)} \\ M_C^{(2)} \end{Bmatrix} &= - \int_{S_0} p_0^{(2)} \begin{Bmatrix} \frac{dy}{dn} \\ \frac{dz}{dn} \\ \left(y \frac{dz}{dn} - z \frac{dy}{dn} \right) \end{Bmatrix} dS - \\ &- \int_{S_0} p^{(1)} \bar{\theta}^{(1)} \begin{Bmatrix} -\frac{dz}{dn} \\ \frac{dy}{dn} \\ 0 \end{Bmatrix} dS + \begin{Bmatrix} \Delta F_{CH}^{(2)} \\ \Delta F_{CV}^{(2)} \\ \Delta M_C^{(2)} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} p_0^{(2)}(y, z) &= -\rho \left\{ -0.5 g z \theta^{(1)}(t) \cdot \bar{\theta}^{(1)}(t) + (\eta_g^{(1)}(t) - \right. \\ &\left. z \theta^{(1)}(t) \right) \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \eta}(y, z) + \left(\zeta_g^{(1)}(t) + y \theta^{(1)}(t) \right) \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} + \\ &\left. + 0.5 \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

$$p^{(1)} = -\rho g \zeta - \rho \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta F_{CH}^{(2)} \\ \Delta F_{CV}^{(2)} \\ \Delta M_C^{(2)} \end{Bmatrix} &= \bar{R}_+ \begin{Bmatrix} -1 \\ \frac{dy}{dz} \\ \frac{ydy}{dz} \end{Bmatrix}_{(b,0)} - \bar{R}_- \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{dy}{dz} \\ -\frac{ydy}{dz} \end{Bmatrix}_{(-b,0)} \\ \bar{R}_\pm &= \rho g 0.5 \left| \zeta^{(1)}(t) \pm b \theta^{(1)}(t) - j \frac{\omega}{g} \Phi^{(1)}(\pm b, 0) e^{-j\omega t} \right|^2 \end{aligned} \quad (29)$$

В соответствии с гипотезой плоских сечений возмущающие силы и силы волнового дрейфа для всего судна определяются путем интегрирования вышеприведенных величин по длине.

2. Анализ результатов расчета

В работе [1] возмущающие и дрейфовые силы рассчитывались для симметричного относительно ДП судна, расположенного лагом к волнению. При этом расчеты проводились для половины каждого шпангоута, затем удваивались. В целях верификации программы, разработанной по вышеизложенному методу, расчеты сил волнового дрейфа для контейнеровоза S-175 были сопоставлены с расчетами по программе [1]. Полученные результаты приведены на рис.2 и показывают убедительное согласование.

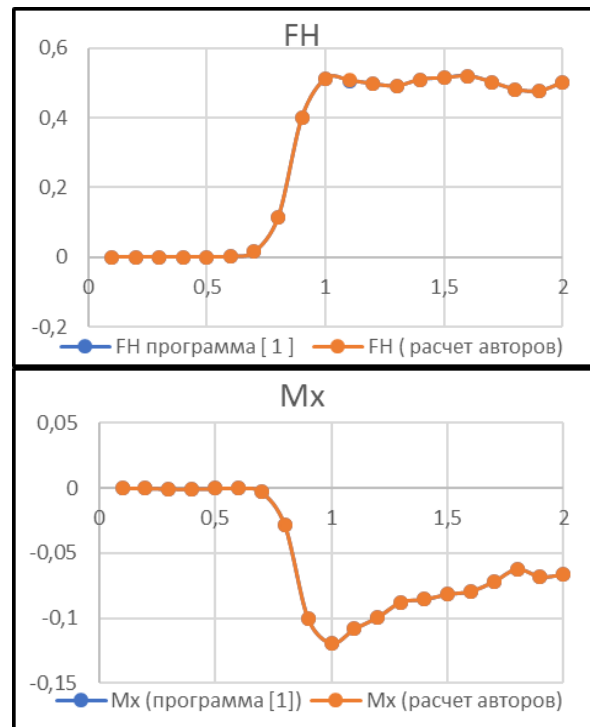


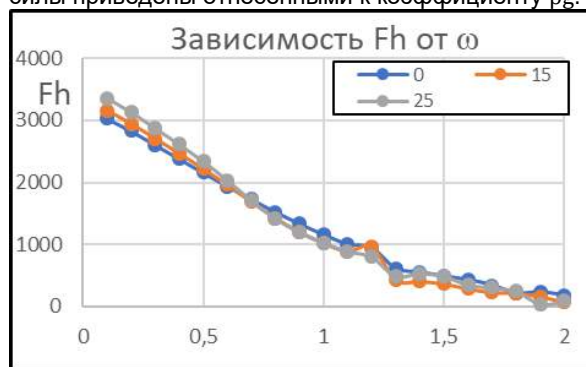
Рис.2 Сравнения расчетов дрейфовых сил и моментов по разным методикам

Расчеты возмущающих сил и сил волнового дрейфа в зависимости от изменения угла крена проводились для судов, характеристики которых приведены в таблице:

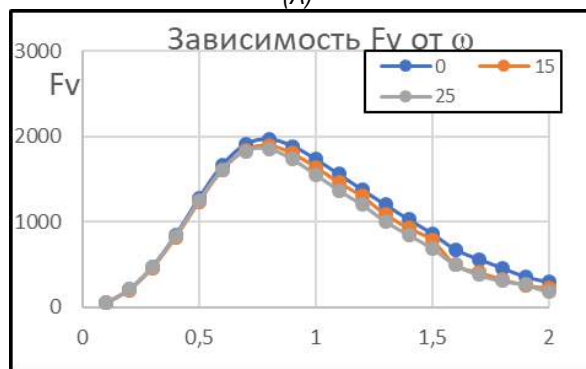
Таблица 1
Основные характеристики судов

Тип/Название судна:	L	B	T	δ	α
Транспортное судно	100	14.3	5.70	0.580	0.730
Навалочное судно "Капитан Гусев"	111	16.4	4.80	0.798	0.896
Навалочное судно "Капитан Панфилов"	134	20.6	9.40	0.779	0.884
Контейнеровоз "S-175"	175	25.4	9.50	0.572	0.709
Танкер "Баскунчак"	74	12.0	4.65	0.711	0.799

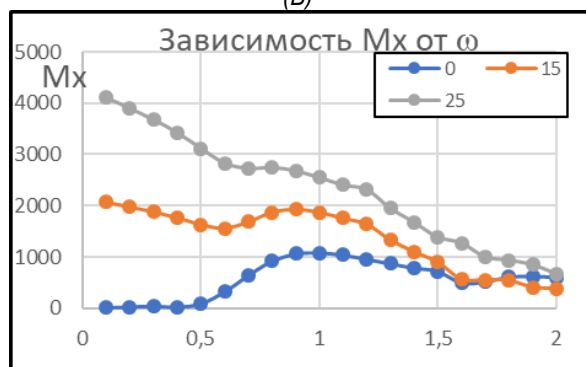
Результаты расчетов возмущающих сил и моментов приведены на рис.3 и 4. Возмущающие силы приведены отнесенными к коэффициенту ρg .



(А)

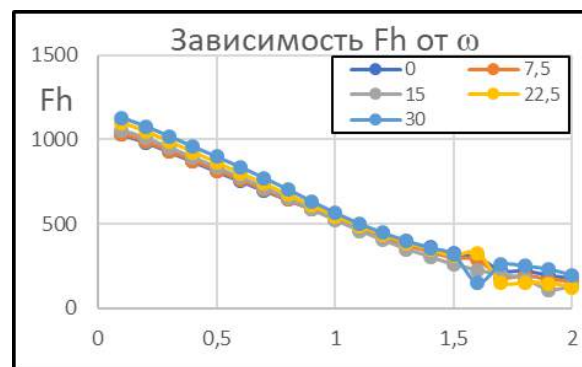


(Б)

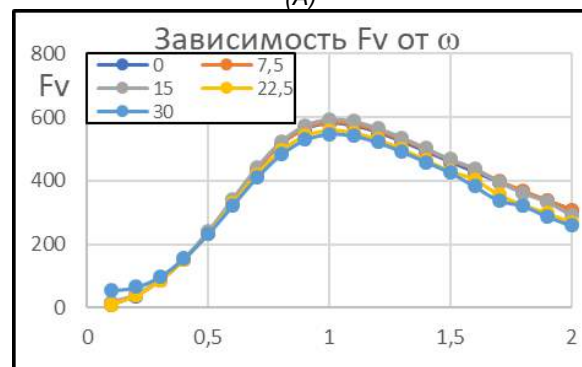


(В)

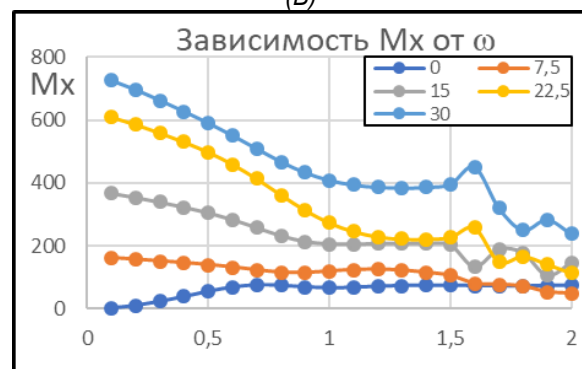
Рис.3 Значения возмущающих сил и момента: горизонтальная (А), вертикальная (Б) и момента (В), действующих на контейнеровоз S -175



(А)



(Б)



(В)

Рис.4 Значения возмущающих сил и момента: горизонтальная (А), вертикальная (Б) и момента (В), действующих на транспортное судно

Анализ влияния угла крена на возмущающие силы показал, что горизонтальные силы практически не зависят от изменения угла крена на всем диапазоне частот.

Вертикальные силы в зоне низких частот $\omega < 0.7$ вообще не зависят от угла крена и совпадают со значениями, характерными для судна, сидящего без крена. В зоне частот $\omega > 0.7$ увеличение угла крена приводит к незначительному уменьшению вертикальных сил (рис.3Б,4Б).

Наибольшее влияние угла крена проявляется при вычислении возмущающих моментов. Его увеличение приводит к значительному возрастанию моментов на всем диапазоне частот. Однако, многократное увеличение возмущающего момента имеет место в области частот $\omega < 0.5$ для обоих судов. Так, для контейнеровоза S-175 на частоте $\omega = 0.5$ момент при угле крена, равном 25 градусов в 2 раза больше аналогичного момента при угле в 15 градусов. Для транспортного судна значение M_x

при угле крена 30 градусов в 12 раз больше M_x при нулевом угле крена. Многократное увеличение возмущающего момента при увеличении угла крена обусловлено увеличением влияния симметричных составляющих потенциалов набегающего и дифрагированного волнения (18), (19) в выражении (23).

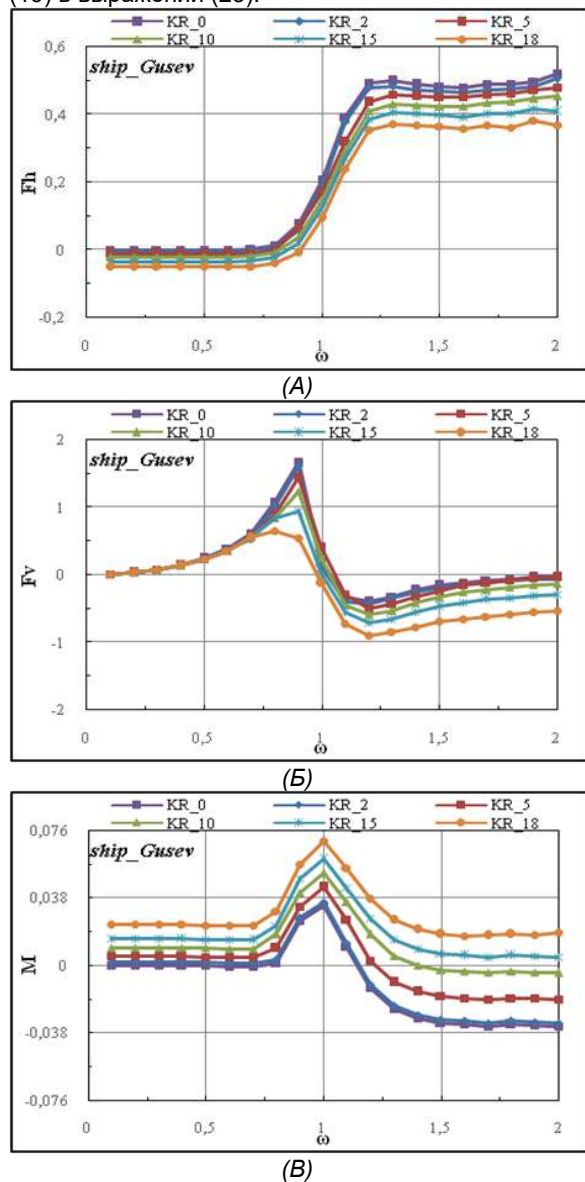


Рис.5 Значения безразмерных сил и момента волнового дрейфа: горизонтальная (А), вертикальная (Б) и момента (В), действующих на навалочное судно Капитан Гусев

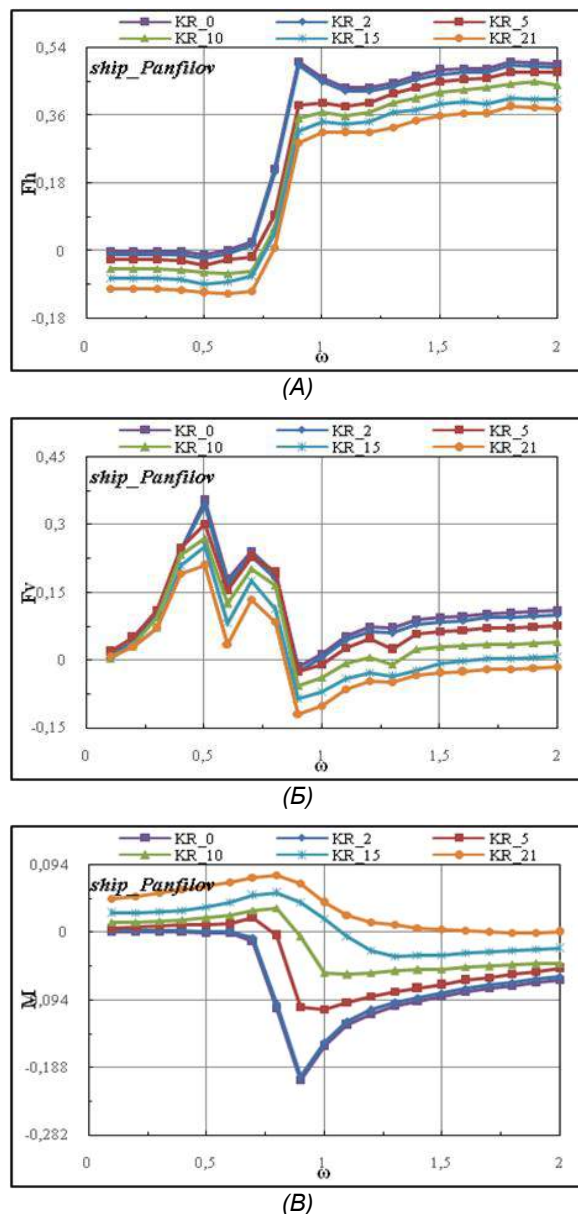


Рис.6 Значения безразмерных сил и момента волнового дрейфа: горизонтальная (А), вертикальная (Б) и момента (В), действующих на балкер Капитан Панфилов

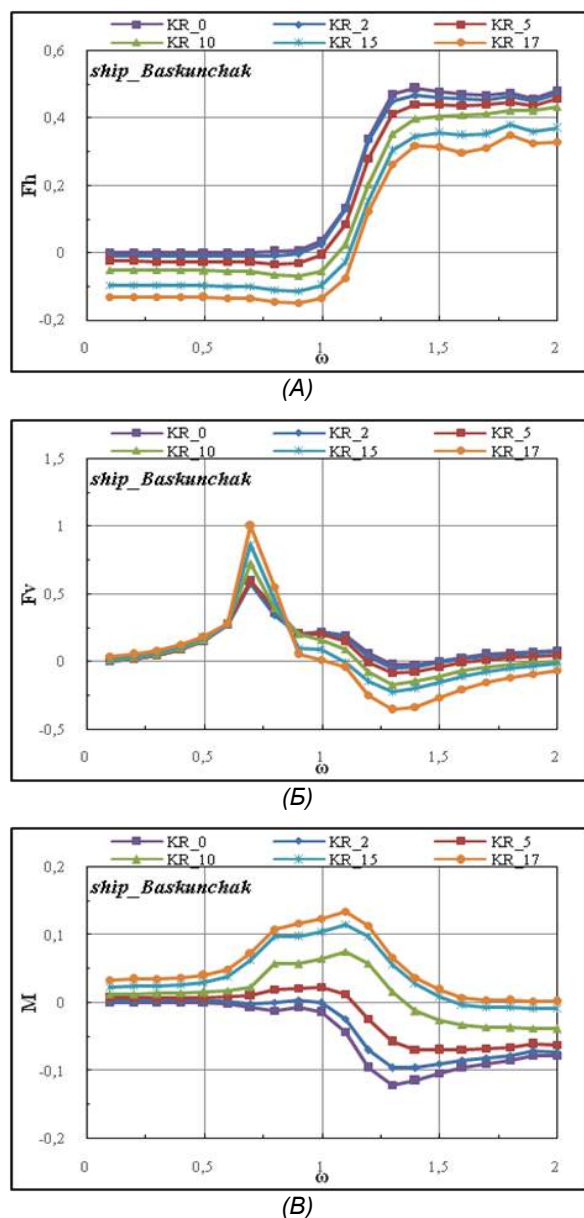


Рис.7 Значения безразмерных сил и момента волнового дрейфа: горизонтальная (А), вертикальная (Б) и момента (В), действующих на танкер Баскунчак

Значительно сильнее проявляется влияние изменения угла крена на силы и моменты волнового дрейфа. Характерные результаты расчетов приведены на рис. 5-7. Увеличение угла крена приводит к уменьшению горизонтальных сил волнового дрейфа на всем диапазоне частот. При этом в зоне частот $\omega < 0.9$ происходит смена знака дрейфовой силы. При возрастании угла крена значения становятся отрицательными. В зоне частот $\omega > 1$ знак не меняется. Уменьшение горизонтальных сил достигает 1.2-1.5 раз по сравнению со случаем нулевого угла крена (рис.5-7 А).

Возрастание угла крена также приводит и к уменьшению вертикальных дрейфовых сил в зоне частот $\omega > 0.5$. При $\omega < 0.5$ данные силы практически не зависят от изменения угла крена. Для некоторых судов в зоне высоких частот $\omega > 1$ может иметь место изменение знака с положительного на отрицательный. Так, для балкера «Капитан Панфилов» на частоте $\omega = 1.3$ значение безразмерной вертикальной силы при нулевом угле крена достигает 0.125, а при крене 21 градус – 0.12 (рис.6Б)

Значения моментов волнового дрейфа меняют знак в большинстве случаев на всем диапазоне частот. При нулевом угле крена данные моменты имеют отрицательные значения. По мере возрастания угла крена значения моментов становятся положительными. Увеличение угла крена приводит также и к увеличению моментов. Так, при качке танкера «Баскунчак» с креном 17 градусов на частоте $\omega = 1$ безразмерный момент равен 0.12, а при качке с креном 10 градусов – 0.06. Таким образом, при увеличении угла крена на 7 градусов происходит двукратное увеличение момента.

Заключение

Изложенная методика позволяет корректно учесть влияние угла крена как на линейные, так и на нелинейные постоянные силы, возникающие при поперечной качке судна. В наибольшей степени изменение угла крена оказывает влияние на возмущающие моменты и моменты волнового дрейфа.

Разработанная авторами программа может в дальнейшем быть использована для оценки вышеуказанных сил и моментов при других курсовых углах, расчетах амплитудно-частотных характеристик и статических перемещений судна.

Литература

1. Семенова В.Ю., Голуб В.А. (2017). Использование модифицированного метода интегральных уравнений для определения нелинейных сил, возникающих при качке судна на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, № 4(38), Т.1, стр 46-55.
2. Семенова В.Ю., Живица С.Г (2015). Практический способ определения гидродинамических характеристик качки накренинного судна. Труды Крыловского государственного научного центра. Выпуск 88(372), стр.237-254.
3. Элис Я.М. (1980). Присоединенные массы и демпфирование поперечных сечений накренинного судна. Гидродинамические коэффициенты накренинных шпангоутных контуров. Труды КТИРПИХ. Вып. 90.
4. Элис Я.М. (1978). Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном. Труды КТИРПИХ, Калининград, вып. 54.
5. Potash R.L. (1971). Second-order theory on oscillating cylinders. Journal of ship research.,v.15, N.4.
6. Wehausen J.V., Laitone E.V. (1960). Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778.

References

1. Semenova V.Yu., Golub V.A. (2017). Ispol'zovanie modifitsirovannogo metoda integral'nykh uravneniy dlya opredeleniya nelineynykh sil, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 4(38), T.1, str 46-552.
2. Semenova V.Yu., Zhivitsa S.G (2015). Prakticheskiy sposob opredeleniya gidrodinamicheskikh kharakteristik kachki nakrenennogo sudna. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. Vypusk 88(372), str.237-254.
3. Elis Ya.M. (1980). Prisoedinennye massy i dempfirovanie poperechnykh secheniy nakrenennogo sudna. Gidrodinamicheskie koeffitsienty nakrenennykh shpangoutnykh konturov. Trudy KTIR-PiKh. Vyp. 90.
4. Elis Ya.M. (1978). Gidrodinamicheskie davleniya, prisoedinennye massy i koeffitsienty dempfirovaniya pri prodol'noy kachke sudna s krenom. Trudy KTIRPKh, Kaliningrad, vyp.54.
5. Potash R.L. (1971). Second-order theory on oscillating cylinders. Journal of ship research., v.15, N.4.
6. Wehausen J.V., Laitone E.V. (1960). Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778.

УДК 533.6.04

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРОФИЛЯ NACA0012

Раши Али

аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Ломоносовская, 3
e-mail: ramimamdouhali@gmail.com

Никита Владимирович Тряскин

доцент кафедры гидроаэромеханики и морской акустики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Ломоносовская, 3
e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

Аннотация

Эксплуатационные характеристики аэродинамического профиля сильно зависят от развития пограничного слоя на поверхности, и поэтому точный прогноз начала перехода ламинарного движения жидкости к турбулентному имеет важное значение.

Объектом изучения является аэродинамический профиль NACA0012. В основе модели движения жидкости лежат осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные моделью турбулентности. Для проведения численного эксперимента использовался открытый некоммерческий пакет OpenFOAM. В работе проводится исследование сеточной сходимости и параметров турбулентности на входной границе. Влияние интенсивности турбулентности и коэффициента турбулентной вязкости на структуру турбулентного пограничного слоя и характер ламинарно-турбулентного перехода при умеренном числе Рейнольдса $Re = 10^6$ изучен для различных углов атаки. Результаты работы показали, что параметры турбулентности оказывают существенное влияние на характеристики ламинарно-турбулентного перехода, а их влияние на коэффициент трения имеет локальный характер. Увеличение интенсивности турбулентности или коэффициента турбулентной вязкости приводит к изменению положения точки начала ламинарно-турбулентного перехода и изменению его длины.

Ключевые слова: CFD, численное моделирование, RANS, уравнения Рейнольдса, ламинарно-турбулентный переход, коэффициент трения, интенсивность турбулентности, коэффициент турбулентной вязкости, NACA0012

EFFECTS OF TURBULENCE VARIABLES ON TRANSITION FLOW CHARACTERISTICS OVER NACA0012 AIRFOIL

Rami Ali

PhD student of the department of hydromechanics and marine acoustics
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: ramimamdouhali@gmail.com

Nikita V. Tryaskin

PhD,
Associate professor of the department of hydromechanics and marine acoustics
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

Abstract

The performance of the airfoil strongly depends on the development of the boundary layer on its surface, therefore an accurate prediction of the transition of laminar flow to turbulent onset is essential.

The studied object is the aerodynamic profile NACA0012. Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) toolbox is applied for numerical simulations. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations coupled by turbulence model are used. Grid convergence analysis was done and turbulent variables at far stream were studied. Effects of turbulence intensity and eddy viscosity ratio on the structure of turbulent boundary layer and the characteristics of the transition stage, at a moderate Reynolds number $Re = 10^6$, were studied for different angles of attack.

The results showed that the far stream turbulence variables have a significant effect on characteristics of the laminar-turbulent transition stage but has local effects on skin friction. Increasing turbulence intensity or eddy viscosity ratio shifts transition onset towards leading edge and increases transition length.

Key words: CFD, numerical simulation, RANS, Reynolds equations, laminar-turbulent transition, friction coefficient, turbulence intensity, turbulent viscosity coefficient, NACA0012

Введение

Обтекание крыльевых профилей при умеренных и высоких числах Рейнольдса сопровождается сложными турбулентными эффектами в пограничном слое, такие как ламинарно-турбулентный переход и срыв потока на передней кромке, повторное присоединение и срыв на задней кромке.

Ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое в последние десятилетия подвергался детальным исследованиям, однако научное сообщество все ещё далёко от его полного понимания.

Положение области начала ламинарно-турбулентного перехода имеет большое значение для характеристик аэродинамического профиля. Точное понимание процесса перехода позволит регулировать поток и контролировать его природу: сохранение ламинарного потока при оттеснении турбулентной фазы, или ускорение перехода, если интерес представляют высокие скорости перемешивания турбулентного потока.

Трудность численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода возникает из-за его нелинейности, широкого диапазона масштабов и того факта, что он может происходить через различные механизмы [1]. Обзор различных сценариев перехода можно найти в работах [2,3,4].

Процесс перехода в значительной степени зависит от срыва потока, интенсивности турбулентности набегающего потока, шероховатости стенки, нагрева или охлаждения поверхности и т.д. [5].

Х. А. Мэдсен и др. исследовали влияние шероховатости передней кромки на ламинарно-турбулентный переход. Их анализ показывает, что на передней кромке должна быть достигнута критическая величина шероховатости для вынужденного (байпасный) перехода к турбулентному потоку [6]. Мейл [7] показал важность градиента давления и интенсивности турбулентности на положение начала ламинарно-турбулентного перехода. Батлер и др. [8] исследовали обтекание аэродинамического профиля при низких числах Рейнольдса и обнаружили, что увеличение степени интенсивности турбулентности до 10% предотвращает срыв потока. Мюллер и Полен [9], Хоффманн [10], Хуанг и Ли [11], Цзянь-Пин Ван и др. [12] исследовали влияние интенсивности турбулентности встречного потока на характеристики аэродинамического профиля и обнаружили, что интенсивность турбулентности оказывает существенное влияние на коэффициенты подъёма и сопротивления. Нин Цао в своём исследовании сосредоточился на влиянии интегрального масштаба и интенсивности турбулентности на коэффициенты подъёмной силы и сопротивления асимметричного профиля, и обнаружил, что увеличение последнего приводит к возрастанию критического угла атаки [13].

Анализ литературы показал, что влияние другой немаловажной характеристики турбулентного потока – отношения турбулентной вязкости к молекулярной – на ламинарно-турбулентный переход на аэродинамическом профиле при умеренных числах Рейнольдса исследовано мало.

Устранение этого пробела является основной целью представленного исследования. В статье рассматривается влияние параметров турбулентности на начало и длину ламинарно-турбулентного перехода при умеренном числе Рейнольдса. Объектом исследования является аэродинамический профиль NACA0012.

1. Математическая постановка задачи

Турбулентное течение вязкой жидкости может быть описано осреднёнными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса и неразрывности. Для замыкания уравнений используется модель турбулентности $k - \omega$ SST, которая сочетает в себе низкорейнольдсовую модель турбулентности Уилкокса $k - \omega$ и высокорейнольдсовую модель Лаундера $k - \varepsilon$. Первая подходит для моделирования потока в вязком подслое, при этом обладает высокой чувствительностью к параметрам турбулентности набегающего потока. Вторая хорошо моделирует поток вдали от поверхности исследуемого объекта, но при этом плохо работает в области отрицательных градиентов давления и не может быть использована вблизи стенки. Для решения полученной системы дифференциальных уравнений используется открытый некоммерческий код OpenFOAM, который основан на методе контрольного объёма.

Задача решается в стационарной постановке с использованием алгоритма SIMPLE [14]. Дискретизация дифференциальных уравнений производится с использованием схем второго порядка *linear upwind*. Критерием сходимости является условие: относительная невязка должна быть меньше 10^{-6} .

Число Рейнольдса соответствует эксперименту [15] и составляет $Re = 10^6$.

Условия Неймана $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ и Дирихле $U_x = U_y = U_z = 0$ задаются вдоль поверхности профиля крыла, где ϕ – поле скаляров и векторов. Для определения турбулентной кинетической энергии k и турбулентной вязкости ν_t используется *lowReWallFunction* [16], а для определения степени диссипации турбулентной кинетической энергии ω – *omegaWallFunction* [16].

На входной границе задаётся: интенсивность турбулентности Tu в пределах $[0.1 \div 10]\%$ и коэффициент вихревой вязкости $\mu_t/\mu = [0.01 \div 100]$. Масштаб турбулентности l при этом остаётся постоянным.

Для моделирования движения жидкости была построена сетка типа O-Grid, которая представляет собой область с радиусом 50C, где C – хорда крыла, рисунок 1.

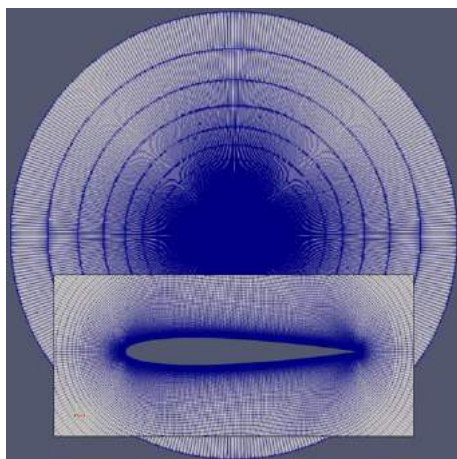


Рис. 1. Сетка вычислительной области O-Grid; сетка внутреннего домена.

2. Определение сеточной сходимости

Чтобы отличить ошибку дискретизации от ошибок итеративной сходимости и компьютерного округления, масштаб улучшения сетки (r – grid refinement ratio) принят равным $r = 2$, что позволяет использовать Grid Convergence Index (GCI) [17, 18]. Следовательно, число разбиений по всей поверхности аэродинамического профиля составляет 200 (3), 400 (2) и 800 (1) узлов.

При изучении сеточной сходимости был вычислен порядок сходимости сетки P , значение которого $P = 1.82 \approx 2$ близко к теоретическому порядку сходимости. Уменьшение ошибки дискретизации в зависимости от нормированного размера сетки показано на рисунке 2. Чтобы определить истинное значение коэффициента сопротивления на «нулевой сетке» экстраполяционная пространственная сходимость Ричардсона была посчитана на двух самых мелких сетках и составляет 0.01029. Показатели сходимости GCI для (1-2) и (2-3) были рассчитаны с учётом коэффициента безопасности для трёх сеток $fs = 1.25$ и получены следующие результаты: $GCI_{1-2} = 0.14665$, $GCI_{2-3} = 0.5209655$. Отношение $GCI_{2-3}/(r^P \cdot GCI_{1-2}) = 1.002991$, приблизительно равное 1, указывает на то, что достигнута сеточная независимость.

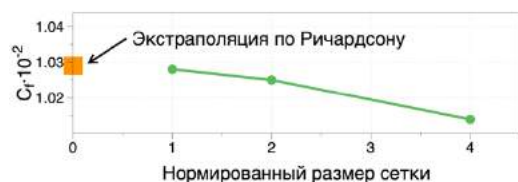


Рис. 2. Исследование сходимости сетки

Анализ результатов сеточной сходимости показывает, что сетка (2) достаточна для определения влияния параметров турбулентности на характеристики переходного режима течения при обтекании профиля крыла.

3. Результаты численного моделирования

Положение ламинарно-турбулентного перехода может быть определено при построении графика распределения коэффициента трения C_f по длине

аэродинамического профиля. Минимальное локальное значение коэффициента трения может указывать на начало переходной зоны, в которой ламинарное течение испытывает неустойчивость с образованием волн Толмина-Шлихтинга. В результате неустойчивости образуются когерентные вихревые структуры. Далее они распадаются и движение становится хаотичным турбулентным.

3.1. Влияние коэффициента вихревой вязкости на положение начала и длину ламинарно-турбулентного перехода

Коэффициент вихревой вязкости (μ_t/μ) оказывает локальное влияние на коэффициент трения (C_f), который остаётся постоянным вдоль поверхности аэродинамического профиля, за исключением ограниченной области ламинарно-турбулентного перехода.

Численное моделирование показало, что высокие значения μ_t/μ на входной границе увеличивают локальное значение C_f , а также смещают точку начала ламинарно-турбулентного перехода к передней кромке профиля (рис. 3а). Увеличение интенсивности турбулентности приводит к увеличению локального коэффициента трения при максимальном коэффициенте вихревой вязкости, и остаётся неизменным при минимальном μ_t/μ (рис. 3б).

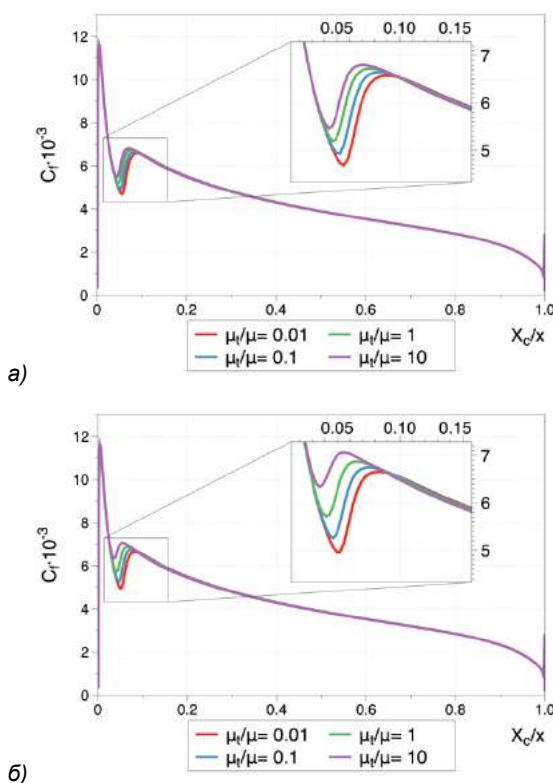


Рис. 3. Распределение коэффициента трения на поверхности профиля NASA0012 при нулевом угле атаки для различных значений коэффициента вихревой вязкости: а) $Tu = 0.1$, б) $Tu = 6$.

3.2. Влияние интенсивности турбулентности на положение начала и длину ламинарно-турбулентного перехода

Коэффициент трения при заданных значениях коэффициента вихревой вязкости и различных значений интенсивности турбулентности показан на рисунке 4. Видно, что увеличение интенсивности турбулентности приводит к смещению точки начала ламинарно-турбулентного перехода к передней кромке профиля, а также к увеличению его продолжительности.

Несмотря на то, что интенсивность турбулентности на входной границе задаётся в достаточно большом числовом диапазоне ($Tu = 0.01; 0.1; 1; 6; 10$), её значение вблизи исследуемого тела различается слабо. Это явление связано со склонностью крупных ячеек к высокой численной диссипации при больших значениях Tu , чего не происходит при малых значениях интенсивности турбулентности.

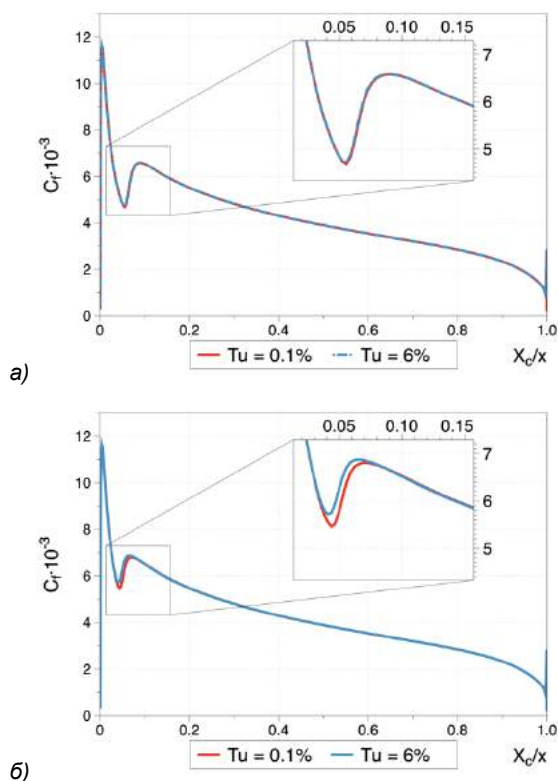


Рис. 4. Распределение коэффициента трения на поверхности профиля NASA0012 при нулевом угле атаки для различных значений коэффициента интенсивности турбулентности: а) $\mu_t/\mu = 0.1$, б) $\mu_t/\mu = 10$.

3.3. Влияние угла атаки на положение начала и длину ламинарно-турбулентного перехода

Распределение коэффициента трения по длине аэродинамического профиля при углах атаки $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha = 10^\circ$ представлено на рисунках 5 и 6 соответственно. Для различных значений вихревой вязкости μ_t/μ интенсивность турбулентности принята равной $Tu = 0.1$ и $Tu = 6$.

Анализ результатов показал, что кривые коэффициента трения при различных значениях интенсивности турбулентности и коэффициента турбулентной вязкости имеют то же поведение, что и в случае нулевого угла атаки. При этом с увеличением угла атаки точка начала ламинарно-турбулентного перехода сдвигается к передней кромке, а зона перехода уменьшается.

Отсутствие некоторых коэффициентов трения на рисунках 5 и 6 связано с тем, что при одновременном использовании больших значений μ_t/μ и малых значений Tu не достигается сходимость решения.

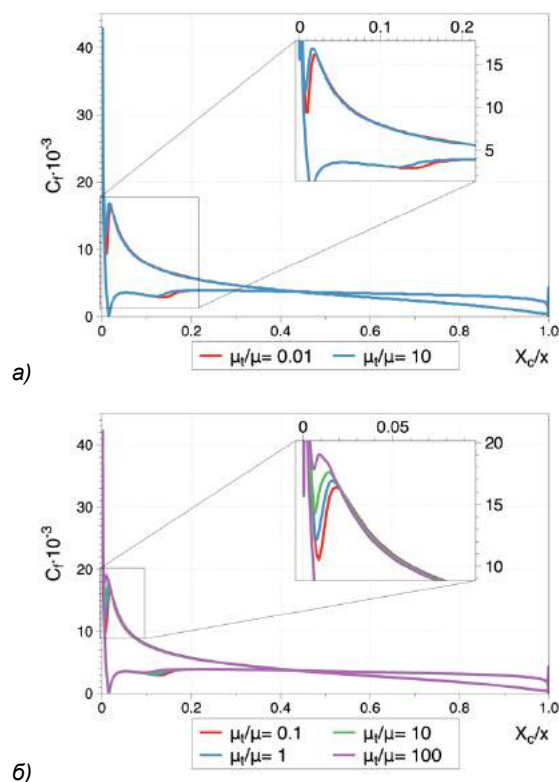
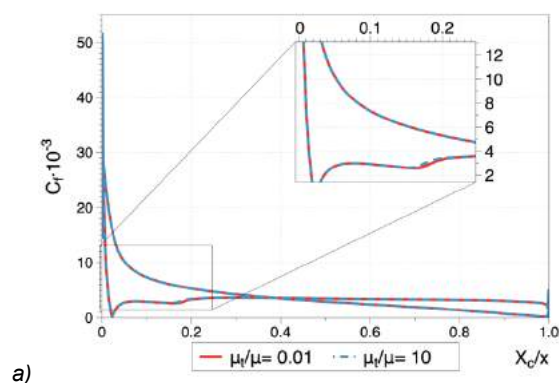
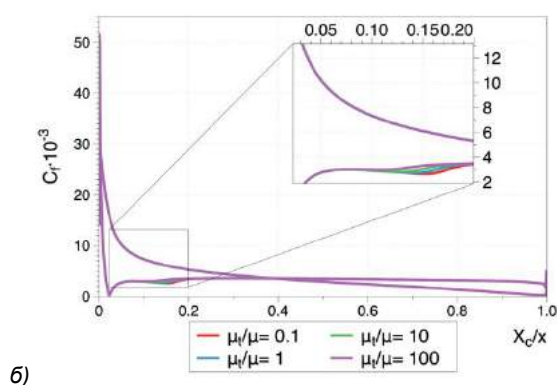


Рис. 6. Распределение коэффициента трения на поверхности профиля NASA0012 при угле атаки $\alpha = 8^\circ$: а) $Tu = 0.1$, б) $Tu = 6$.





б)

Рис. 7. Распределение коэффициента трения на поверхности профиля NACA0012 при угле атаки $\alpha = 10^\circ$: а) $Tu = 0.1$, б) $Tu = 6$.

Заключение

Проведено численное моделирование обтекания аэродинамического профиля NACA0012 и определено влияние интенсивности турбулентности и коэффициента турбулентной вязкости на характеристики переходного режима течения при числе Рейнольдса $Re = 10^6$. Анализ результатов показал:

1. Влияние интенсивности турбулентности и коэффициента вихревой вязкости на распределение коэффициента трения по поверхности профиля мало, за исключением ограниченной области, где происходит ламинарно-турбулентный переход.

2. Высокие значения интенсивности турбулентности дают возможность контролировать положение начала ламинарно-турбулентного перехода на поверхности крыла путём изменения коэффициента турбулентной вязкости с возрастанием численной устойчивости.

3. Увеличение Tu сдвигает начало перехода в направлении передней кромки и не оказывает значительного влияния на длину ламинарно-турбулентного перехода и локального значения коэффициента трения.

4. Увеличение μ_t/μ сдвигает начало перехода в направлении передней кромки, а также увеличивает длину ламинарно-турбулентного перехода и значение локального коэффициента трения.

5. Увеличение угла атаки снижает чувствительность к изменению параметров турбулентности на входной границе.

Литература

1. Lopes. (2015). Calculation of the flow around hydrofoils at moderate Reynolds numbers. Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal
2. Edward Mayle, Robert. (1991). The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines. ASME J. of Turbomachinery. 113. 509-537. 10.1115/91-GT-261.
3. Emmons, H.W. (1951). The laminar-turbulent transition in a boundary layer. I. Journal of the Aeronautical Sciences. 18. 10.2514/8.2010.
4. Blair Langtry, Robin. (2006). A correlation-based transition model using local variables for unstructured parallelized CFD codes.
5. Menter, Florian & Langtry, RB & R. Likki, S & Suzen, Y & Huang, P & Völker, S. (2006). A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation. ASME J. Turbomach. 128. 10.1115/1.2184352.
6. Ö S Özçakmak et al 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1037 022005
7. Mayle, R.E. 1991. The 1991 IGTI Scholar Lecture: The role of laminar to turbulent transition in gas turbine engines. ASME J. Turbomach. 113:509-537.
8. Butler, R.J., Byerley, A.R., VanTreuren, K., and Baughn J.W. 2001. The Effect of Turbulence Intensity and Length scale on Low-pressure Turbine Blade Aerodynamics, International Journal of Heat and Fluid Flow, 22, pp. 123-133
9. Mueller, T.J., Pohlen, L.J., 1983. The Influence of Free-Stream Disturbances on Low Reynolds Number Airfoil Experiments, Experiments in Fluids.
10. Hoffmann, J.A. 1991. Effects of Freestream Turbulence on the Performance Characteristics of an Airfoil, AIAA Journal, 29(9), pp. 1353-1354.
11. Huang, R.F., and Lee, H.W. 1999. Effects of Freestream Turbulence on Wing-Surface Flow and Aerodynamic Performance, Journal of Aircraft, 36(6), pp. 965-972.
12. Li, Shao-wu & Wang, Shu & Wang, Jian-Ping & Mi, Jiaying. (2011). Effect of turbulence intensity on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements. Applied Mathematics and Mechanics. 32. 1029-1038. 10.1007/s10483-011-1478-8.
13. Cao, Ning. (2010). Effects of turbulence intensity and integral length scale on an asymmetric airfoil at low Reynolds numbers.
14. Бесядовский А.Р. Численные методы в гидромеханике: учеб. пособие / А.Р. Бесядовский. – Спб.: Изд-во СПбГМУ. – 2018. – 151 с.
15. Sheldahl, R.E. & Klimas, P.C. (1981). Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. 10.2172/6548367.
16. Georgi Kalitzin; Gorazd Medic; Gianluca Iaccarino; Paul Durbin. Near-wall behavior of rans turbulence models and implications for wall functions. Computational physics, 204(205):265–291, 2004.
17. Roache, P.J.. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG. 116. 405-413. 10.1115/1.2910291.
18. J. Roache, P. (1997). Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics. 29. 123-160. 10.1146/annurev.fluid.29.1.123.

References

1. Lopes. (2015). Calculation of the flow around hydrofoils at moderate Reynolds numbers. Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal
2. Edward Mayle, Robert. (1991). The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines. ASME J. of Turbomachinery. 113. 509-537. 10.1115/91-GT-261.
3. Emmons, H.W. (1951). The laminar-turbulent transition in a boundary layer. I. Journal of the Aeronautical Sciences. 18. 10.2514/8.2010.
4. Blair Langtry, Robin. (2006). A correlation-based transition model using local variables for unstructured parallelized CFD codes.
5. Menter, Florian & Langtry, RB & R. Likki, S & Suzen, Y & Huang, P & Völker, S. (2006). A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation. ASME J. Turbomach. 128. 10.1115/1.2184352.
6. Ö S Özçakmak et al 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1037 022005
7. Mayle, R.E. 1991. The 1991 IGTI Scholar Lecture: The role of laminar to turbulent transition in gas turbine engines. ASME J. Turbomach. 113:509-537.
8. Butler, R.J., Byerley, A.R., VanTreuren, K., and Baughn J.W. 2001. The Effect of Turbulence Intensity and Length scale on Low-pressure Turbine Blade Aerodynamics, International Journal of Heat and Fluid Flow, 22, pp. 123-133
9. Mueller, T.J., Pohlen, L.J., 1983. The Influence of Free-Stream Disturbances on Low Reynolds Number Airfoil Experiments, Experiments in Fluids, 1, pp. 3-14.
10. Hoffmann, J.A. 1991. Effects of Freestream Turbulence on the Performance Characteristics of an Airfoil, AIAA Journal, 29(9), pp. 1353-1354.
11. Huang, R.F., and Lee, H.W. 1999. Effects of Freestream Turbulence on Wing-Surface Flow and Aerodynamic Performance, Journal of Aircraft, 36(6), pp. 965-972.
12. Li, Shao-wu & Wang, Shu & Wang, Jian-Ping & Mi, Jiaying. (2011). Effect of turbulence intensity on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements. Applied Mathematics and Mechanics. 32. 1029-1038. 10.1007/s10483-011-1478-8.
13. Cao, Ning. (2010). Effects of turbulence intensity and integral length scale on an asymmetric airfoil at low Reynolds numbers.
14. Besyadovskiy A.R. Chislennyye metody v gidromekhanike: ucheb. posobiye / A.R. Besyadovskiy. – Spb.: Izd-vo SPbGMTU. – 2018. – 151 s.
15. Sheldahl, R.E. & Klimas, P.C. (1981). Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. 10.2172/6548367.
16. Georgi Kalitzin; Gorazd Medic; Gianluca Iaccarino; Paul Durbin. Near-wall behavior of rans turbulence models and implications for wall functions. Computational physics, 204(205):265–291, 2004.
17. Roache, P.J. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG. 116. 405-413. 10.1115/1.2910291.
18. J. Roache, P. (1997). Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics. 29. 123-160. 10.1146/annurev.fluid.29.1.123.

УДК 629.563.2(211)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕР ПО СНИЖЕНИЮ НАГРУЗОК НА ШЕЛЬФОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ ОТО ЛЬДА УМЕРЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Геннадий Брониславович Крыжевич

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

Аннотация

При проектировании ледостойких нефтегазодобывающих платформ необходимо уделять особое внимание выбору формы и конструктивного оформления ледового пояса, способствующему снижению ледовых нагрузок. Известны инновационные решения по форме ледового пояса, предусматривающие установку на его прямостенных поверхностях пирамидальных ледоразрушающих наделок. При контакте пирамидальных наделок со льдом в районах их ребер (пересечения граней пирамид) наблюдается концентрация напряжений, приводящая к быстрому развитию в этих районах пластического течения льда (при очень малых нагрузках на сооружение), к стеснению пластического деформирования льда в зонах концентрации и к появлению трещин. Основная цель работы – оценка эффективности новой формы ледового пояса с наделками, обеспечивающими снижение ледовых нагрузок и уменьшение материалоемкости ледостойких сооружений. Для ее достижения выполнены экспериментальные исследования маломасштабных моделей ледового пояса при ледовых воздействиях, включавшие:

- проектирование и изготовление трех схематизированных моделей ледостойкого сооружения с традиционной и новыми формами ледового пояса;
- проведение испытаний этих моделей на воздействие льда на специальном стенде с измерением усилий;
- выполнение статистической обработки результатов испытаний моделей;
- сравнительный анализ результатов испытаний моделей с традиционной и новой формами ледового пояса; оценку эффективности новых геометрических форм ледового пояса.

Результатами работы являются рекомендации по конструированию ледового пояса стальных нефтегазодобывающих платформ, эксплуатируемых при воздействии льда умеренной толщины, а также способ расчета ледовых нагрузок на опоры платформ с ледоразрушающими наделками. Результаты работы направлены на создание рентабельных, прочных и надежных нефтегазодобывающих платформ для Арктики.

Ключевые слова: океанотехника, ледовые нагрузки, ледостойкие нефтегазодобывающие платформы, ледовый пояс платформы, опоры морских буровых установок, проектирование шельфовых сооружений, экспериментальные методы.

EFFECTIVE MEASURES FOR DECREASE OF LOADS ON OFFSHORE STRUCTURES CAUSED BY MODERATE THICKNESS ICE

Gennady B. Kryzhevich

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: G_Kryzhevich@ksrc.ru

Abstract

When designing ice-resistant oil-and-gas production platforms, special attention shall be paid to selection of ice belt shape and embodiment to promote ice loads decrease. Some innovative solutions on ice belt shapes are known that consist in installation of pyramidal ice-breaking extensions on ice belt flat-sided surfaces. In the course of pyramidal extensions contacts with the ice, in the area of their ridges (intersection of pyramid sides) stress concentration is observed that causes quick development of ice plastic flow in these areas (at very low loads on the structure), decrease of ice plastic properties in the ice concentration areas and cracks initiation. The main goal of the work consists in effectiveness evaluation for the ice belt new shape with extensions that ensure ice loads reduction and decrease of ice-resistance structures material consumption. For this purpose, experimental studies of ice belt small-scale models under ice action were performed. This incorporated the following:

- Design and manufacture of three schematized ice-resistant structure models with conventional and new ice belt shapes;
- Tests of these models under ice actions by a special test bench with measuring forces;
- Statistical processing of the model test results;

- Comparative analyses of the test results of the models with conventional and new ice belt shapes.

The work results include recommendations on designing ice belts of steel oil-and-gas production platforms operating under actions of moderate thickness ice, as well as the method for calculating ice loads on legs of platforms with ice-breaking extensions. The results of the work are aimed to creation of profitable strong and reliable oil-and-gas production platforms for the Arctic.

Key words: ocean engineering, ice loads, ice-resistant oil-and-gas production platforms, platform ice belt, legs of offshore drilling units, design of offshore structures, experimental methods.

Введение

Морские нефтегазодобывающие платформы в условиях Арктики подвергаются воздействию ледовых образований с повышенной прочностью. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании платформ, применять нетрадиционные проектные решения и технологии [1-6]. Они необходимы, прежде всего, при выборе формы и конструктивного оформления ледового пояса [1-2], которое должно соответствовать сложности природных условий [7-9] и способствовать снижению ледовых нагрузок.

В данной работе предпринята экспериментальная проверка эффективности новых проектных решений, предложенных в работах [1-2]. Согласно им снижение ледовых нагрузок достигается за счет применения соединённых сваркой с обшивкой 1 ледового пояса ледоразрушающих наделок пирамидальной формы 2 (рис. 1). Рекомендуемой формой основания ледоразрушающей пирамиды с ребром 3 является изображенный на этом рисунке треугольник. Внутри каждой наделки установлены диафрагмы 4, совмещённые со стенками балок перекрытия, и поддерживающие обшивку наделок.

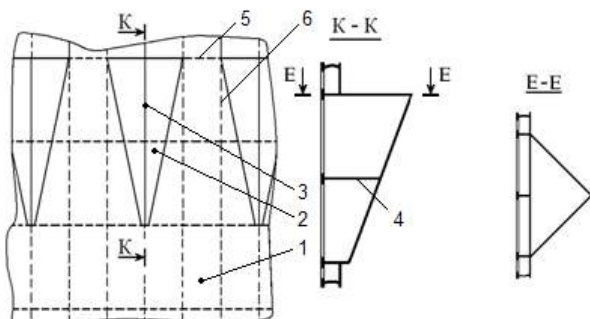


Рис. 1. Принципиальная конструкция ледового пояса с ледоразрушающими пирамидальными наделками, вытянутыми в вертикальном направлении:

1 - обшивка ледового пояса; 2 - грань ледоразрушающей наделки; 3 - ребро ледоразрушающей наделки; 4 - диафрагма; 5 - балка горизонтального набора; 6 - ребро вертикального набора.

При контакте пирамидальных наделок со льдом в районах их ребер (пересечения граней пирамид) наблюдается концентрация напряжений, приводящая к быстрому развитию в этих районах пластического течения льда (при очень малых нагрузках на сооружение), к стеснению пластического деформирования льда в зонах концентрации и к появлению трещин. При этом формируются преимущественно радиальные и кольцевые трещины.

Таким образом, основные цели работы:

- оценка эффективности новой формы ледового пояса, обеспечивающей снижение ледовых нагрузок и уменьшение материалоемкости ледостойких сооружений;
- разработка способа расчета этих нагрузок.

Для достижения этих целей выполнены:

- проектирование и изготовление трех схематизированных маломасштабных моделей ледостойкого сооружения с традиционной и новыми формами ледового пояса;
- испытания этих моделей на воздействие льда на специальном стенде с измерением усилий;
- обработка результатов испытаний моделей ледового пояса сооружений, эксплуатируемых при воздействии льда умеренной толщины;
- сравнение результатов испытаний моделей с традиционной и новой формой ледового пояса;
- разработка рекомендаций по проектированию ледового пояса стальных нефтегазодобывающих платформ, эксплуатируемых при воздействии льда умеренной толщины, и по расчетному определению ледовых нагрузок при новой форме пояса.

1. Испытательный стенд

Объектами исследования явились модели ледового пояса ледостойкого сооружения с традиционной геометрической формой и с новой формой, испытывавшиеся на специальном стенде Крыловского государственного научного центра (рис. 2) в условиях силового контактного взаимодействия с ледяными пластинами (блоками), обеспечивавшегося с помощью гидроцилиндров. Схема стенда изображена на рис.2а.

Стенд состоит из:

- контрфорса (опоры) 1, неподвижно закрепленного на силовом полу и служащего для закрепления на нем модели 2;
- закрепленного на силовом полу направляющего контейнера 3, в котором в продольном направлении способен перемещаться блок льда 4 (рис. 3);
- толкателя 5, способного перемещаться в продольном направлении в отверстии направляющего контейнера и сообщать поступательное движение блоку льда;
- гидроцилиндра 6, закрепленного на силовом полу и способного создавать с помощью штока 7 толкающее усилие до 20 т, вызывающее поступательное перемещение толкателя и блока льда до 500 мм, благодаря чему последний взаимодействует с моделью;
- датчика линейных перемещений штока гидроцилиндра 8, установленного на гидроцилиндре;
- динамометра 9, установленного на гидроцилиндре.

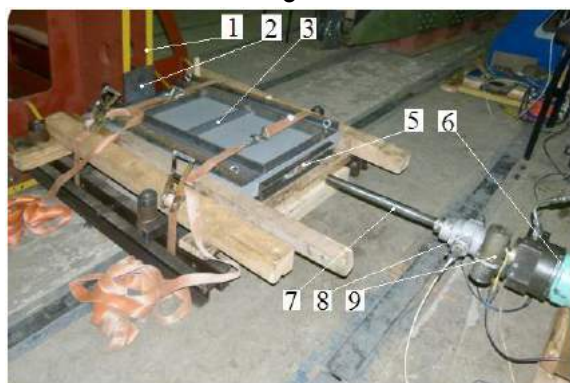
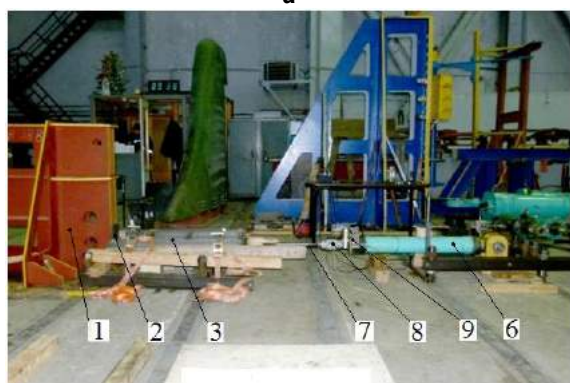
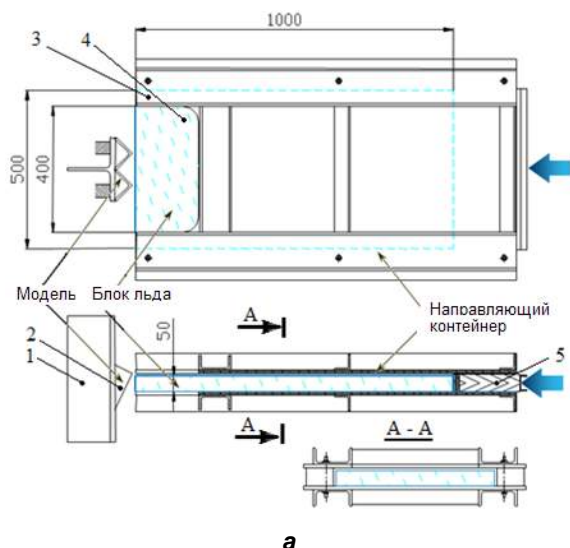


Рис. 2. – Схема (а) и общий вид испытательного стенда (б – вид сбоку; в – вид сверху).



Рис. 3. Установка блока льда в направляющий контейнер

2. Измерение физических величин (усилий и перемещений)

Для измерения усилий и перемещений использовались сертифицированные измерительные каналы:

- канал измерения силы ДСТУ-50-52 автоматизированной системы сбора и обработки информации «ViCont». Значение относительной расширенной неопределенности измерения силы при коэффициенте охвата 2 (границы погрешности при доверительной вероятности 0,95) равны $\pm 0,4 \%$;
- канал измерения линейных перемещений с датчиком ДЛП № 110.

Значение относительной расширенной неопределенности измерения перемещения при коэффициенте охвата 2 (границы погрешности при доверительной вероятности 0,95) равны $\pm 1,3 \text{ мм}$.

3. Маломасштабные модели ледового пояса

Испытаниям подвергнуты три маломасштабные модели ледового пояса ледостойких морских сооружений (рис.4) с шириной 200 мм. Модели № 2 и № 3 имели одинаковую топологию, а грани их ледоразрушающих наделок пересекались между собой под прямым углом. В первой модели точка наделки, вступающая первой в контакт со блоком льда, отстояла от основной плоскости (от вертикальной стенки) модели на 49 мм, а во второй модели – на 30 мм. Угол наклона ребра наделки к основной плоскости составлял у первой модели $30,7^\circ$, а во второй – $16,7^\circ$.

4. Результаты экспериментальных исследований

Каждая из трех моделей подвергалась на стенде ледовым воздействиям с использованием однородных блоков льда с температурой $-3^\circ\text{C} \div -5^\circ\text{C}$. Габаритные размеры блока $1000 \times 500 \times 50 \text{ мм}$. Ширина моделей в 4 раза превышала толщину льда. Скорость надвигания (дрейфа) льда в моменты достижения пиковых значений нагрузок составляла от 0,12 до 0,55 мм/с. Опыты по разрушению этих блоков сопровождались цифровой записью процессов изменения перемещений штока гидроцилиндра и развиваемого им толкающего усилия. Записи процессов производилась в таком промежутке времени, в течение которого перемещения составляли не менее 250 мм (рис. 5). На этом промежутке наблюдалось, как правило, не менее двух пиков нагрузки на штоке. Исключение составляли 3 опыта с моделью № 1, в которых наблюдался всего лишь один ярко выраженный пик, после чего происходило разрушение всего блока. Наибольшие пиковые горизонтальной нагрузки в каждом из 17 опытов приведены в табл. 1.

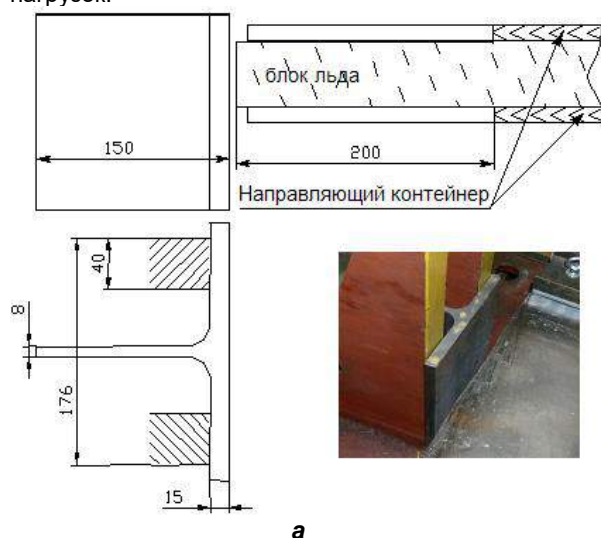
Благодаря статистической обработке трех выборок опытных данных, соответствующих каждой из испытанных моделей, определены значения математических ожиданий максимальных пиков и их дисперсии (табл. 1). На основе методических подходов, использованных при создании международного стандарта [9], расчетную нагрузку на нефтегазодобывающие

сооружения можно оценить путем прибавления к математическому ожиданию удвоенного значения стандарта максимальных пиковых значений, полученных в эксперименте. Такие расчетные нагрузки для трех различных моделей также приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что найденные таким образом расчетные нагрузки существенно превышают наибольшие пиковые значения нагрузок, замеренных в эксперименте. При этом расчетные нагрузки, полученные на основе испытаний моделей № 2 и № 3, составляют всего лишь 14% и 22% от расчетной нагрузки, полученной по результатам испытаний модели № 1. Это обстоятельство позволяет говорить о высокой эффективности предлагаемых новых проектных решений для ледового пояса и о многократном снижении ледовых нагрузок при их использовании (рис. 5).

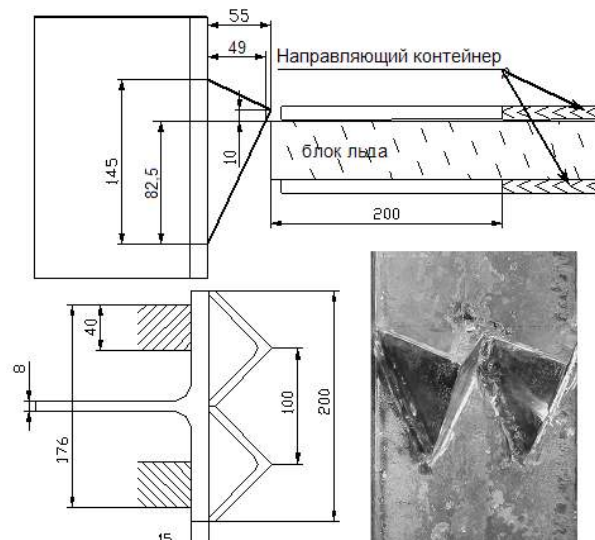
Наиболее интересные моменты фиксировавшегося с помощью видеосъемки процесса разрушения блоков льда при взаимодействии с моделями № 1 и № 2 приведены на рис. 6. Краткое описание характерных особенностей процессов разрушения льда и взаимодействия маломасштабных моделей со льдом дано в таблице 2. Несмотря на наличие факторов, способствующих пластическому деформированию льда (малые скорости деформирования льда перед разрушением и низкую температуру блоков льда, близкую к температуре плавления) признаки вязкого разрушения наблюдалось только в опытах с моделью №1. При испытаниях моделей № 2 и № 3 (в отличие от опытов с моделью № 1) не наблюдались явления, сопровождающиеся увеличением ледовых нагрузок [8, 12]:

- дробление льда с образованием мелких продуктов разрушения;
- мелкодисперсное измельчение льда в средней части ледяной пластины.

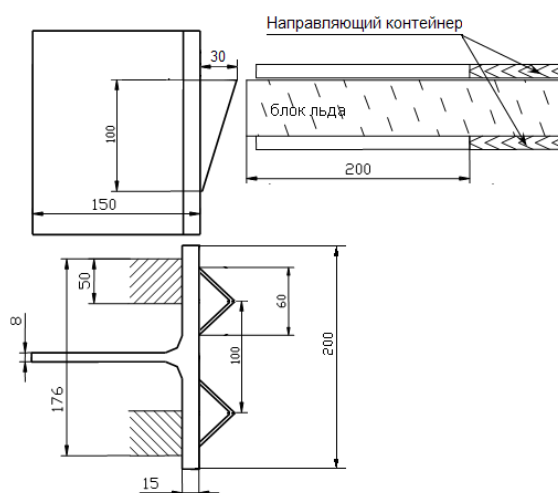
При наличии пирамидальных наделок разрушение носило хрупкий характер, сопровождалось развитием больших трещин, способствующих снижению глобальных ледовых нагрузок.



а



б



в

Рис. 4. Испытанные маломасштабные модели: а - модель № 1 (традиционная плоская форма поверхности контакта со льдом); б - модель № 2 с большой ледоразрушающей наделкой; в - модель № 3 с малой ледоразрушающей наделкой.

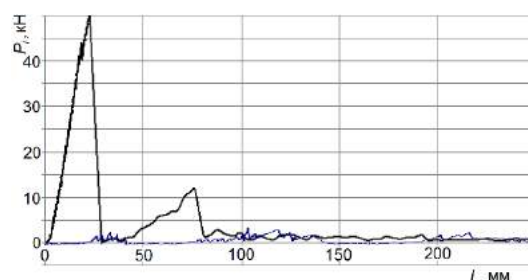


Рис. 5. Сопоставление зависимостей силового воздействия льда на моделях № 1 (черная кривая) и № 2 (синяя кривая) от перемещения штока гидроцилиндра

Таблица 1
Пиковые значения наибольших нагрузок и
результаты статистической обработки
результатов испытаний моделей

Силовые характеристики	Номер модели		
	1	2	3
Результаты опытов, P_i , кН	22,0	7,2	10,5
	51,3	7,3	4,5
	36,3	3,4	10,6
	45,8	3,3	8,7
	50,4	4,5	
	47,7	2,9	
Математическое ожидание нагрузки, кН	42,2	4,98	8,6
Дисперсия, (кН) ²	127,0	3,7	8,1
Расчетное значение нагрузки, кН	64,8	8,8	14,3
Значение коэффициента K_n в формулах (1) и (2) для расчета ледовых нагрузок	1	0,14	0,22



а



б

Рис. 6. Формирование радиальных (1),
расплаивающих (2) и кольцевых (3) трещин (фото
слева) и разрушение льда с отделением его
фрагментов (фото справа) при взаимодействии с
моделями № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица 2
Краткое описание характерных особенностей
процессов разрушения льда

№ модели	Описание характерных особенностей процесса
1	Образование больших радиальных трещин от угловых точек плоской модели (навстречу движению льда) и последующее «взрывное» разрушение средней части, контактирующей с моделью, сопровождающееся образованием системы разноориентированных трещин. В 3-х опытах с моделью № 1 наблюдался всего лишь один ярко выраженный пик нагрузки

	на модель, после чего происходило разрушение всего блока. В остальных опытах было не менее двух пиков.
2	Последовательное образование радиальных трещин у ребер пирамидальных наделок в диапазоне углов от 0° до 45° (направление 0° соответствует движению навстречу льду), сколы углов торца блока, формирование кольцевых и последующий излом изгибом средней части блока, отделение боковых и среднего фрагментов от блока и падение их вниз.
3	Образование продольных (кольцевых) трещин, скалывание льда под углом 45° к верхней и нижней плоскостям блока, дробление, формирование кольцевых трещин и изгибное разрушение льда с отделением от блока центральных и боковых фрагментов льда.

5. Рекомендации по конструированию ледового пояса стальных нефтегазодобывающих платформ, эксплуатируемых при воздействии тонкого льда

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили целесообразность выбора изображенного на рис. 1 конструктивного оформления ледового пояса платформ, эксплуатируемых при воздействии льда с умеренной толщиной, составляющей величины порядка 25% от ширины опоры (колонны) сооружения и менее. Вместе с тем результаты испытаний моделей показывают, что высокая эффективность пирамидальных наделок наблюдалась при испытании модели № 2 (при отстоянии ребра наделки на уровне верхней плоскости ледяной пластины от вертикальной стенки опоры сооружения, примерно равном толщине льда и угле наклона ребра наделки к поверхности стенки порядка 30°–31°). Однако при таком отстоянии заметно увеличиваются габариты опоры в целом, что в некоторых случаях может приводить к нежелательному увеличению материалоемкости опор. Испытания модели № 3 показали, что уменьшение отстояния ребра от поверхности опоры на уровне верхней плоскости ледяной пластины до величины порядка 60% от толщины льда не ведет к большому увеличению ледовых нагрузок на опору, если с уменьшением отстояния одновременно уменьшается угол наклона ребра наделки к поверхности опоры до величины порядка 17°. При этом уменьшение этого угла приводит к такому негативному последствию как снижение изгибных напряжений в ледяной пластине перед отделением секторов льда от ледяного блока, но одновременно дает и позитивный результат – возможность более интенсивного роста радиальных трещин вследствие увеличения внедряемого в лед объема наделки. Интегрально снижение отстояния ребра от поверхности опоры в проделанном эксперименте привело к увеличению ледовых нагрузок на 63%, что, по-видимому, не всегда допустимо в практике проектирования нефтегазодобывающих платформ.

6. Расчетные формулы для нагрузок

Для расчета максимальной (расчетной) нагрузки на отдельно стоящую опору (колонну) сооружения с вертикальной передней гранью можно на основе модификации формулы Коржавина К. Я. [11], широко используемой в российской практике проектирования шельфовых сооружений [10], получить видоизмененную формулу, учитывающую наличие ледоразрушающих призматических наделок. В соответствии с ней максимальную нагрузку, МН, от воздействия движущихся ледяных полей на отдельно стоящую опору (колонну) сооружения с вертикальной передней гранью, снабженную ледоразрушающими призматическими наделками, можно определить следующим образом

$$F_{b,p} = mk_H k_b k_V R_c b h_d, \quad (1)$$

где h_d - толщина ровного льда, м; R_c - прочность льда на сжатие, МПа; b - расчетный диаметр (расчетная ширина) опоры сооружения (по фронту на уровне действия льда), м; m - коэффициент формы опоры в плане, принимаемый равным 1 при прямоугольной форме поперечного (горизонтального) сечения опоры и 0,83 при форме поперечного сечения в виде круга и правильного многогранника; k_b - коэффициент, зависящий от соотношения расчетной ширины опоры по фронту на уровне действия льда b и толщины льда h_d ; k_V - коэффициент, зависящий от эффективной скорости деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой $\dot{\epsilon}_e$, с⁻¹; k_H - коэффициент, учитывающий влияние ледоразрушающих наделок (его значения, найденные по результатам описанного выше эксперимента, приведены в таблице 2).

Коэффициент k_b определяется как функция безразмерного параметра $\bar{b} = b/h_d$ по формуле

$$k_b = 0,0051\bar{b}^6 - 0,129\bar{b}^5 + 1,27\bar{b}^4 - 6,28\bar{b}^3 + 16,5\bar{b}^2 - 23,2\bar{b} + 17,3.$$

Эффективная скорость деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, с⁻¹, определяется по формуле

$$\dot{\epsilon}_e = V/(k_1 b).$$

Коэффициент k_1 при $15 \leq b/h_d \leq 25$ определяется по формуле

$$k_1 = 6 - 2b/h_d.$$

При $b/h_d \leq 15$ коэффициент k_1 принимается равным 4, а при $b/h_d \geq 25$ - равным 2.

Коэффициент k_V определяется по формуле

$$k_V = 0,0017(\dot{\epsilon}_e)^5 - 0,0333(\dot{\epsilon}_e)^4 + 0,292(\dot{\epsilon}_e)^3 - 1,42(\dot{\epsilon}_e)^2 + 3,46\dot{\epsilon}_e - 2,2.$$

Максимальная нагрузка, МН, от воздействия движущихся ледяных полей на секцию протяженного сооружения шириной b_s (по фронту на уровне действия льда) по формуле

$$F_{b,w} = k k_H k_V R_c b_s h_d, \quad (2)$$

где k - коэффициент, определяемый по формуле

$$k = -0,005\bar{b}^5 + 0,0875\bar{b}^4 - 0,567\bar{b}^3 + 1,66\bar{b}^2 - 2,28\bar{b} + 2,1.$$

Расчетный диаметр (расчетная ширина) b опоры сооружения (по фронту на уровне действия льда) определяется при наличии наделки с учетом размеров этой наделки, размеров (диаметра) поперечного сечения опоры и толщины льда h_d как среднее значение размеров b_1 и b_2 ($b = (b_1 + b_2)/2$) по схеме, изображенной на рис. 7.

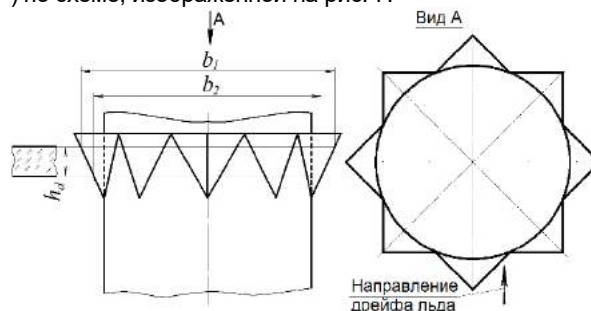


Рис. 7. Форма ледового пояса опоры при использовании наделок и схема определения размеров b_1 и b_2

Заключение

В результате выполнения работы получены следующие результаты:

1. проанализированы особенности разрушения льда у опор шельфовых сооружений и на этой основе предложены новые проектные решения по геометрической форме опор;
2. спроектированы и изготовлены три схематизированные модели ледостойкого сооружения с традиционной и новыми формами ледового пояса;
3. проведены испытания этих моделей на воздействие льда на специальном стенде с измерением усилий;
4. выполнена статистическая обработка результатов испытаний моделей, эксплуатируемой при воздействии тонкого льда и толстого льда;
5. выполнено сравнение результатов испытаний моделей с традиционной и новой формами ледового пояса;
6. установлена высокая эффективность новых геометрических форм ледового пояса для снижения ледовых нагрузок на сооружения;

7. разработаны рекомендации по конструированию ледового пояса стальных нефтегазодобывающих платформ, эксплуатируемых при воздействии льда умеренной толщины;

8. разработаны рекомендации по расчету ледовых нагрузок на сооружения, ледовый пояс которых оснащен ледоразрушающими наделками пирамидальной формы.

Благодарности

Экспериментальная часть работы выполнена в рамках контракта с компанией «Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering (DSME)» (г. Сеул, Корея), которой автор выражает благодарность за финансовую поддержку исследования.

Литература

1. Крыжевич Г.Б. Новые конструктивные решения для ледового пояса стальных морских сооружений. Труды Крыловского государственного научного центра. 2015, 86(370): С. 133-138.
2. Крыжевич Г.Б. Проектирование арктических нефтегазодобывающих платформ. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019, 1(387): С. 93-106.
3. Морские нефтегазодобывающие платформы: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016, 352 с.
4. Крыжевич Г.Б. Концептуальные решения для ледостойких плавучих буровых установок, обеспечивающие круглогодичную эксплуатацию в Арктике. Морские интеллектуальные технологии, Научный журнал № 3 (37). Т. 3. 2017. С. 41-47.
5. Крыжевич Г.Б. Проблемы проектирования и перспективы развития ледостойких полупогружных плавучих буровых установок. Арктика: экология и экономика. 2017, № 4 (28). С. 108-117.
6. Крыжевич Г.Б. Ледостойкая ППБУ для Арктики. Neftegaz.RU. 2018, №1. С. 74-78.
7. Апполонов Е.М., Демешко Г.Ф. и др. Регламентация локальных ледовых нагрузок и проектирование противоледовой защиты морских ледостойких сооружений. Морской вестник. 2016. № 2 (58). С. 9-12.
8. Лосет С., Шхинек К.Н. и др. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: Лань, 2010. 272 с.
9. International Standard ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
10. Свод правил СП 38.13330.2010 «СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Москва, 2010 г.
11. Коржавин К. Я. Воздействия льда на инженерные сооружения. Новосибирск: изд-во Сибирского отделения АН СССР, 1962. 203 с.
12. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели разрушения льда при большой площади контакта. Механика твердого тела. 2011, № 1. С. 137-153.

References

1. Kryzhevich G.B. Novye konstruktivnye resheniya dlya ledovogo poyasa stal'nykh morskikh sooruzheniy. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2015, 86(370): S. 133-138.
2. Kryzhevich G.B. Proektirovaniye arkticheskikh neftegazodobyvaushchih platform. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2019, 1(387): S. 93-106.
3. Morskie neftegazodobyvaushchie platformy, istoriya, sovremennost, perspektivy. Analiticheskii obzor. SPb, FGUP «Krylovsky gosudarstvennyi nauchnyi centr», 2016, 352 s.
4. Kryzhevich G.B. Konceptualnye resheniya dlya ledostoykikh plavuchykh burovyykh ustanovok, obespechivayutsy hye kruglogodychnuyu ekspluatatsiyu. Morskoye intellektualnye technology, Nauchnyi journal No.3 (37) T.3 2-17. s.41-47.
5. Kryzhevich G.B. Problemy proektirovaniya i perspektivy razvitiya ledostoykikh polupogruzhnykh plavuchykh burovyykh ustanovok. Arctica: ecologia i economica. 2017, No.4 (28). S. 108-117.
6. Kryzhevich G.B. Ledostoykhaya PPBU dlya Arcticy. Neftegaz.RU. 2018, No.1. S. 74-78.
7. Appolonov E.M., Demeshko G.F. i dr. Reglamentatsiya lokal'nykh ledovykh nagrusok i proektirovaniye protyvoledovoi zaschity morskyykh ledostoykikh sooruzheniy. Morskoy vestnik. 2016. No.2 (58) S. 9-12.
8. Loset S., Shkhynek K.N. i dr. Vozdeystviye l'da na morskoye i beregovyye sooruzheniya. SPb.:Lan, 2010, 272 s.
9. International Standard ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
10. Svod pravyl SP 38.13330.2010 «SNiP 2.06.04-82*. Nagruzki i vozdeystviya na hydrotechnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov)». Moskva, 2010 g.
11. Korzhavin K.Ia. Vozdeystviya l'da na ingenernyye sooruzheniya. Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo ontdeleniya AN SSSR, 1962. 203 s.
12. Goldstein R.V., Osipenko N.M. O modely razrusheniya l'da pry bolshoi plotshady kontakta. Mechanica tverdogo tela. 2011, No.1. S. 137-153..

УДК 629.563.2(211)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ШЕЛЬФОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАГРУЗОК

Геннадий Брониславович Крыжевич

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

Аннотация

При проектировании ледостойких нефтегазодобывающих платформ необходимо уделять особое внимание выбору формы и конструктивного оформления ледового пояса, способствующему снижению ледовых нагрузок. Такой выбор в значительной мере зависит от максимальных значений толщины ровного льда, воздействующего на платформу. Основная цель работы – поиск новых форм и конструктивных элементов ледового пояса, обеспечивающих снижение ледовых нагрузок и уменьшение материалоемкости шельфовых сооружений, экспериментальная оценка их эффективности, разработка способа расчета нагрузок. Для ее достижения проанализированы основные особенности разрушения льда различной толщины у морских сооружений, предпринята попытка классификации ледоразрушающих устройств, выполнены объемные экспериментальные исследования маломасштабных моделей ледового пояса при воздействиях тонкого и толстого льда. Известны эффективные инновационные решения по способам разрушения тонкого льда, предусматривающие формирование на ледовом поясе пирамидальных ледоразрушающих наделок. При их контакте со льдом в районах ребер (пересечения граней пирамид) наблюдается концентрация напряжений, приводящая к быстрому развитию в этих районах пластического течения льда (при очень малых нагрузках на сооружение), к стеснению пластического деформирования льда в зонах концентрации, к появлению радиальных, а затем и кольцевых трещин, влекущих отделение от ледового поля фрагментов льда в виде секторов. Такие решения полезны и при разрушении толстого льда, однако с ростом его толщины их эффективность снижается. В работе предложены и другие эффективные решения, включающие расслаивающие толстый лед элементы, расположенные около середины высоты ледовой пластины. Такие элементы полезно сочетать с примыкающими к ним ледоразрушающими пирамидами, способствующими формированию во льду радиальных и кольцевых трещин.

Результатами работы являются рекомендации по конструированию ледового пояса стальных нефтегазодобывающих платформ, эксплуатируемых при воздействии льда как малой, так и большой толщины, а также способ расчета ледовых нагрузок на опоры платформ с новыми ледоразрушающими наделками. Результаты работы направлены на создание рентабельных, прочных и надежных нефтегазодобывающих платформ для Арктики.

Ключевые слова: океанотехника, ледовые нагрузки, ледостойкие нефтегазодобывающие платформы, ледовый пояс платформы, опоры морских буровых установок, проектирование шельфовых сооружений, экспериментальные методы.

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF METHODS FOR MITIGATION OF ICE ACTIONS ON OFFSHORE STRUCTURES AND FOR ICE LOADS CALCULATION

Gennady B. Kryzhevich

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: G_Kryzhevich@ksrc.ru

Abstract

When designing ice-resistant oil-and-gas production platforms, special attention shall be paid to selection of ice belt shape and embodiment to promote ice loads decrease. Such selection largely depends on maximum thickness values of the level ice acting on the platform. The main goal of the work consists in searching for new ice belt shapes and structural elements that ensure ice loads reduction and decrease of offshore structures material consumption, experimental evaluation of their effectiveness and development of loads calculation method. For this purpose, main specific features of ice failure near offshore structures were analyzed for various ice thicknesses, an attempt to classify ice-breaking devices was made, 3D experimental studies of ice belt small-scale models under thick and thin ice actions were performed. Some effective innovative solutions on thin ice failure are known that consist in installation of pyramidal ice-breaking extensions on the ice belt. In the course of their contacts with the ice, in the area

of their ridges (intersection of pyramid sides) stress concentration is observed that causes quick development of ice plastic flow in these areas (at very low loads on the structure), ice plastic deformation constraint in the ice concentration areas and initiation of radial and then circumferential cracks that results in separation of ice fragments (in the shape of sectors) from the ice field. Such solutions are helpful when breaking the thick ice as well; however, with ice thickness growth their effectiveness decreases. Other effective solutions are proposed in the work that incorporate elements arranged near the middle of the ice plate height that stratify the thick ice. It is useful to combine such elements with ice-breaking pyramids adjoined to them that promote forming radial and circumferential cracks in the ice.

The work results include recommendations on designing ice belts of steel oil-and-gas production platforms operating under actions of ice of various thickness, as well as the method for calculating ice loads on legs of platforms with new ice-breaking extensions. The results of the work are aimed to creation of profitable robust and reliable oil-and-gas production platforms for the Arctic.

Key words: ocean engineering, ice loads, ice-resistant oil-and-gas production platforms, platform ice belt, legs of offshore drilling units, design of offshore structures, experimental methods.

Введение

Морские нефтегазодобывающие платформы в условиях Арктики подвергаются воздействию ледовых образований с повышенной прочностью. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании платформ, применять нетрадиционные проектные решения и способы разрушения льда [1-5]. Они необходимы, прежде всего, при выборе формы и конструктивного оформления ледового пояса [1-2], способствующем снижению ледовых нагрузок. При таком выборе будем исходить из следующих концептуальных позиций [1, 4].

1. При дрейфе льда и разрушении его у сооружения (или у его колонны) формируется канал с битым льдом. В соответствии с закономерностями механики разрушения малые энергозатраты на разрушение льда в канале достигаются при дроблении ледового поля на крупные фрагменты. Образованные при этом площади новых поверхностей (поверхностей разрушения) также малы, следовательно, невелика и пропорциональная этим площадям энергия, затрачиваемая на их появление. Наоборот, формирование мелкодисперсных фракций в процессе разрушения льда ведёт к его большой энергоёмкости, а, следовательно, и к увеличению средних значений и максимальных нагрузок на сооружение [12].

2. Уменьшение энергоёмкости разрушения льда и средних значений ледовых нагрузок не всегда сопровождается снижением максимальных нагрузок на сооружение (колонну). Например, известны случаи разрушения ровного льда у плоской прямостенной преграды с появлением больших ледовых нагрузок и формированием после разрушения ледового поля ряда больших ледяных пластины [6]. Их наибольший габаритный размер примерно равен ширине преграды (ширине канала). Для уменьшения ледовой нагрузки желательно, что бы процесс разрушения льда изгибом по всей ширине сооружения происходил не синхронно, с отделением широких пластин, а состоял из нескольких стадий последовательного отделения не широких пластин (секторов) льда от поля, сопровождающегося сугубо неравномерным распределением ледовых давлений по ширине сооружения. Если с помощью специальной технологии ломки льда и использования для ее реализации специальных устройств (наделок) удастся достичь такого эффекта, то это дает

существенное снижение нагрузок на сооружение. Из сказанного следует, что каждому конкретному виду сооружения соответствует свой рациональный способ разрушения льда и рациональный (всегда не минимальный, но иногда и не максимальный) размер фрагментов льда, отделяемых от ледового поля.

3. При уменьшении относительной (отнесённой к толщине льда h_d) ширины сооружения $\bar{b} = b/h_d$ (b - расчётная ширина сооружения или расчётный диаметр его опоры) в диапазоне от 50 до 0,3 максимальное ледовое усилие P , приходящееся на единицу площади $S = b \cdot h_d$, увеличивается более чем в 10 раз [10]. Наиболее сильный рост усилия наблюдается при снижении $\bar{b}$ от 4 до 0,3. Энергия, затрачиваемая на продвижение ледового поля на единицу длины, изменяется при уменьшении относительной ширины $\bar{b}$ подобным же образом.

Уменьшение относительной ширины сооружения $\bar{b}$ сопровождается не только ростом ледовых давлений, но и изменением механизма разрушения льда. При малой толщине льда (0,5 м и менее) наблюдается разрушение льда изгибом, начинающееся с образования радиальных и кольцевых трещин у сооружения (или его опоры) и заканчивающееся отделением от ледового поля относительно крупных фрагментов в виде секторов. При большой толщине льда и малых значениях $\bar{b}$ наблюдается появление расслаивающих трещин в ледовой пластине и последующее дробление льда с появлением мелкодисперсных фракций.

4. Для уменьшения энергозатрат на разрушение льда и снижения ледовых нагрузок необходимо стремиться к интенсификации процессов формирования больших магистральных трещин, способствующих образованию продуктов разрушения в виде крупных фрагментов льда. Это может быть осуществлено благодаря наличию специальных элементов, создающих концентрацию напряжений в ледовой пластине. При относительно малой толщине льда необходимо принимать меры по ускоренному образованию радиальных и кольцевых трещин. При большой толщине льда и малых значениях параметра $\bar{b}$ (особенно при $\bar{b}$, сопоставимом с единицей) полезно также с помощью специальных

элементов ледового пояса содействовать появлению расслаивающих трещин.

1. Классификационные признаки ледоразрушающих устройств

Если исключить из рассмотрения мелкодисперсное разрушение льда, сопряженное с появлением весьма интенсивных ледовых нагрузок, то к ведущим процессам, приводящим к делению ледовых образований на относительно большие фрагменты и, соответственно, к уменьшению силовых воздействий на шельфовые сооружения, можно отнести:

- процесс образования у сооружения (или его колонны) радиальных трещин, который можно назвать резанием (прорезанием) льда (по аналогии с процессом резания стекла стеклорезом); соответствующие свойства устройства (наделки), способствующие образованию радиальных трещин условно назовём ледорезными;

- процесс формирования кольцевых трещин, происходящий обычно в условиях интенсивного изгиба или сдвига (скола) льда на некотором удалении от сооружения (составляющим обычно несколько толщин ледяной пластины); свойства устройства, способствующие изгибу и сколу ледовой пластины, а также образованию кольцевых трещин назовём изломными;

- процесс расслаивания льда (образование горизонтальных трещин); соответствующие свойства устройства назовём расслаивающими.

С учётом этих терминов, которые пригодны для использования в качестве классификационных признаков, можно соответственно рассматривать следующие типы устройств (наделок): ледорезные, изломные, расслаивающие и комбинированные. Поясним эти понятия с помощью рис.1. На рис.1а изображены конические и пирамидальные формы ледовых поясов, вызывающие главным образом изгиб изломом. Вместе с тем при таких формах может происходить также формирование радиальных трещин, а при малом угле конусности и большой толщине льда и его расслаивание. Однако при обычно используемых углах наклона поверхностей ледового пояса эти формы можно отнести к изломному типу, принимая во внимание ведущий признак.

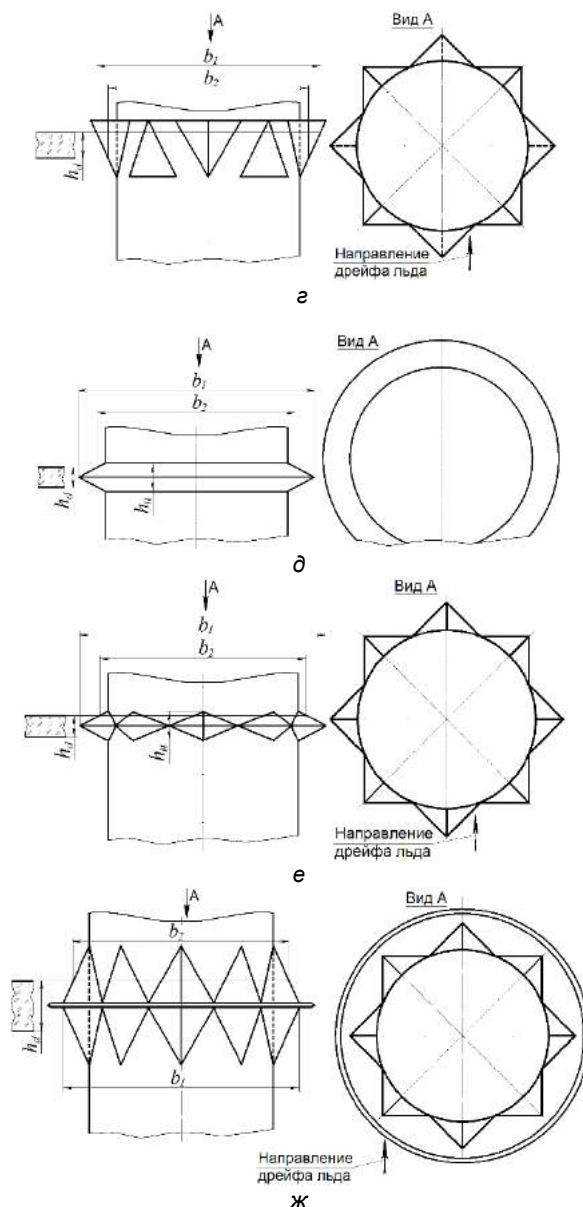
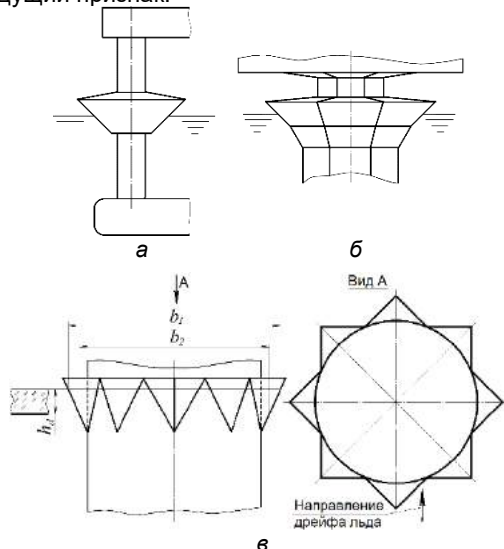


Рис. 1. Формы ледовых поясов опор с наделками и схемы определения размеров b_1 и b_2

Большим недостатком конических и пирамидальных форм ледовых поясов (рис. 1а и 1б) является существенное увеличение поперечных габаритов опорных колонн морских сооружений. Вместе с тем их эффективность при сравнительно небольших габаритах пояса невелика. Так, например, при малых углах наклона образующих конических и пирамидальных поверхностей к вертикали (18° и менее) ледовые воздействия практически не уменьшаются; при умеренных углах наклона (порядка 30°) относительное снижение расчетных ледовых нагрузок на колонну не превысит 10%. Поэтому чрезвычайно актуален поиск таких решений, которые при умеренном увеличении габаритов колонн, способны привести к многократному снижению нагрузок. К таким решениям приводит применение пирамидальных форм наделок [4], изображенных на рис. 1в. При контакте пирамидальных наделок со льдом в районах их

ребер (пересечения граней пирамид) наблюдается концентрация напряжений, приводящая к быстрому развитию в этих районах пластического течения льда (при очень малых нагрузках на сооружение), к стеснению пластического деформирования льда в зонах концентрации и к появлению трещин. При этом формируются преимущественно радиальные и кольцевые трещины, способствующие резанию льда и его излому. Это комбинированный ледорезно-изломный тип ледоразрушающего устройства.

Если изменить порядок установки таких наделок и чередовать пирамиды с разной ориентацией (как показано на рис. 1а), то тем самым можно усилить ледорезные свойства и уменьшить изломные. В этом случае в процессе разрушения льда в происходят интенсивные сколы льда (увеличивается роль касательных напряжений) и происходит деление ледовой пластины на более мелкие фрагменты.

На рис.1д изображен ледовый пояс с двумя коническими поверхностями. Если место их пересечения воздействует на ледяную пластину вблизи ее срединной плоскости, то происходит интенсивное расслаивание льда. При относительно больших углах между образующими конических поверхностей (приближающихся к прямым) расслоенные части пластины (верхняя и нижняя) могут испытывать изгиб, приводящий к излому этих частей. По ведущему признаку такой тип ледового пояса можно назвать расслаивающим.

Представленные на рис. 1е ледоразрушающие зубья в форме пирамиды с основанием, вытянутым в горизонтальном направлении, способствуют расслаиванию ледового образования. Вместе с тем у граней пирамид создаются условия для формирования радиальных трещин. Наделку с такими зубьями можно назвать расслаивающей. Пирамиды с основаниями, вытянутыми в вертикальном направлении, придают ледовому поясу сильно выраженные ледорезные свойства. Вместе с тем оба вида пирамид (как с горизонтальной, так и с вертикальной ориентацией большей диагонали основания) способствуют излому изгибом разделённых расслаивающей трещины верхней и нижней частей ледяной пластины. Поэтому эти наделки следует отнести к комбинированному типу. К этому же типу можно отнести и наделку, изображённую на рис. 1ж. В ней горизонтальная панель расслаивает ледовое образование, а элементы пирамидальной формы формируют радиальные трещины (разрезают) верхнюю и нижнюю части пластины, образовавшиеся после расслаивания, и изламывают их изгибом.

2. Испытанные модели

Ниже описаны результаты экспериментальной оценки эффективности новых геометрических форм и конструкций наделок, устанавливаемых на ледовый пояс прямоотенной (цилиндрической или призматической), конической либо пирамидальной формы. Такие инновационные решения необходимы для более радикального снижения ледовых нагрузок по сравнению с традиционными (рис. 1а и 1б). Представление об обследованных

новых формах ледового пояса дают рис. 2-6, на которых приведены эскизы и фотографии испытанных на воздействие льда маломасштабных моделей. На верхних частях этих рисунков дан вид моделей сбоку, на фрагментах рисунков, расположенные внизу, слева – вид моделей сверху). Фотографии ледоразрушающих наделок расположены внизу, справа.

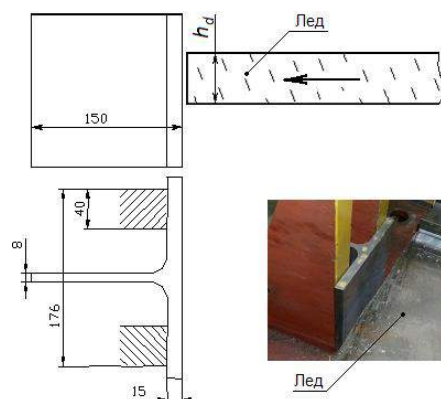


Рис. 2. Модель плоской преграды

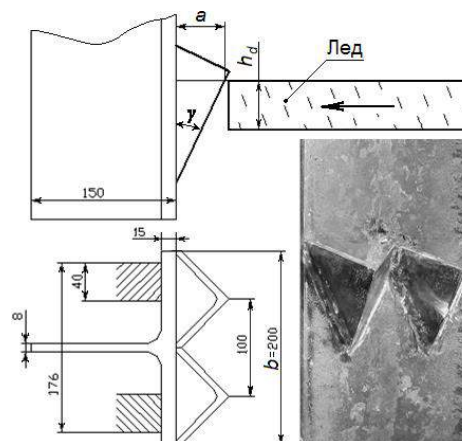


Рис. 3. Угловые формы пирамидальных ледоразрушающих наделок

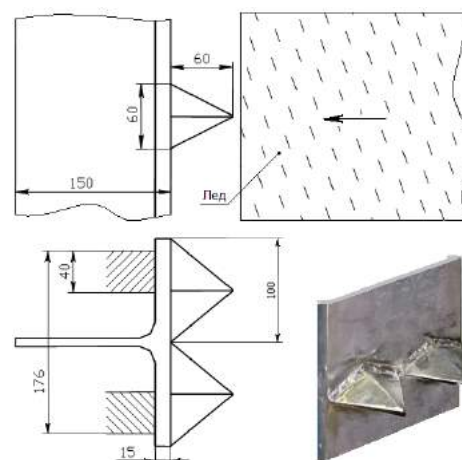


Рис. 4. Ледоразрушающая наделка в виде зубьев пирамидальной формы

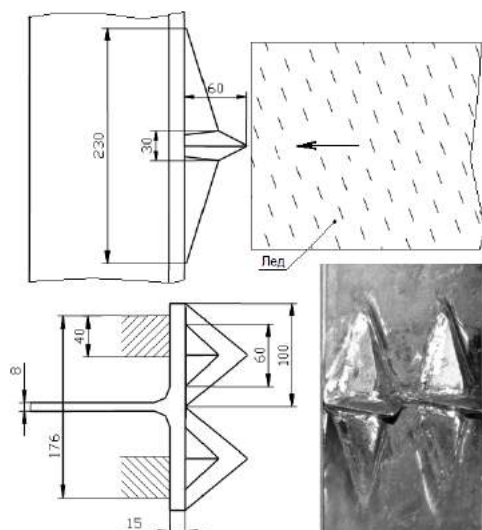


Рис. 5. Ледоразрушающая наделка в виде звезды, образованной тремя пересекающимися пирамидами

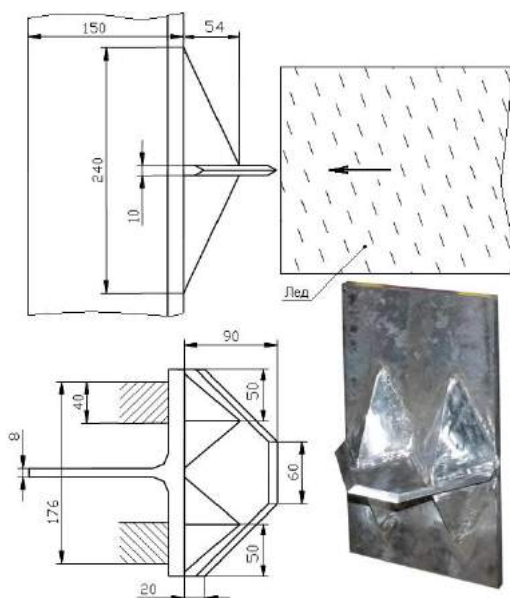


Рис. 6. Ледоразрушающая наделка в виде двух рядов пирамид, разделенных между собой расслаивающей панелью (пластиной)

Эти модели подвергались воздействию относительно тонкого льда толщиной около 50 мм и толстого льда (толщина около 190 мм). Испытания выполнялись на специальном стенде, на котором неподвижно закреплялись модели. На них надвигались блоки (пластины) льда с помощью гидроцилиндров. Методика проведения испытаний, особенности испытательное оборудование и использованные средства измерения усилий взаимодействия моделей со льдом описаны в работе [4].

Модель плоской преграды, изображенная на рис. 2, была самой простой и результаты ее испытаний на воздействие льда служили базой для сравнения эффективности новых (более сложных) конструктивных решений по ледовому поясу морских сооружений.

На рис. 3 изображены пирамидальные ледоразрушающие наделки угловой формы.

Были изготовлены и испытаны 2 модели с такими наделками. Обе модели имели грани пирамид, пересекающиеся между собой под прямым углом, а сами наделки были выполнены из стального уголкового профиля. Модели имели одинаковую топологию и отличались только размерами наделок. В первой модели (с крупными наделками) точка наделки, вступающая первой в контакт с блоком льда, отстояла от основной плоскости модели на 49 мм, а во второй модели (с мелкими наделками) – на 30 мм. Угол наклона ребра наделки к основной плоскости составлял в первой модели $30,7^\circ$, а во второй – $16,7^\circ$. Первая модель испытана при воздействии на нее как тонкого, так и толстого льда, вторая – только при воздействии тонкого льда.

Модели, изображенные на рис. 4-6, обеспечивали интенсивное расслаивание льда на начальных стадиях его разрушения и подвергались в процессе эксперимента воздействию на них толстого льда.

По своим конструктивным элементам и способу разрушения льда модель с зубьями пирамидальной формы (рис.4) соответствует конструктивному оформлению ледового пояса, приведенному на рис. 1е, модель с наделками в виде двух рядов пирамид, разделенных между собой расслаивающей панелью, (рис.4) соответствует ледовому поясу, изображенному на рис. 1ж.

3. Результаты экспериментальных исследований

Каждая из трех моделей подвергалась на стенде ледовым воздействиям с использованием однородных блоков льда с температурой $-3^\circ\text{C} \div -5^\circ\text{C}$. Габаритные размеры блоков тонкого льда – $1000 \times 500 \times 50$ мм и толстого льда – $1000 \times 500 \times 190$ мм. Ширина моделей в 4 раза превышала толщину тонкого льда и была примерно равна толщине толстого льда. Скорость надвигания (дрейфа) льда в моменты достижения пиковых значений нагрузок составляла от 0,12 до 0,55 мм/с. Опыты по разрушению этих блоков сопровождалась цифровой записью процессов изменения перемещений штока гидроцилиндра и развиваемого им толкающего усилия. Записи процессов производилась в таком промежутке времени, в течение которого перемещения составляли не менее 250 мм (рис. 7 и 8). На этом промежутке наблюдалось, как правило, не менее двух пиков нагрузки на штоке. Исключение составляли лишь 3 опыта с моделью плоской преграды, в которых наблюдался всего лишь один ярко выраженных пик, после чего происходило разрушение всего блока. В процессе испытаний замерялись процессы изменения усилий воздействия льда на модели. Каждая из моделей нагружалась льдом определенной толщины многократно (от 4 до 7 раз). Наибольшие пиковые горизонтальной нагрузки в каждой из таких серий опытов рассматривались как случайные величины.

Благодаря статистической обработке восьми выборок опытных данных, соответствующих каждой из испытанных при определенной толщине льда моделей, вычислены значения математических ожиданий максимальных пиков и

их дисперсии (табл. 1). На основе методических подходов, использованных при создании международного стандарта [9], расчетную нагрузку на нефтегазодобывающие сооружения можно оценить путем прибавления к математическому ожиданию удвоенного значения стандарта максимальных пиковых значений, полученных в эксперименте. Такие расчетные нагрузки для различных моделей и толщин льда приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты статистической обработки результатов испытаний моделей

Вид модели	Толщина льда, см	Математическое ожидание, кН	Дисперсия, (кН) ²	Расчетное значение нагрузки, кН	Значение коэффициента K_n в расчетных формулах
Модель плоской преграды	5	42,2	127	64,8	1
	19	87,9	817	145,1	1
Модель с крупными угловатыми пирамидальными наделками	5	4,98	3,7	8,8	0,14
	19	19,0	37,8	31,3	0,22
Модель с мелкими угловатыми пирамидальными наделками	5	8,6	8,1	14,3	0,22
Модель с наделками в виде зубьев пирамидальной формы	19	44,5	640	95,1	0,66
Модель с наделками в виде звезды	19	45,4	817	102,5	0,71
Модель с наделками в виде двух рядов пирамид, разделенных между собой панелью	19	14,4	30,8	25,5	0,19

Найденные таким образом расчетные нагрузки существенно превышают наибольшие пиковые значения нагрузок, замеренные в эксперименте. Наибольшее снижение горизонтальной составляющей расчетных нагрузок, вызванных воздействием тонкого льда, достигается при использовании угловатых пирамидальных наделок. Крупные наделки обеспечивают снижение нагрузок на 86% (по сравнению с плоской прямостенной преградой), а мелкие - на 78%. Самыми эффективными при разрушении толстого льда являются наделки в виде двух рядов пирамид, разделенных между собой панелью. Снижение нагрузок составляет в этом случае 81%. Вместе с тем применение крупных угловатых пирамидальных наделок также весьма эффективно, поскольку обусловленное ими снижение ледовых воздействий составляет 78%.

Практически значимое (хотя и не столь существенное, как отмеченное выше) снижение

ледовых нагрузок наблюдается и при использовании наделок в виде зубьев пирамидальной формы или звезд. Здесь важно подчеркнуть, что увеличение относительных размеров таких наделок (по отношению к толщине льда) способно повысить эффективность их применения. Эта гипотеза подтверждается сравнением результатов испытаний моделей с мелкими и крупными угловатыми пирамидальными наделками (табл. 1).

Вместе с тем результаты испытаний моделей говорят о высокой эффективности мелких угловатых пирамидальных наделок. При их использовании малы поперечные габариты ледового пояса опоры, что положительно сказывается на материалоемкости опор и на других характеристиках сооружения. Испытания моделей показали, что уменьшение отстояния ребер пирамид от поверхности опоры на уровне верхней плоскости ледяной пластины до величины порядка 60% от толщины льда не ведет к большому увеличению ледовых нагрузок на опору, если с уменьшением отстояния одновременно уменьшается угол наклона ребра наделки к поверхности опоры до величины порядка 17°. При этом уменьшение этого угла препятствует изгибу ледяной пластины и затрудняет отделение секторов льда от ледяного блока, но одновременно дает и позитивный результат – возможность более интенсивного роста радиальных трещин вследствие увеличения внедряемого в лед объема наделки. Интегрально снижение отстояния ребра от поверхности опоры в проделанном эксперименте привело к увеличению ледовых нагрузок на 63% (по сравнению с использованием крупных наделок), что, по-видимому, не всегда допустимо в практике проектирования нефтегазодобывающих платформ.

Приведенные экспериментальные результаты говорят о высокой эффективности предлагаемых новых проектных решений для ледового пояса и о многократном снижении ледовых нагрузок при их использовании (рис. 7 и 8).

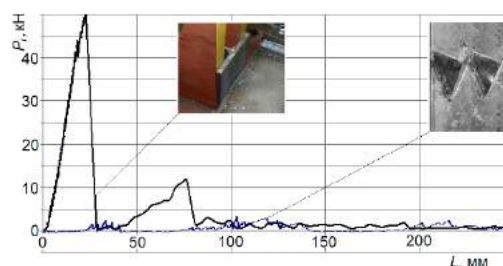


Рис. 7. Сопоставление зависимостей силового воздействия тонкого льда на модель плоской преграды (черная кривая) и на модель с угловатой формой крупных призматических наделок (синяя кривая) от перемещения штока гидроцилиндра

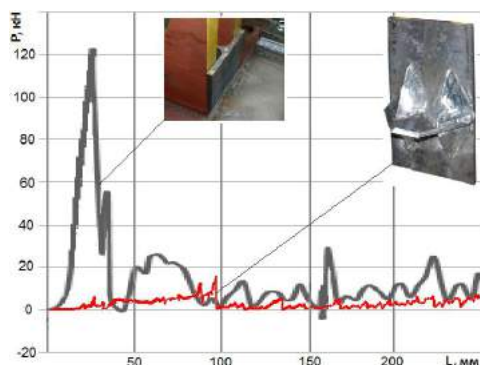


Рис. 8. Сопоставление зависимостей силового воздействия толстого льда на модель плоской преграды (черная кривая) и на модель с наделкой в виде двух рядов пирамид, разделенных между собой расслаивающей панелью (красная кривая) от перемещения штока гидроцилиндра

4. Расчетные формулы для нагрузок

Для расчета максимальной (расчетной) нагрузки на отдельно стоящую опору (колонну) сооружения с вертикальной передней гранью можно на основе модификации формулы Коржавина К. Я. [11], широко используемой в российской практике проектирования шельфовых сооружений [10], получить видоизмененную формулу, учитывающую наличие ледоразрушающих призматических наделок. В соответствии с ней максимальную нагрузку, МН, от воздействия движущихся ледяных полей на отдельно стоящую опору (колонну) сооружения с вертикальной передней гранью, снабженную ледоразрушающими призматическими наделками, можно определить следующим образом

$$F_{b,p} = mk_H k_b k_V R_c b h_d, \quad (1)$$

где h_d - толщина ровного льда, м; R_c - прочность льда на сжатие, МПа; b - расчетный диаметр (расчетная ширина) опоры сооружения (по фронту на уровне действия льда), м; m - коэффициент формы опоры в плане, принимаемый равным 1 при прямоугольной форме поперечного (горизонтального) сечения опоры и 0,83 при форме поперечного сечения в виде круга и правильного многогранника; k_b - коэффициент, зависящий от соотношения расчетной ширины опоры по фронту на уровне действия льда b и толщины льда h_d ; k_V - коэффициент, зависящий от эффективной скорости деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой $\dot{\epsilon}_e$, с⁻¹; k_H - коэффициент, учитывающий влияние ледоразрушающих наделок (его значения, найденные по результатам описанного выше эксперимента, приведены в таблице 1).

Коэффициент k_b определяется как функция безразмерного параметра $\bar{b} = b/h_d$ по формуле

$$k_b = \begin{cases} 5,5 & \text{при } \bar{b} \leq 0,33; \\ 3,4 \cdot \bar{b}^{-0,43} & \text{при } 0,33 < \bar{b} \leq 8; \\ 156 - 0,0212\bar{b} & \text{при } 8 < \bar{b} < 50; \\ 0,5 & \text{при } \bar{b} \geq 50. \end{cases}$$

Эффективная скорость деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, с⁻¹, определяется по формуле

$$\dot{\epsilon}_e = V/(k_1 b).$$

Коэффициент k_1 при $15 \leq b/h_d \leq 25$ определяется по формуле

$$k_1 = 7 - 0,2b/h_d.$$

При $b/h_d \leq 15$ коэффициент k_1 принимается равным 4, а при $b/h_d \geq 25$ - равным 2.

Коэффициент k_V определяется по формуле

$$k_V = \begin{cases} 0,1 & \text{при } \dot{\epsilon}_e \leq 10^{-7}; \\ 0,3 \lg \dot{\epsilon}_e + 2,2 & \text{при } 10^{-7} < \dot{\epsilon}_e \leq 10^{-4}; \\ 1,0 & \text{при } 10^{-4} < \dot{\epsilon}_e \leq 5 \cdot 10^{-4}; \\ -0,538 \lg \dot{\epsilon}_e - 0,776 & \text{при } 5 \cdot 10^{-4} < \dot{\epsilon}_e < 10^{-2}; \\ 0,3 & \text{при } \dot{\epsilon}_e \geq 10^{-2}. \end{cases}$$

Максимальная нагрузка, МН, от воздействия движущихся ледяных полей на секцию протяженного сооружения шириной b_s (по фронту на уровне действия льда) по формуле

$$F_{b,w} = k k_H k_V R_c b_s h_d, \quad (2)$$

где k - коэффициент, определяемый по формуле

$$k = 0,001\bar{b}^2 - 0,0467\bar{b} + 0,968.$$

Расчетный диаметр (расчетная ширина) b опоры сооружения (по фронту на уровне действия льда) определяется при наличии наделок с учетом их размеров (диаметров) поперечного сечения опоры и толщины льда h_d как среднее значение размеров b_1 и b_2 ($b = (b_1 + b_2)/2$), определяемых в соответствии с рис. 1.

Заключение

В результате выполнения работы получены следующие результаты:

1. проанализированы особенности разрушения льда у опор шельфовых сооружений и на этой основе предложены новые проектные решения по геометрической форме ледовых поясов опор морских сооружений;

2. спроектированы и изготовлены шесть схематизированных моделей ледостойкого сооружения с традиционной и новыми формами ледового пояса;

3. проведены испытания этих моделей на воздействие как тонкого, так и толстого льда на специальном стенде с измерением горизонтальных составляющих ледовых нагрузок;

4. выполнена статистическая обработка результатов испытаний моделей, эксплуатируемых при воздействии тонкого льда и толстого льда;

5. выполнено сравнение результатов испытаний моделей с традиционной и новой формами ледового пояса;

6. установлена высокая эффективность новых геометрических форм ледового пояса для снижения ледовых нагрузок на сооружения;

7. разработан дифференцированный подход к выбору форм ледоразрушающих устройств, располагаемых на ледовых поясах стальных нефтегазодобывающих платформ, в зависимости от толщины льда;

8. разработаны рекомендации по расчету ледовых нагрузок на сооружения, ледовый пояс которых оснащен ледоразрушающими наделками различной формы.

Литература

1. Крыжевич Г.Б. Новые конструктивные решения для ледового пояса стальных морских сооружений. Труды Крыловского государственного научного центра. 2015, 86(370): С. 133-138.
2. Крыжевич Г.Б. Проектирование арктических нефтегазодобывающих платформ. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019, 1(387): С. 93-106.
3. Морские нефтегазодобывающие платформы: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. СПб.: ФГУП "Крыловский государственный научный центр", 2016, 352 с.
4. Крыжевич Г.Б. Эффективность мер по снижению нагрузок на шельфовые сооружения ото льда умеренной толщины. Морские интеллектуальные технологии, Научный журнал № 2 (44). Т. 1. 2019. С. 14-20.
5. Крыжевич Г.Б. Проблемы проектирования и перспективы развития ледостойких полупогружных плавучих буровых установок. Арктика: экология и экономика. 2017, № 4 (28). С. 108-117.
6. Крыжевич Г.Б., Карулина М.М., Карулин Е.Б. Экспериментальное исследование ледовых воздействий на податливую модель морского сооружения в ледовом бассейне. Труды Крыловского государственного научного центра. 2015, вып. 86 (370). С. 139-150.
7. Апполонов Е.М., Демешко Г.Ф. и др. Регламентация локальных ледовых нагрузок и проектирование противоледовой защиты морских ледостойких сооружений. Морской вестник. 2016. № 2 (58). С. 9–12.
8. Лосет С., Шхинец К.Н. и др. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: Лань, 2010. 272 с.
9. International Standard ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
10. Свод правил СП 38.13330.2010 «СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Москва, 2010 г.
11. Коржавин К. Я. Воздействия льда на инженерные сооружения. Новосибирск: изд-во Сибирского отделения АН СССР, 1962. 203 с.
12. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели разрушения льда при большой площади контакта. Механика твердого тела. 2011, № 1. С. 137-153.

References

1. Kryzhevich G.B. Novye konstruktivnye resheniya dlya ledovogo poyasa stal'nykh morskikh soorugeniye. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2015, 86(370): S. 133-138.
2. Kryzhevich G.B. Proektirovaniye arkticheskikh neftegazodobyvaushchikh platform. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2019, 1(387): S. 93-106.
3. Morskie neftegazodobyvaushchie platformy, istoriya, sovremennost, perspektivy. Analiticheskii obzor. SPb, FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyi nauchnyi centr», 2016, 352 s.
4. Kryzhevich G.B. Effektivnost' mer po snizheniyu nagruzok na shel'fovyeh soorugeniya oto l'da umerennoy tolstiny. Efektivnost' mer po snizheniyu nagruzok na shel'fovyeh soorugeniya oto l'da umerennoy tolstiny. Morskiye intelektualnye technologyi, Nauchnyi journal No.2 (44) T.1. 2019. S. 14-20.
5. Kryzhevich G.B. Problemy proektyrovaniya i perspektivy razvitya ledostoykikh polupogrujnykh plavuchykh burovyyh ustanovok. Arctica: ecologia i economica. 2017, No.4 (28). S. 108-117.
6. Kryzhevich G.B. Ledostoykhaya PPBU dlya Arcticy. Neftegaz.RU. 2018, No.1. S. 74-78.
7. Appolonov E.M., Demeshko G.F. i dr. Reglamentatsiya lokal'nykh ledovykh nagrusok i proektirovaniye protyvoledovoi zaschyty morskyyh ledostoykikh soorugeniye. Morskoy vestnik. 2016. No.2 (58) S. 9-12.
8. Loset S., Shkhynek K.N. i dr. Vozdeystviye l'da na morskoye i beregovoye soorugeniya. SPb.:Lan, 2010, 272 s.
9. International Standard ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
10. Svod pravyl SP 38.13330.2010 «SNiP 2.06.04-82*. Nagruzky i vozdeystviya na hydrotechnicheskiye soorugeniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov)». Moskva, 2010 g.
11. Korzhavin K.Ia. Vozdeystviya l'da na ingenernyeh soorugeniya. Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo ontdeleniya AN SSSR, 1962. 203 s.
12. Goldstein R.V., Osipenko N.M. O modely razrusheniya l'da pry bolshoi plotshady kontakta. Mechanica tverdogo tela. 2011, No.1. S. 137-153.

УДК 378:147+004.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ ПЛАВАЮЩЕЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ СРЕДСТВАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

Борис Петрович Ионов

доктор технических наук, заместитель главного инженера ПАО ЦКБ "Айсберг"
Санкт-Петербург, Васильевский Остров, Большой пр. д.36

E-mail: main@iceberg.sp.ru.

Милена Львовна Мухина

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной графики
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, ул. Минина, 24

E-mail: milena.an@bk.ru

Михаил Юрьевич Сандаков

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, ул. Минина, 24

E-mail: m_sandakov@mail.ru

Ирина Юрьевна Скобелева

старший преподаватель кафедры инженерной графики
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, ул. Минина, 24

E-mail: Skobeleva_Irina@mail.ru

Аннотация

Гусеничная многозвенная машина-амфибия способна работать в любых климатических условиях, обеспечивая возможность доступа практически в любой местности для выполнения транспортных, поисково-спасательных, десантных и других операций. При движении по водной поверхности транспортное средство должно обладать мореходными качествами. Для обоснования, расчётов и оценки мореходности была создана средствами компьютерной графики с использованием программного пакета AutoCAD геометрическая модель. Создана схема теоретического чертежа в трех проекциях машины, представленного проекта. Используя теоретический чертеж, были проведены исследования и определены параметры, характеризующие плавучесть и начальную остойчивость амфибии. Графическими методами было решено уравнение равенства моментов сил тяжести и плавучести во время переходных режимов движения плавающей машины. Используя методы компьютерной графики, были проведены исследования геометрии изменения пространственного положения сложного составного объекта. Определены линии заливания плавающей машины при выходе из воды на берег и при сходе на воду.

Ключевые слова: плавающая гусеничная машина, геометрическое тело, компьютерная графика, теоретический чертёж, моменты плавучести, мореходные качества составной гусеничной машины.

A STUDY OF THE SEAWORTHINESS OF FLOATING CATERPILLAR MACHINE BY MEANS OF COMPUTER GRAPHICS

.Boris P.Ionov

Doctor of technical sciences, deputy chief engineer of PJSC Central Design Bureau "Iceberg"
St. Petersburg, Vasilievsky Island, Bolshoy pr. 36

E-mail: main@iceberg.sp.ru.

Milena L.Mukhina

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Graphics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseev

Nizhny Novgorod, Minin, 24

E-mail: milena.an@bk.ru.

Mihail Yr.Sandakov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Graphics
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseev

Nizhny Novgorod, Minin, 24

E-mail: m_sandakov@mail.ru

Irina Yr.Skobeleva

Assistant professor of the Department of Engineering Graphics
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseev,

Nizhny Novgorod, Minin, 24

E-mail: Skobeleva_Irina@mail.ru

Abstract

The caterpillar multi-link amphibious vehicle is capable of operating in all climatic conditions, providing access in almost any area for transport, search and rescue, amphibious and other operations. When travelling on the water surface, the vehicle shall have seaworthiness qualities. To justify, calculate, and evaluate seaworthiness, computer graphics tools were created using a software package AutoCAD geometric model. A diagram of the theoretical drawing in three projections of the machine represented by the project wears created. Using a theoretical drawing, studies were carried out and parameters characterizing the buoyancy and initial stability of the amphibian were determined. By graphical methods, the equation of equality of moments of gravity and buoyancy during transient modes of movement of the floating machine been solved. Using computer graphics techniques, the geometry of changing the spatial position of a complex composite object wears investigated.

Keywords: floating caterpillar machine, geometric body, computer graphics, theoretical drawing, moments of buoyancy, and seaworthiness of composite caterpillar machine.

Плавающая гусеничная машина предназначена выполнять транспортные операции в условиях бездорожья, преодолевая водные преграды, двигаясь по заболоченной и пересеченной

местности. Обладание такими возможностями делает достаточно универсальным. Общий вид двухзвенного гусеничного транспортного средства представлен на Рис. 1.

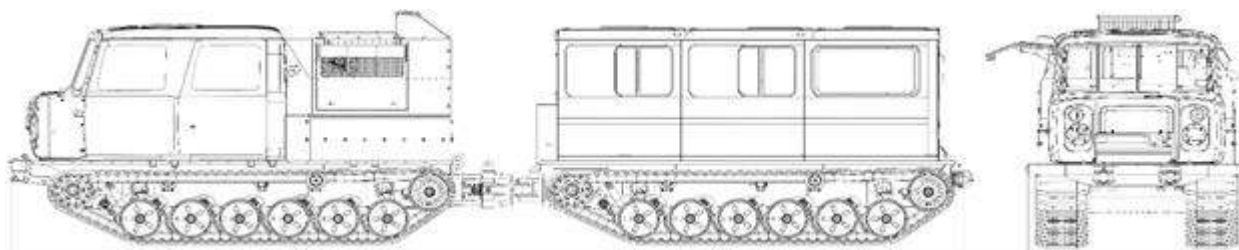


Рис. 1. Общий вид транспортного средства

Следовательно, предлагаемое транспортное средство, совершая уверенное движение по водной поверхности, должно обладать мореходными качествами [1, с.7]: плавучестью, остойчивостью, непотопляемостью, плавностью качки, ходкостью, поворотливостью и устойчивостью на курсе.

Для проведения аналитического исследования мореходных качеств необходимо геометрически описать внешние формы машины, построить теоретический чертеж для каждого звена. Для создания теоретического чертежа геометрического тела амфибии и для исследования посадки гусеничной машины в плавающем режиме геометрическими методами авторами статьи был использован программный пакет AutoCAD, позволяющий не только создать точные трехмерные твердотельные модели сложных геометрических форм, но и проанализировать их массовые характеристики, в том числе объем, площадь, момент инерции, центр тяжести [3, с.24]. Также имеется возможность результаты вычислений сохранить в текстовом файле. На основе чертежа общего вида была создана трехмерная твердотельная модель без учета выступающих элементов и узлов конструкции, не участвующих в объёмном водоизмещении транспортного средства (Рис. 2).

На (Рис. 3) представлен теоретический чертёж только первого звена транспортного средства. Используя созданный теоретический чертеж и твердотельную графическую модель, определяются гидростатические характеристики плавающей машины необходимые для анализа её мореходных качеств.

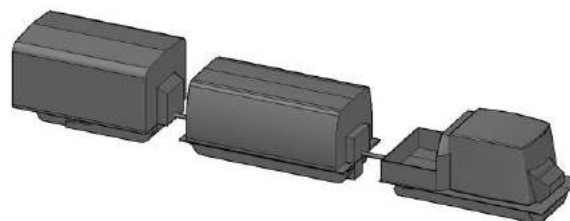


Рис. 2. Трехмерная твердотельная модель гусеничной машины

Подробная методика построения теоретического чертежа для каждого звена транспортного средства представлена в [2].

В аналитическом исследовании поведения амфибии при входе в воду с твёрдой поверхности и переходе в плавающее состояние, а также при выходе на берег из воды необходимо назначить исходные данные и выбрать систему координат, связанную с корпусом каждого звена транспортного средства. Для этого выбиралась точка начала координат, расположенная в плоскости днища на продольной оси симметрии, лежащая на середине длины корпуса звена гусеничной машины. Были определены следующие исходные данные: масса звена гусеничной машины, координаты центра масс транспортного средства, угол наклона береговой поверхности к горизонту, скорость движения машины.

При движении по наклонному берегу перпендикулярно урезу воды транспортное средство движется с минимальной скоростью (1м/с), поэтому решение задачи велось в положении статики.

При входе в воду на транспортное средство действуют две основные силы. Сила тяжести машины, приложенная к центру масс и сила плавучести, приложенная к центру сил поддержания расположенному в центре «затопленного объема» амфибии. Эти силы приложены к разным точкам, следовательно, возникают два момента: момент силы тяжести и момент силы плавучести.

$$Ga = Pb \quad (1).$$

При выполнении условия равенства двух моментов начинается всплытие передней части транспортного средства и переход его в плавающее положение (Рис. 4). Определение величины «затопленного объема» и координат его центра проводилось с использованием твердотельной геометрической модели погруженной части машины. На (Рис. 5) показана модель погруженного объема второго звена при входе в воду под углом 25°.

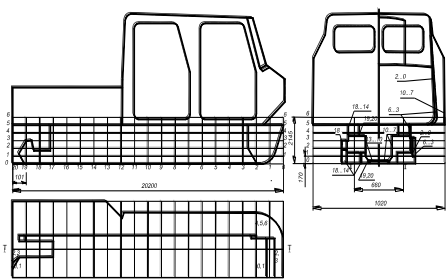


Рис. 3. Теоретический чертеж первого звена транспортного средства

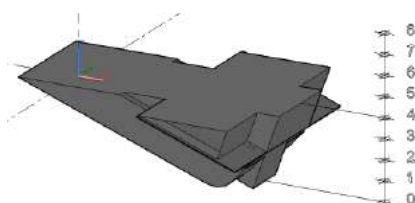


Рис. 5. Трехмерная твердотельная модель погруженного объема второго звена при входе в воду под углом 25°

Для решения задачи по анализу мореходных качеств машины представленного проекта, используя теоретические чертежи каждого из звеньев вездехода, были построена серия гидростатических кривых $V = f(T)$, $x_c = f(T)$, по которым, была исследована плавучесть объекта на ровный киль, (продольная ось транспортного средства расположена параллельно плоскости воды).

Анализируя полученные графические зависимости $V = f(T)$, и $x_c = f(T)$, и учитывая значение известной координаты положения вдоль оси x центра масс (тяжести) транспортного средства, можно уверенно сказать о положении машины на плаву. Анализ взаимного

расположения абсцисс центра масс и центра плавучести (x_c , x_g) показал, что каждое звено находится на плаву с углом дифферента в нос не более 4°.

Транспортное средство представленного проекта (Рис. 6) обладает положительной плавучестью и имеет действующую ватерлинию порожнем и в нагруженном состоянии (для удобства восприятия информации линию уровня воды будем рассматривать относительно плоскости крыла, установленного на каждом звене машины).

В ходе изучения поведения плавающей гусеничной машины при выходе на берег из воды и входе в воду, для решения уравнения равенства моментов сил тяжести и плавучести определено положение ватерлинии всплытия для каждого звена машины. Используя построенные теоретический чертёж и геометрическую твердотельную модель поверхности гусеничной машины, созданных в программном пакете AutoCAD, были определены величины «затопленных объемов» и координаты центров сил плавучести при наклонённом положении машины для серии ватерлиний.

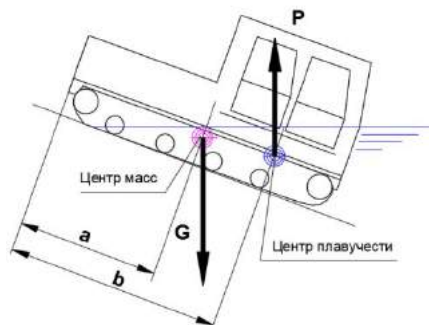


Рис. 4. Схема действия моментов и сил при входе в воду первого звена транспортного средства



Рис. 6. Погруженность первого звена машины на ровный киль

Графическое решение уравнения моментов (1), момента плавучести $M_V = f(T)$ и момента силы тяжести $M_G = f(T)$, позволило определить значение ватерлинии всплытия носовой или кормовой частей каждого звена транспортного средства с полной нагрузкой (масса груза + экипаж) и порожнем (Рис. 7, Рис. 8).

Определив графически значения ватерлиний всплытия каждого звена машины, на чертеже общего вида (см. Рис. 1) были определены линии границ заливания вездехода.

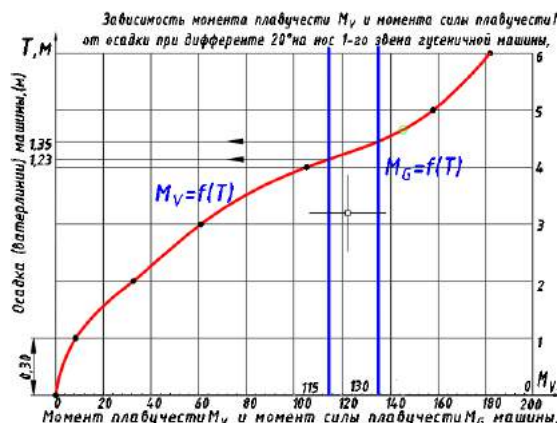


Рис. 5. Зависимость моментов плавучести и тяжести от осадки гусеничной машины при входе в воду первого звена под углом 20°

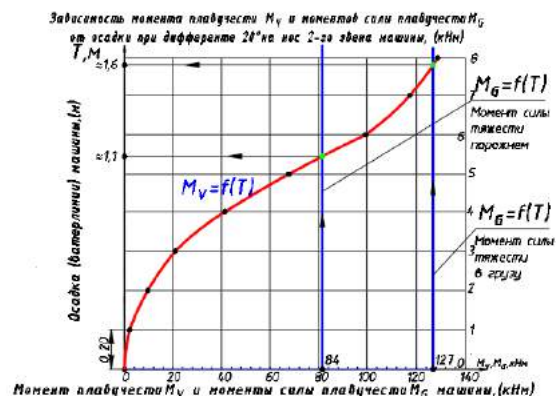


Рис. 6. Зависимость моментов плавучести и тяжести от осадки гусеничной машины при выходе из воды первого звена на берег под уклоном 25°

Данный подход позволил выяснить, какие узлы, агрегаты, люки и разъемы машины данного проекта окажутся под водой при входе в воду (Рис. 9) и выходе на берег (Рис. 10). Полученная методика позволяет рассчитывать давление воды на необходимые точки поверхности машины и решать вопросы о поступлении воды внутрь машины и удалении её из транспортного средства осушительными системами на ранних стадиях проектирования.

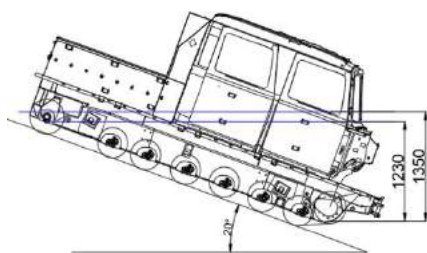


Рис. 9. Положение ватерлинии всплытия первого звена гусеничной машины при входе в воду под углом 20°

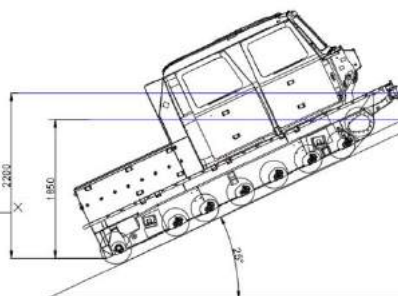


Рис. 10. Положение ватерлиний всплытия каждого звена гусеничной машины при выходе из воды под уклоном 25°

В результате проведенных исследований по изучению мореходности гусеничной вездеходной машины представленного проекта средствами компьютерной графики были сделаны следующие выводы:

1. По имеющимся чертежам общего вида трёх звеньев машины были построены теоретические чертежи геометрических тел (Рис.4) и созданы твердотельные модели в графических программах для всех звеньев (см. Рис. 2).

2. Используя теоретические чертежи, определены зависимости водоизмещения от осадки $V = f(T)$, а также зависимости абсциссы центра плавучести (поддержания) от осадки $x_c = f(T)$, для каждого звена машины.

3. Полученные значения ватерлиний для всех звеньев при различной нагрузке позволили изобразить их на чертеже общего вида для каждого звена (Рис.6), отложив расстояние до уровня воды от крыла каждого звена машины.

4. В ходе работы были проведены аналитические исследования всплытия каждого звена при входе в воду с береговой поверхности и выходе на берег. Были определены величины «затопленных объёмов» и координаты центров плавучести каждого звена вездехода для каждой наклонной ватерлинии. Данные вычисления позволили определить и построить графическую зависимость моментов плавучести и моментов сил тяжести каждого звена различной массы (см. Рис. 7 и Рис. 8).

5. Используя графики моментов, были определены ватерлинии всплытия для каждого звена машины для различных сценариев (см. Рис.9 и Рис. 10). Определив ватерлинии всплытия на чертеже общего вид каждого звена, появляется возможность авторам проекта оценить опасность заливания машины водой при входе в воду и выходе из воды.

Литература

1. Алферьев М.Я. Теория корабля: (Плавучесть, остойчивость, непотопляемость и спуск судов на воду): Учебник для ин-тов водного транспорта МРФ / М.Я. Алферьев, проф., д-р техн. наук. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1972. 446 с.: черт.
2. Ионов Б.П. и др. Создание интегрированной каркасной поверхности плавающей роторно-винтовой машины на основе геометрического моделирования / Б.П. Ионов, Н.А. Кузьмин, М.Л. Мухина, М.Ю. Сандаков. Морские интеллектуальные технологии. №2 (40), Т1, 2018, июнь. – СПб., 2018
3. Инженерная 3d-компьютерная графика: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. Л. Хейфец, А. Н. Логиновский, И. В. Буторина, В. Н. Васильева ; под редакцией А. Л. Хейфеца. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2017. — 602 с.
4. Моделирование и создание чертежей в системе AutoCAD / Г.М. Шипова, В.Г. Хрящев. - М.: БХВ-Петербург, 2016. - 218 с.

References

1. Alferev M.Ia. Teoriia korablia. (Plavuchest, ostoichivost, nepotopliaemost i spusk sudov na vodu). Uchebnik dlia institutovtov vdnogo transporta MRF. Isdanie 2. Moscow. Transport Publ., 1972. 446 p., chert.
2. Ionov B.P., Kuzmin N.A., Mukhina M.L., Sandakov M.Yr. Creation of an integrated wireframe surface floating rotor-winding machine based on geometric modeling. Marine intelligent technologies. №2 (40), T1, 2018, June. – SPb., 2018
3. Heifets A.L., Loginovsky A.N., Butorina I.V., Vasilyev V.N. Engineering 3D-computer graphics: textbook and workshop for academic baccalaureate. Edited by. Heifetz A.L. and additional - Moscow: Yurayt Publishing House, 2017. - 602 p.
4. Shipova G.M., V.G. Khryashev. Modeling and creation of drawings in the system AutoCAD.- Moscow: BHV-Petersburg, 2016. - 218 p.

УДК 629.5

О РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РС С УЧЕТОМ КОРРЕКТИРОВКИ КОДЕКСА ИМО ПО ОСТОЙЧИВОСТИ В ЧАСТИ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ

Рудольф Васильевич Борисов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории корабля
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: rv2borisov@mail.ru

Александр Альфредович Лузянин

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

Аннотация

Настоящая статья является первой из цикла статей, посвященных корректировке кодекса ИМО по остойчивости в части ограничений продольной качки. В ней рассмотрены подходы к ограничениям по погоде из условий, возникающих при продольной качке заливаемости и слеминга для судов различных типов и предложены критерии оценки этих явлений на нерегулярном волнении разной интенсивности.

При этом ставится цель расширения нормативной базы для обоснованного назначения эксплуатационных ограничений по погоде и району плавания судов при совершенствовании Правил Российского Морского Регистра Судоходства на основе общего подхода к нормированию мореходности, согласующегося с методикой разработки новой Международной конвенции о грузовой марке 2000.

Предлагаемый подход к определению дополнительного общего критерия мореходности для оценки эксплуатационных ограничений судов по погоде из условий мореходности может быть использован на практике для совершенствования нормативных требований Регистра.

Ключевые слова: кодекс остойчивости, продольная качка, ограничения продольной качки, правила Морского Регистра судоходства РФ, общий критерий мореходности.

DEVELOPMENT OF DRAFT REQUIREMENTS OF THE RULES OF THE RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING TAKING INTO ACCOUNT ADJUSTMENTS TO THE IMO STABILITY CODE IN TERMS OF RESTRICTIONS IN ROLLING

Rudolf V. Borisov

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Ship Theory Department of
St. Petersburg State Maritime Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: rv2borisov@mail.ru

Alexander A. Luzyanin

PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Ship Theory Department
St. Petersburg State Maritime Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: luzianin52@mail.ru

Abstract

This article is the first of a series of articles on IMO Stability Code adjustment regarding the restrictions in rolling. It considers approaches to weather restrictions in terms of conditions of flooding and slamming that arise during rolling for ships of various types and offers criteria for assessing these phenomena on irregular waves of different intensities.

At the same time, the goal is to expand the regulatory framework for the reasonable designation of operational restrictions in terms of weather and navigation area of ships when improving the Rules of the Russian Maritime Register on the basis of a general approach to the regulation of seaworthiness in line with the methodology for the development of the new International Convention on Load Line 2000.

The proposed approach to the determination of an additional general criterion of seaworthiness for assessing the operational limitations of ships by weather from seaworthiness conditions can be used in practice to improve Register regulatory requirements.

Keywords: stability code, rolling, rolling restrictions, rules of the Maritime Register of Shipping of the Russian Federation, general seaworthiness criterion.

Введение

Усилившаяся в настоящее время тенденция к выходу речных судов в море и расширению районов их эксплуатации (в том числе с переходом к международным рейсам) привела к нарушению сбалансированной системы назначения этим судам ограничений по району плавания и допустимой балльности волнения. Среди основных причин такого нарушения следует назвать формальное использование указанных особенностей этих судов при их переоборудовании, сводящееся к удовлетворению возрастающих требований к прочности корпуса и реализации имеющихся запасов по основным критериям остойчивости (в том числе по критерию погоды K). При этом специальные вопросы мореходности остаются за рамками рассмотрения, поскольку в существующей практике нормирования отсутствуют соответствующие критерии.

Так, для судов ограниченных районов плавания R1 и R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5) действующие критерии остойчивости практически одинаковые. Отличие только в использовании критерия K^* , который к судам R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5) не применяется, а также в использовании для этого класса судов других значений амплитуды качки в расчете критерия K . Изменение допустимой величины высоты волн 3% обеспеченности с 3,5 до 6 метров может, однако, существенно сказаться на характеристиках мореходности. При дальнейшем расширении района плавания до неограниченного (в случае установки дополнительных подкреплений и наличия соответствующих запасов по остойчивости) допустимая высота возрастает до 8,5 метров при практически полном отсутствии возможности контроля обеспечения надлежащей мореходности. Критерий ускорения K^* может в этом случае быть использован только для весьма ориентировочной оценки, в том числе и потому, что вопрос его применения к судам, имеющим иные, чем для R1 ограничения по району плавания, остается открытым до настоящего времени.

С другой стороны, переход к эксплуатации судов типа «река-море» на международных линиях приводит к необходимости выполнения требований Международной конвенции о грузовой марке 1966 года (например, к прочности и характеристикам закрытий) как для судов неограниченного района плавания. Несмотря на то, что необходимость подкрепления закрытий и увеличение высот комингсов отверстий по мере расширения районов плавания представляется достаточно обоснованной, также очевидно, что некоторые из положений Конвенции, применяемые к судам неограниченного района плавания, являются слишком жесткими по отношению к судам, имеющим ограничения по погоде и району эксплуатации. Требуемое подкрепление может быть более рационально определено на основании количественной оценки характеристик заливаемости палубы, которые, в свою очередь, входят в число параметров, характеризующих мореходность судна.

Действующий подход к назначению эксплуатационных ограничений не охватывает, таким образом, существенных особенностей мореходности судов, что может приводить в ряде

случаев и к необоснованному завышению параметров волнения, при которых допускается эксплуатация судна. С нашей точки зрения, это происходит в результате того, что при существующей практике нормирования мореходности имеется "белое пятно", особенно заметное в последнее время в связи с изменившейся экономической ситуацией, приведшей к необходимости эксплуатации судов смешанного плавания на международных линиях с большим удалением от берега.

1. Показатели заливаемости

Исходными для формирования системы оценок заливаемости и слеминга судна являются данные о колебаниях волны относительно его корпуса. Для случая движения судна вразрез двухмерному волнению относительные перемещения волны определяются соотношением

$$z(t) = \zeta_e(t) - \zeta_g(t) + x\psi(t), \quad (1)$$

где $\zeta_e(t)$ – ордината профиля волны у борта,

$\zeta_g(t)$, $\psi(t)$ – вертикальная и килевая качка, x – расстояние от ЦТ судна до рассматриваемого сечения. В случае движения судна на волнении произвольным курсом, формула для относительных колебаний будет иметь более сложный вид, учитывающий также бортовую качку.

Оценка подверженности судна заливанию в показателях мореходности играет большую роль. Для решения этой задачи необходимо иметь комплекс количественных показателей для краткосрочного прогноза поведения судна на волнении, то есть для каждого режима плавания, характеризуемого параметрами состояния судна (нагрузка, посадка, остойчивость и др.), движения судна (скорость, курс) и условий плавания (ветер, волнение, течение, глубина моря).

Используется следующая система показателей заливаемости судна в штормовых условиях.

Вероятность заливания P_s через борт в районе шпангоутного сечения судна на расстоянии $X = \bar{X} \cdot L$ от НП:

$$P_s = \exp \left[-0.5 \left(\frac{D_f(\bar{X})}{\sigma_z^*(\bar{X})} \right)^2 \right], \quad D_f \geq 0, \quad (2)$$

где $D_f(\bar{X})$ – эффективная высота, надводного борта, м; $\sigma_z^*(\bar{X})$ – стандарт (среднеквадратичное отклонение) ординат процесса вертикальных колебаний поверхности воды у борта относительно уровня $D_f(\bar{X})$, м.

При этом

$$D_f = H_\delta - d - \Delta d - Z_v + h_p, \quad (3)$$

где H_δ – геометрическая высота борта, м; d – осадка, м; Δd – изменение осадки при движении на тихой воде, м; Z_v – ордината ходовой волны у борта, м; h_p – расчетная высота палубных конструкций, м.

Высота h_p принимается по условиям расчета. Так, при расчетах заливания палубы $h_p=0$, а при оценке, например, заливания люковых закрытий

считают что $h_p = h_k + h_H$, где h_k – высота комингса, м; h_H – высота нормативного статического напора воды из расчета водонепроницаемости люковых крышек, м.

Для определения наибольшей ординаты носовой ходовой волны используется формула, предложенная Тасаки:

$$Z_{vm} = 0,75 \frac{B}{l_E} Fr^2 = 0,75 \frac{B}{0,25 + 1,8(0,78 - C_B)} Fr^2, \quad (4)$$

где l_E – относительная длина носовой части корпуса судна до цилиндрической вставки (при $0,67 \leq C_B \leq 0,80$).

Величина σ_z^* определяется через стандарт σ_z относительных вертикальных перемещений с учетом влияния обтекания корпуса:

$$\sigma_z^* = \sigma_z \left(1 + \frac{C_B - 0,45}{3} \omega_z \sqrt{\frac{L}{g}} \right), \quad (5)$$

где σ_z , ω_z – стандарт и средняя частота процесса относительных вертикальных перемещений корпуса в сечении x .

Выражение в скобках в формуле (5) является эмпирической поправкой, учитывающей явление дифракции.

Среднее число заливаний n_s за время t_0 :

$$n_s(\bar{x}) = \frac{t_0}{\tau_z} \exp \left[-0,5 \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right)^2 \right], \quad D_f \geq 0, \quad (6)$$

где τ_z – средний период процесса относительных вертикальных перемещений корпуса.

При $\tau_z = t_0$ показатели P_S и n_s идентичны, то есть среднее число заливаний за время, равное среднему периоду, равно вероятности заливания. При оценке мореходности используется обычно число заливаний в час ($t_0 = 3600$ с).

$Z_n(t_0)$ – характеристика заливания

Для случайного процесса относительных перемещений $z(t)$ рассматривается характеристика

$$h_s = \sigma_z \left\{ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right) \right] - \frac{D_f}{\sigma_z^*} \right\} = \sigma_z \bar{h}_s \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right). \quad (10)$$

Величина h_s характеризует условия заливания в среднем за длительное время, как бы объединяя показатели P_S и $\bar{T}_0$.

$$t_s = \frac{\bar{T}_0 t_0}{n_s} = \tau_z \cdot 0,5 \left[1 - \Phi \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right) \right] \exp \left[0,5 \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right)^2 \right] = \tau_z \cdot \bar{t}_s \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right). \quad (11)$$

Средний объемный расход забортной воды при заливании Q_S .

Этот показатель необходим для оценки количества воды, попадающей при заливании в

$Z_n(t_0)$ как случайная величина, определяемая следующим образом:

$$Z_n = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} 1_n(t) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

где единичная функция

$$1_n(t) = \begin{cases} (z(t) - D_f)^n, & z(t) > D_f \\ 0, & z(t) \leq D_f \end{cases}$$

Среднее значение $\bar{Z}_n$ – характеристики равно:

$$\bar{Z}_n = \sigma_z^n \int_{D_f / \sigma_z^*}^{\infty} (z - D_f)^n P(z) dz, \quad (8)$$

где $P(z)$ – плотность вероятности (закон распределения) ординат $z(t)$.

Поскольку $z(t)$ – нормальный случайный процесс, $\bar{Z}_n$ дает возможность получить простые выражения для расчета среднего общего относительного времени заливания за длительный период (Z_0), суммарную площадь под траекторией процесса $z(t)$ выше уровня $H_f (Z_1 t_0)$, соответствующие статические моменты ($Z_2 t_0$) и так далее, а также общую среднюю высоту равномерного слоя воды на палубе за время t_0 . В расчет заливаемости Z_n характеристики введены в работе.

Для практических оценок служат также следующие показатели:

Среднее общее относительное время заливания $\bar{T}_0$:

$$\bar{T}_0 = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\frac{D_f}{\sigma_z^*} \right) \right], \quad (9)$$

где $\Phi(\gamma) = \frac{2}{\pi} \int_0^\gamma \exp(-0,5 t^2) dt$ – интеграл

вероятности (функция Лапласа).

Средняя высота воды при равномерном заливании палубы

Средняя длительность каждого погружения палубы в воду t_s :

открытый трюм или палубный колодец. Величина Q_S может быть определена по формуле:

$$Q_S = V \cdot L \cdot l_T \int_0^1 \bar{\sigma}_z \bar{U} \cdot \bar{l} \cdot \bar{S} dx, \quad (12)$$

где Q_S – расход воды, м³/с; V – средняя скорость судна; l_T – длина раскрытия трюмного люка (колодца), м; $\bar{\sigma}_z = \sigma_z^*(\bar{x})/L$ – относительный стандарт; $\bar{U} = U/V$ – относительная расчетная скорость поступления воды в трюм; $\bar{l} = l/l_T$ – относительная длина заливания; $\bar{S} = \bar{S}\left(\frac{H_f}{\sigma_z^*}\right)$.

Для нормативной оценки величины Q_S представляется достаточным использовать следующие упрощенные формулы для $\bar{U} = U/V$ и $\bar{l} = l/l_T$:

$$\bar{U} = \left(\frac{c}{V} + \cos\beta\right), \quad \bar{l} = \frac{b_T}{l_T} \cos\beta + \sin\beta, \quad (13)$$

где c – скорость перемещения профиля волны, м/с ($c = 1,56\tau_g$); b_T – ширина раскрытия трюмного люка (колодца), м.

Показатель Q_S используется для нормирования заливаемости контейнеровозов открытого типа при назначении грузовой марки.

Все показатели связаны с интенсивностью и периодом погружения палубы в воду. С ростом вероятности заливания растут и все остальные показатели. Предельные оценки по заливаемости существенны для анализа мореходности судов ограниченного плавания, имеющих малый надводный борт. Так, при отсутствии запаса надводного борта средняя высота воды на палубе при ее равномерном заливании не может быть больше величины $h_S = 0,8\sigma_z^*$, что дает возможность достаточно просто оценить, например, максимальную статическую нагрузку на люковые крышки. По максимальной величине параметра $\bar{S}$ можно оценить наибольший

возможный средний объемный расход воды Q_S , влившейся в открытый трюм или палубный колодец. Величина Q_S наиболее просто контролируется на мореходных модельных испытаниях и используется при проектных проработках различных конструктивных мер защиты от заливания.

2. Показатели слеминга судна

Оценка вероятности слеминга.

Считается, что вероятность слеминга равна вероятности совпадения двух событий: оголения днища и превышения определенного порогового значения v_c скоростью относительных колебаний в момент входа днища в воду. Используя соотношение для оценки среднего числа превышений процессом $q(t)$ уровня $T(x)$ при скорости более v_c , для среднего числа ударов за время T_0 получим:

$$N_{уд}(T_0) = \frac{\bar{\omega}T_0}{2\pi} \exp\left[-\left(\frac{T_1^2}{2D_q} + \frac{v_c^2}{2D_{\dot{q}}}\right)\right], \quad (14)$$

где T_1 – расчетная осадка в зоне удара.

Пороговая скорость относительного движения днища и волны, ниже которой слеминг не наблюдается, определяется по формуле:

$$v_c = 0,093\sqrt{gL}. \quad (15)$$

Вероятность слеминга определяется выражением:

$$P_c = \exp\left[-\left(\frac{T_1^2}{2D_q} + \frac{v_c^2}{2D_{\dot{q}}}\right)\right]. \quad (16)$$

В дальнейшем предполагается выполнение массовых расчетов предложенных в работе критериев для судов с различными основными характеристиками при движении на нерегулярном волнении разной интенсивности и получение простых зависимостей, позволяющие оценить мореходность судов на волнении.

Литература

1. Справочник по теории корабля (Под ред. Я.И. Войткунского). Т.2. Л.: Судостроение. 1985.
2. Бородай И.К., Невцетаев Ю.А. Мореходность судов. Л., "Судостроение", 1982.
3. Салькаев А.З. Определение гидродинамических характеристик бортовой и вертикальной качки. В сб.: Управляемость и мореходность судов. Труды НТО Судпрома, Л., Судостроение, 1969, вып. 126, с. 155-166.
4. Салькаев А.З. Расчет гидродинамических сил, действующих на регулярном волнении на суда с большим отношением ширины к осадке. Судостроение, 1980, № 4, с. 19-21.
5. Fukuda J. Coupled motions and midship bending moments of a ship in regular waves. Journal of the Society of Naval Architects of Japan. v. 112. 1962.
6. Лузянин А.А. Метод расчета дополнительного сопротивления морских составных судов с шарнирным сцепом на волнении. Тезисы докл. НТК «Проблемы совершенствования комплексных методов прогнозирования мореходных качеств судов» (Крыловские чтения, 1997 г.) Л., Судостроение, 1997.
7. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля. СПб.; Судостроение, 2002.

References

1. Spravochnik po teorii korablya (Pod red. YA.I. Voitkunsogo). T.2. L.: «Sudostroenie». 1985.
2. Borodai I.K., Necvetaev Y.A. Morehodnost sydov. L.: «Sudostroenie». 1982.
3. Salkaev A.Z. Opredelenie gidrodinamicheskikh harakteristik bortovoi i vertikalnoi kachki. V sb.: Upravlyaemost i morehodnost sudov. Trudu NTO Sudproma, L., «Sudostroenie». 1969, vup. 126, s.155-166.
4. Salkaev A.Z. Raschet gidrodinamicheskikh sil, deistvuistichich na regularnom volnenii na suda s bolschim odnoscheniem schirini k osadke. Sudostroenie. 1980., № 4, s. 19-21.

5. Fukuda J. Coupled motions and midship bending moments of a ship in regular waves. Journal of the Society of Naval Architects of Japan. v. 112. 1962.
6. Luzianin A.A. Metod rascheta dopolnitelnogo soprotivleniya morskikh sostavnuch sudov s scharnirnum scepom na volnenii. Tezisi dokl. NTK «Problemi sovershenstvovaniya kompleksnich metodov prognozirovaniya morechodnich katschestv sudov» (Krilovskie tshtenia, 1997 g.) L., «Sudostroenie». 1997.
7. Jinkin V.B. Teoria i ustroistvo korablya. SPb.; Sudostroenie, 2002.

УДК 539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Владимир Александрович Коршунов

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

Дмитрий Александрович Пономарев

кандидат технических наук, ассистент кафедры строительной механики корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

Александр Александрович Родионов

профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительной механики корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Аннотация

В настоящей работе рассматриваются особенности расчета виброустойчивости высокооборотных роторных систем, для перспективных вспомогательных судовых энергетических установок. Исследуются аналитические и численные методы определения динамических характеристик роторных систем. Дана оценка применимости аналитических процедур. С помощью метода конечных элементов определены собственные значения роторной системы и построена диаграмма Кэмпбелла. Выполнено явное моделирование работы ротора при вхождении в резонансный режим. Исследовано влияние демпфирования на амплитуды колебаний при проходе ротора через резонанс. Рассмотрены особенности применения бесконтактных подшипников в высокооборотных роторных системах. Выполнен анализ влияния конструктивных особенностей бесконтактных подшипников на динамические характеристики ротора. Предложены возможные варианты модификации роторной системы, позволяющие вывести критические частоты вращения вала за рабочий диапазон ВСЭУ.

Ключевые слова: роторная система, динамическая прочность, метод конечных элементов, диаграмма Кэмпбелла, вибрационная устойчивость.

INVESTIGATION OF DYNAMIC STRENGTH OF A ROTOR SYSTEM OF PERSPECTIVE AUXILIARY SHIPBOARD POWER UNITS

Vladimir A. Korshunov

Ph.D. in Technology, associate professor of department of ship mechanics
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

Dmitry A. Ponomarev

Ph.D. in Technology, lecturer of department of ship mechanics
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

Alexander A. Rodionov

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

Abstract

This paper discusses the features of calculating the vibration resistance of high-speed rotor systems for advanced auxiliary ship power units. Analytical and numerical methods for determining the dynamic characteristics of rotor systems are investigated. An assessment of the applicability of analytical procedures. Using the finite element method, the eigenvalues of the rotor system are determined and a Campbell diagram is constructed. An explicit simulation of the rotor when entering the resonant mode is performed. The influence of damping on the oscillation amplitudes during the passage of the rotor through the resonance is studied. The features of the use of non-contact bearings in high-speed rotary systems are considered. An analysis is made of the influence of the design features of contactless

bearings on the dynamic characteristics of the rotor. Possible modifications of the rotor system are proposed, allowing to bring the critical shaft speeds beyond the operating range of the wind turbine.

Keywords: rotor system, dynamic strength, finite element method, Campbell diagram, vibration stability.

Введение

Вспомогательная судовая энергетическая установка (ВСЭУ) удовлетворяет энергетические потребности главной энергетической установки и общесудовые нужды, не связанные непосредственно с движением судна. К ВСЭУ, размещаемых на судах с динамическим принципом поддержания, предъявляются повышенные требования к масса-габаритным характеристикам аналогичные используемым в авиастроении.

В роторных системах ВСЭУ в зависимости от скорости вращения применяются контактные и бесконтактные подшипниковые узлы. В качестве контактных используются шарикоподшипники, а в качестве бесконтактных - газодинамические подшипники.

Наиболее перспективными являются лепестковые газодинамические подшипники, которые позволяют полностью устранить использование в ВСЭУ смазочного масла и увеличить удельную мощность турбин, делая их меньше, быстрее, сокращаются затраты и на техническое обслуживание установки. Они имеют относительно простую конструкцию. Вращение вала обеспечивает свой собственный сжатый воздух. Несущую поверхность подшипника образуют тонкие упругие металлические пластины, которые меняют форму в зависимости от условий, в которых они работают, чтобы создать оптимальную геометрию зазора. С увеличением частоты вращения ротора газовый слой полностью разделяет рабочие поверхности ротора и подшипника, что сопровождается увеличением несущей способности подшипника.

Замена контактных подшипников на бесконтактные изменяет жесткость роторной системы и отражается на ее динамических качествах, что требует проведения дополнительных исследований параметров динамической прочности и виброустойчивости.

В работе для прототипа ВСЭУ с помощью аналитических и численных методов проводится сопоставительное исследование явлений динамического резонанса для вариантов исполнения с контактными и бесконтактными подшипниками.

1. Основные характеристики ВСУ

Общая схема ВСЭУ показана на рисунке. 1. Энергетическая установка состоит из двух основных частей: силовой части, в которой энергия сгорания топливной смеси преобразуется в механическую работу вращения ротора, и редуктора, служащего для изменения крутящего момента и передачи его на генератор.

Силовая часть ВСЭУ включает в себя: компрессор, турбину, вал ротора, камеры сгорания и агрегаты, обеспечивающие работу силовой установки. При работе ВСЭУ атмосферный воздух засасывается в двигатель через воздухозаборник и поступает в компрессор. Далее сжатый воздух из

компрессора поступает в камеру сгорания, а из камеры сгорания, образующий рабочий газ с высокой температурой и повышенным давлением поступает в турбину, вращающую компрессор, и передающую мощность через редуктор на вращение генератора.

Частоты вращения в подобных энергетических установках имеют тенденцию к увеличению и могут достигать 200 тыс. об/мин (3333 Гц). В связи с чем возрастают действующие в подшипниках ротора силы и виброперемещения.

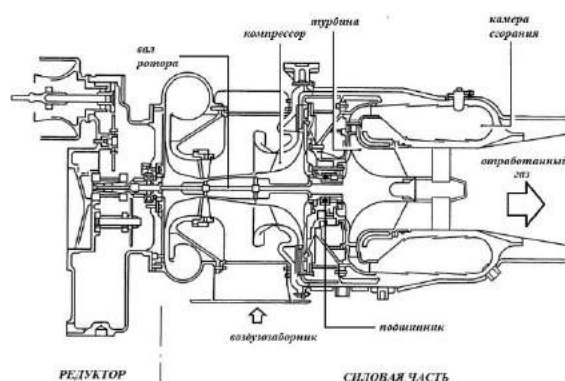


Рис. 1 Схема ВСЭУ

Основной задачей исследования динамических характеристик роторной системы является определение критических скоростей вращения, которая соответствует собственной частоте колебаний системы.

2. Аналитическое решение

Определение вибрационных характеристик роторной системы аналитическим методом выполнялось по упрощенной расчетной модели невесомого вала, опирающийся на два жестко закрепленных подшипника с развитым диском турбины, расположенным за подшипниковыми опорами, то есть на свободном конце вала - на консольной его части (см. рис.2).

Размер диска турбины существенно больше диаметра вала и следовательно момент инерции углового перемещения диска относительно оси, перпендикулярной плоскости колебаний, будет оказывать заметное влияние на частотные характеристики системы.

Возникающий при повороте диска инерционный момент равен [4]:

$$M_j = \frac{dL_j}{dt} = -I_1 \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad (1)$$

где

I_1 — момент инерции массы диска относительно центральной оси сечения вала, перпендикулярной к плоскости колебания;

θ — угол поворота диска в результате изгиба вала;

L_j — момент количества движения.

Для вращающейся роторной системы в выражении для момента инерции диска

необходимо учесть добавку, связанную с гироскопическим моментом.

Предположим, что в результате упругих деформаций вала ось вращения диска x_i составляет с неподвижными координатными плоскостями XY и XZ малые углы θ_z и θ_y (см рис. 2-б). Моменты инерции диска относительно связанных с ним осей X_1, Y_1, Z_1 , обозначим $I_{x_1} = I_0$; $I_{y_1} = I_{z_1} = I_1$.

Угловая скорость вращения диска относительно оси X_1 равна ω , следовательно, момент количества движения относительно этой оси $L_{x_1} = I_0 \omega$.

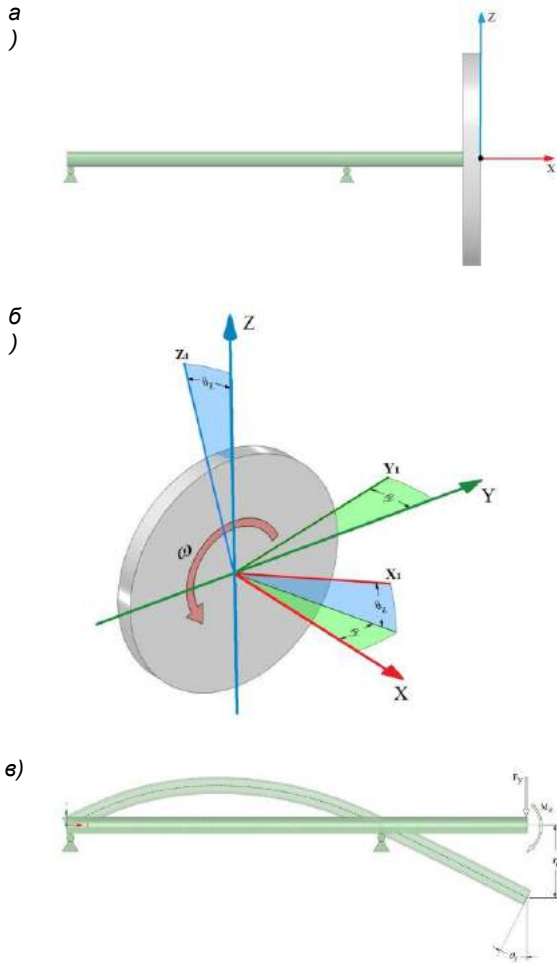


Рис. 2 Расчетная модель роторной системы: а) общий вид сбоку; б) угловые перемещения диска; в) обобщенные силы и перемещения вала в точке установки диска.

Скорость вращения относительно связанных с диском осей Y_1 и Z_1 равна соответственно $-\frac{d\theta_z}{dt}$ и $\frac{d\theta_y}{dt}$, тогда моменты количества движения относительно данных осей будут соответственно равны

$$L_{y_1} = -I_1 \frac{d\theta_z}{dt}, \quad (2-a)$$

$$L_{z_1} = I_1 \frac{d\theta_y}{dt}. \quad (2-б)$$

Моменты количества движения относительно неподвижных осей Y и Z определяются, проекцией на эти оси моментов L_{x_1}, L_{y_1} и L_{z_1} :

$$L_y = L_{y_1} + L_{x_1} \theta_y = -I_1 \frac{d\theta_z}{dt} + I_0 \omega \theta_y, \quad (3-a)$$

$$L_z = L_{z_1} + L_{x_1} \theta_z = I_1 \frac{d\theta_y}{dt} + I_0 \omega \theta_z. \quad (3-б)$$

Тогда моменты приложенных к диску сил относительно осей Y и Z будут равны

$$M_y = \frac{dL_y}{dt} = -I_1 \frac{d^2\theta_z}{dt^2} + I_0 \omega \frac{d\theta_y}{dt}, \quad (4-a)$$

$$M_z = \frac{dL_z}{dt} = I_1 \frac{d^2\theta_y}{dt^2} + I_0 \omega \frac{d\theta_z}{dt}. \quad (4-б)$$

Точно такие же, но противоположно направленные моменты передаются с диска на вал.

Так как частоты и формы поперечных колебаний вала в плоскостях XY и XZ , будут кратными, то далее рассматриваются только колебания в плоскости XY .

Кроме вычисленных моментов, на вал воздействуют силы инерции, связанные с поперечными перемещениями диска (см рис.2-в):

$$F_y = m \frac{d^2\eta}{dt^2}, \quad (5)$$

где

η — проекция полного смещения диска на ось Y ;
 m — масса диска.

Для определения кинематических параметров диска η и θ_y достаточно следующих двух уравнений:

$$\begin{cases} \eta = -m \frac{d^2\eta}{dt^2} \delta_{11} - \left(I_1 \frac{d^2\theta_y}{dt^2} + I_0 \omega \frac{d\theta_z}{dt} \right) \delta_{12}, \\ \theta_y = -m \frac{d^2\eta}{dt^2} \delta_{12} - \left(I_1 \frac{d^2\theta_y}{dt^2} + I_0 \omega \frac{d\theta_z}{dt} \right) \delta_{22}; \end{cases} \quad (6)$$

Здесь за δ_{ij} обозначена податливость вала в точке крепления диска, определяемая как:

δ_{11} — вертикальное смещение диска при действии единичной силы;

δ_{12} — поворот диска при действии единичной силы;

δ_{22} — поворот диска от действия единичного момента.

Поскольку при вращении углы поворота θ_y и θ_z смещены по фазе на $\frac{\pi}{2}$, то решения системы дифференциальных уравнений (6) предлагается искать в виде

$$\eta = A \cos(pt), \theta_y = \theta \cos(pt), \theta_z = \theta \sin(pt), \quad (7-a)$$

или в виде

$$\eta = A \cos(pt), \theta_y = \theta \cos(pt), \theta_z = -\theta \sin(pt). \quad (7-б)$$

Оба эти типа решения соответствуют вращательному движению изогнутой оси вала с угловой скоростью p , которая также является собственной частотой колебаний. Причем в первом случае изогнутая ось вращается в том же направлении, что и сам вал (прямая прецессия), а во втором случае в сторону, противоположную вращению вала, (обратная прецессия).

Величины A и θ представляют собой прогиб и угол поворота сечения вала в точке установки диска.

Подставляя в уравнения (6) значения (7-а) и (7-б) получим систему уравнений

$$\begin{cases} A(1 - p^2 m \delta_{11}) - \theta(p^2 I_1 \mp p \omega I_0) \delta_{12} = 0, \\ -A p^2 m \delta_{12} + \theta[1 - (p^2 I_1 \mp p \omega I_0) \delta_{22}] = 0; \end{cases} \quad (8)$$

здесь знак «-» соответствует прямой прецессии, а знак «+» обратной прецессии.

Приравняв нулю определитель этой системы уравнений, получим частотное уравнение:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p - 1 = 0, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= mI_1(\delta_{12}\delta_{21} - \delta_{11}\delta_{22}); \\ a_1 &= \mp\omega mI_0(\delta_{12}\delta_{21} - \delta_{11}\delta_{22}); \\ a_2 &= m\delta_{11} + I_1\delta_{22}; \\ a_3 &= \mp\omega I_0\delta_{22}. \end{aligned}$$

Решение частотного уравнения (9) позволяет построить для прямой и обратной прецессии зависимость $p = f(\omega)$, в форме диаграммы Кэмпбелла, которая является графическим изображением частот свободных изгибных колебаний вала с диском в зависимости от величины и направления угловой скорости вращения изогнутой оси вала относительно линии, проходящей через опоры вала. С помощью диаграммы определяются критические угловые скорости вращения вала с диском по точкам пересечения кривых $p = f(\omega)$ с линией возбуждения, определяемой зависимостью $p = \omega$. Иначе их можно определить путем решения уравнения

$$\omega = f(\omega). \quad (10)$$

3. Верификация численного решения по аналитическим зависимостям

Дальнейшие исследования проводились с помощью численных моделей метода конечных элементов, поэтому предварительно была проведена верификация численного решения с помощью представленных выше аналитических зависимостей.

Рассматривалась простейшая роторная система на жестких опорах, что эквивалентно контактному подшипниковому узлам. Геометрические характеристики ротора представлены на рисунке 3. В расчете приняты следующие характеристики материала: модуль упругости материала диска и вала $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, плотность материала $\rho=7850$ кг/м³.

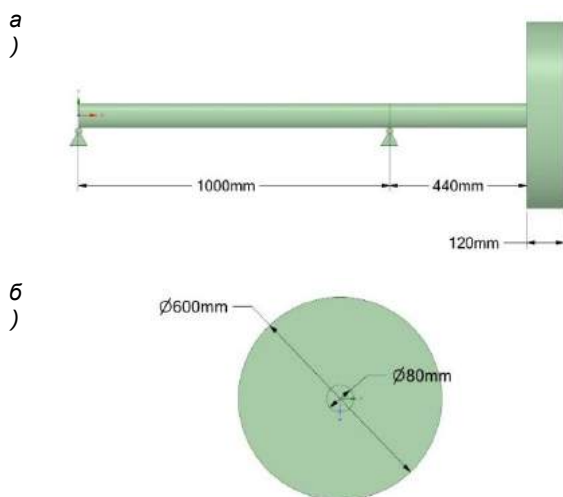


Рис. 3 Геометрическая модель роторной системы: а) вид сбоку; б) вид спереди

Конечно-элементная модель ротора показана на рисунке 4. Максимальный размер элемента составляет не более 20 мм, а общее количество элементов 6728 шт. Отношение массы диска к массе вала составляет 4,7.

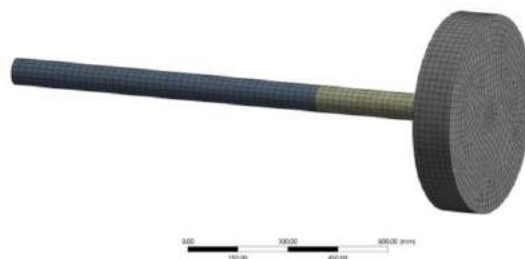


Рис. 4 Конечно-элементная модель

В результате серии решений с помощью метода конечных элементов проблемы собственных [5] значений с учетом гироскопических эффектов построена диаграмма Кэмпбелла для двух форм (mode) колебаний (что обозначено как (NS)) представленная на рисунке 5. На этом же графике помещены результаты аналитического решения (AS) частотного уравнения (9). Восходящие линии на диаграмме соответствуют прямой прецессии, а нисходящие - обратной. Для первой формы колебаний наблюдается полное совпадение решений. Для второй формы численное решение дает собственные частоты на 13 % выше полученных аналитически. Главным образом это связано с влиянием толщины диска при образовании двух полуволн в форме колебаний. Критические скорости вращения равны 93 рад/с и 117 рад/с соответственно для обратной и прямой прецессии [3].

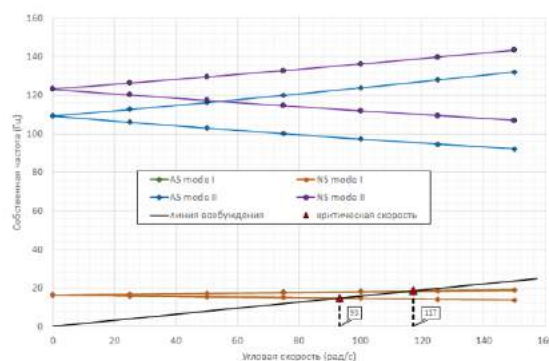


Рис. 5 Диаграмма Кэмпбелла для первых двух форм(mode) колебаний простейшей роторной системы, полученная численным (NS) и аналитическим (AS) методами.

С помощью модели метода конечных элементов критическая скорость прямой прецессии определялась явным образом в результате решения динамической задачи о вращении вала с постепенным увеличением оборотов его вращения от нуля до 265 рад/сек. с учетом и без учета демпфирования.

При явной постановке задачи определялись перемещения вала путем явного интегрирования уравнения вида:

$$\{\ddot{x}\} = [M]^{-1} \cdot (\{F\}^{ext} - \{F\}^{int}) \quad (11)$$

где

$\{\ddot{x}\}$ – вектор ускорений узлов;

$[M]$ – матрица масс;

$\{F\}^{ext}$ – глобальный вектор внешних сил;

$\{F\}^{int}$ – глобальный вектор внутренних сил.

Вращение ротора задавалось приложением к заднему концевому сечению вала углового ускорения 20 рад/с^2 . Учитывалось демпфирование, вызванное свойствами материала ротора. В качестве условного коэффициента глобального узлового демпфирования по массе была задана величина $D=20$.

На рисунке 6 показаны продольные перемещения точки, расположенной на кромки диска в зависимости от скорости вращения с учетом и без учета демпфирования, так же отмечена величина критической скорости вращения, полученная аналитическим методом. Из графика видно, что резкое увеличения амплитуды колебаний диска соответствует наступлению резонансного режима работы ротора. Для ротора без демпфирования результаты хорошо согласуются с аналитическим решением, небольшое смещение пиков амплитуд связано с равноускоренным вращением ротора. Учет демпфирования сдвигает появление высоких амплитуд колебаний далеко за критическую скорость, системы без демпфирования (см.рис.6-б). В данном случае это может быть связано с условностью принятого в расчете коэффициента демпфирования, который должен в дальнейшем быть уточнен с помощью дополнительных экспериментальных исследований.

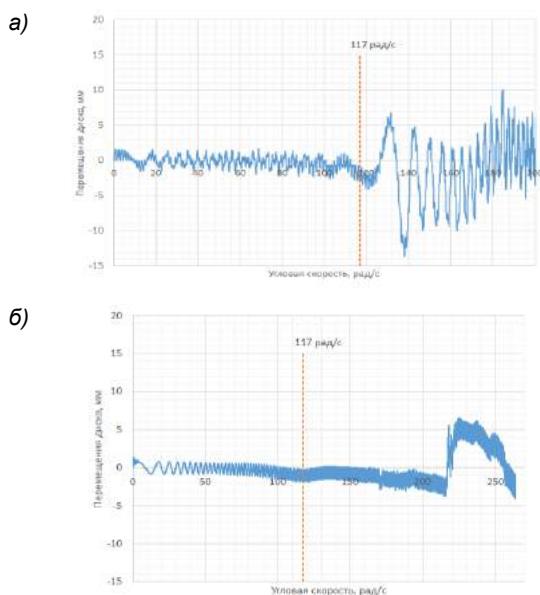


Рис. 6 Продольные перемещения кромки диска при изменении скорости вращения: а) без учета демпфирования материала; б) с учетом демпфирования материала

4. Численные исследования различных конструктивных вариантов

Ниже численные модели используются для исследования влияния жесткости опорных подшипников на динамические характеристики роторной системы ВСЭУ. Рассматривалась роторная система, состоящая из вала с двумя насаженными на одном из концов дисками, соответствующим колесам компрессора и турбины. Анализировались как контактные подшипниковые узлы, что эквивалентно жесткому опиранию ротора,

так и бесконтактные подшипники, что соответствует упругому опиранию. Поскольку бесконтактные подшипники воспринимают только усилия нормальные к оси вала, в конструкцию роторной системы добавляется подпятник для установки упорного бесконтактного подшипника (см. рис. 7).

Рабочие частоты вращения рассматриваемой роторной системы находятся в диапазоне 50-60 тыс. об/мин. Определение динамических характеристик выполнялось численным методом путем решения проблемы собственных значений вращающегося вала с учетом гироскопических эффектов. Бесконтактные подшипники моделировались упругими конечными элементами с жесткостью 1000 Н/мм .

Полученные результаты численных исследований представлены графически на рисунке 8 в форме диаграмм Кэмпбелла.

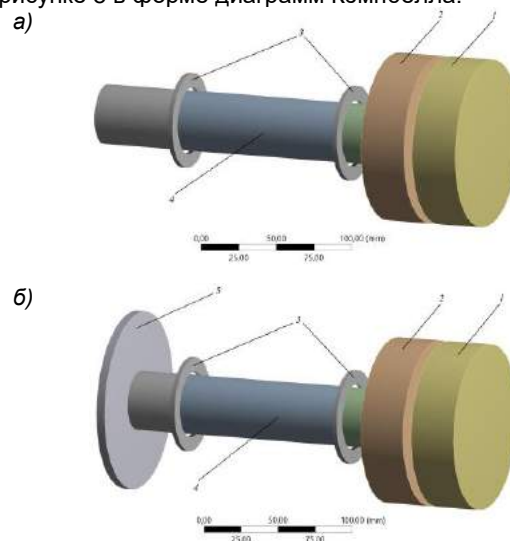


Рис. 7 Расчетные модели роторной системы: а) на контактных подшипниках; б) на бесконтактных подшипниках; 1 – колесо турбины; 2 – колесо компрессора; 3 – подшипниковые узлы; 4 – вал ротора; 5 – подпятник упорного бесконтактного подшипника

Из результатов видно, что для роторной системы с контактными подшипниковыми узлами, что соответствует жесткому шарнирному опиранию ротора, имеется критическая частота вращений, соответствующая изгибной форме колебаний при прямой синхронной прецессии $n = 41217 \text{ об/мин}$. При рабочем диапазоне вращения роторной системы от 50000 об/мин до 60000 об/мин и при жестком опирании ротора данная критическая частота будет проходной и не должна приниматься во внимание. Так как обратная прецессия при жестком опирании ротора не реализуется, то и критическая скорость $n = 29503 \text{ об/мин}$, не рассматривается.

В роторной системе с бесконтактными подшипниковыми узлами, что соответствует упругому опиранию ротора, помимо общих изгибных форм колебаний реализуются вращательно-поступательные (цилиндрическая прецессия) и вращательные (коническая прецессия) колебания ротора, связанные с

введение в систему упругих элементов и, следовательно, увеличением ее степеней свободы (см. рис. 10). Так же данное обстоятельство приводит к тому, что собственная частота, соответствующая общим изгибным формам колебаний роторной системы, возрастает в 2.2 раза по сравнению с жестким опиранием ротора, что связано с уменьшением расстояния между узловыми точками формы колебаний. Для данной роторной системы имеются критические частоты вращения при прямой синхронной прецессии $n_1^{кр} = 2567$ об/мин, $n_2^{кр} = 7808$ об/мин, которые соответствуют конической и цилиндрической прецессии роторной системы соответственно, т.е. колебанием системы как жесткого целого. Данные виды колебаний не представляют опасности если являются проходными. В диапазоне рабочих оборотов наблюдается критическое значение скорости $n_5^{кр} = 54404$ об/мин, которое соответствует изгибной частоте собственных колебаний при обратной прецессии. Как отмечалось наличие упругих опор дает условие для возбуждения обратной прецессии, следовательно, в рабочем диапазоне рассмотренной роторной системы может наблюдаться резонансный режим.

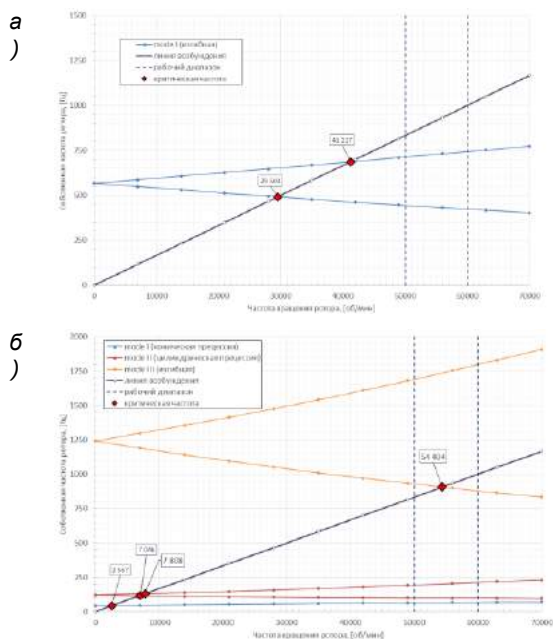
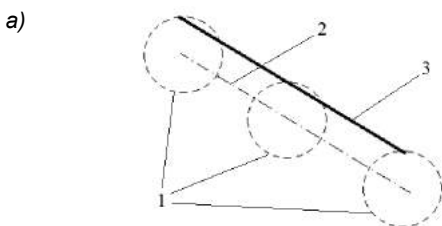


Рис. 8 Диаграмма Кэмпбелла роторной системы ВСЭУ для различных вариантов подшипниковых узлов : а) на контактных подшипниках; б) на бесконтактных подшипниках



б)

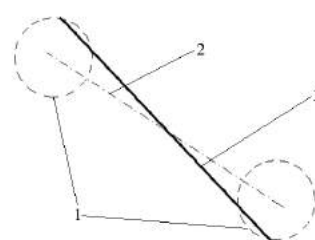


Рис. 10 Схема цилиндрической (а) и конической (б) прецессии; 1 - траектория вращения (прецессии) оси вала; 2 - исходное положение продольной оси неподвижной системы координат вала; 3 - осевая линия вращающегося вала

Для сдвига критических скоростей вращения ротора за рабочий диапазон необходимо изменить жесткостные или инерционные характеристики системы. Принимая во внимание массивность подпятника и следовательно его влияние на динамические характеристики, выполнено исследование динамических характеристик в зависимости местоположения подпятника по длине вала. Результаты такого исследования представлены на рисунке 10 в виде зависимости критической скорости вращения ротора от положения подпятника. Результаты показывают, что для рассматриваемой роторной системы с бесконтактными подшипниковыми узлами, рациональные местоположения подпятника, которые выводит критические частоты вращения вала за рабочий диапазон, находятся в интервале от 90 мм до 150 мм от задней кромки вала.

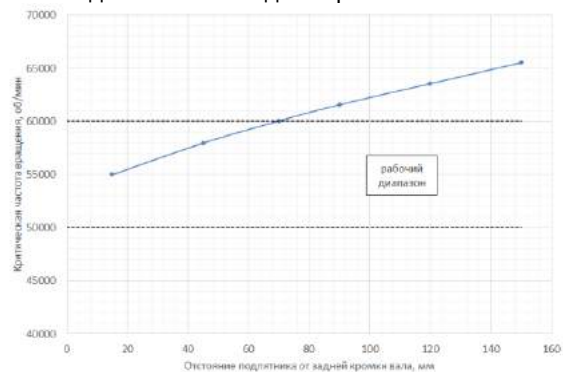


Рис. 10 Зависимость критической скорости вращения ротора от положения подпятника

Заключение

В работе проведены исследования динамических характеристик роторной системы перспективных высокооборотных вспомогательных судовых энергетических установок при переходе на бесконтактные подшипниковые узлы.

Представлена аналитическая модель простейшей роторной системы ВСЭУ, состоящей из невесомого вала, опирающийся на два жестко закрепленных подпятника с одним развитым диском турбины, расположенным за подшипниковыми опорами на консольной его части. Эта модель использована для сопоставления полученных значений критических скоростей вращения вала со значениями,

вычисленными с помощью численных моделей метода конечных элементов.

С помощью метода конечных элементов анализ устойчивости работы системы проводился на основе решения явной динамической задачи о вращении вала с постепенным увеличением оборотов его вращения от нуля до 265 рад/сек. с учетом и без учета демпфирования. Явное моделирование рабочего процесса роторной системы показало небольшое запаздывание резонансного режима от собственной частоты, что связано с проходом резонанса при равноускоренном вращении.

Исследованы динамические характеристики роторной системы ВСЭУ при использовании контактных и бесконтактных подшипниковых узлов. Показано, что замена подшипниковых узлов изменяет спектр собственных частот системы в результате чего ротор в рабочем диапазоне может иметь резонансный режим.

Предложены возможные варианты модификации роторной системы, позволяющие вывести критические частоты вращения вала за рабочий диапазон ВСЭУ.

Литература

1. Манухин В.А., Грибозубов В.Б. Решение задач роторной динамики в ANSYS. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Научный журнал №1 (264) 2017, стр. 50-59.
2. Пасынкова И.А. Вынужденные колебания неуравновешенного ротора в неизотропных опорах. Вестник СПбГУ. Сер. 1. Т. 1 (59). 2014. Вып. 2, стр. 292-302
3. Подольский М.Е., Черенкова С.В. Физическая природа и условия возбуждения прямой и обратной прецессии ротора. Теория механизмов и машин, Научный журнал №1 (23) Т. 12 2014, стр. 27-40.
4. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин Н.Н., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении. Т.3., -М.: Mashgiz, 1959.
5. ANSYS Mechanical APDL Rotordynamic Analysis Guide/ Release 16.2, 2016.
6. Genta G. Dynamics of Rotating Systems. Springer-Verlag, New York, 2005. 658 p.
7. Pasynkova I.A. Whirling motion of an Unbalanced Rotor in Linear and Nonlinear Elastic Bearings. Den 7. Magdeburger Maschinenbau-Tage. 11–12. Oktober 2005. Tagungsband, 2005, 143–148.

References

1. Manuhin V.A., Gribozubov V.B. Reshenie zadach rotornoy dinamiki v ANSYS. Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta, Nauchnyj zhurnal №1 (264) 2017, str. 50-59.
2. Pasynkova I.A. Vynuzhdennyye kolebaniya neuravnovesennogo rotora v neizotropnykh oporakh. Vestnik SPbGU. Ser. 1. T. 1 (59). 2014. Vyp. 2, str. 292-302
3. Podol'skij M.E., Cherenkova S.V. Fizicheskaya priroda i usloviya vozbuzhdeniya pryamoj i obratnoj precessii rotora. Teoriya mekhanizmov i mashin, Nauchnyj zhurnal №1 (23) T. 12 2014, str. 27-40.
4. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Liharev K.K., Makushin V.M., Malinin N.N., Feodos'ev V.I. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. T.3., -M.: Mashgiz, 1959.
5. ANSYS Mechanical APDL Rotordynamic Analysis Guide/ Release 16.2, 2016.
6. Genta G. Dynamics of Rotating Systems. Springer-Verlag, New York, 2005. 658 p.
7. Pasynkova I.A. Whirling motion of an Unbalanced Rotor in Linear and Nonlinear Elastic Bearings. Den 7. Magdeburger Maschinenbau-Tage. 11–12. Oktober 2005. Tagungsband, 2005, 143–148.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.123

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА БАЛЛАСТА
НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТАНКЕРА****Анатолий Владимирович Букшев**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, Лотманская ул. 3
e-mail: office@smtu.ru

Сунь Тяньши

магистр техники и технологии, аспирант кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, Лотманская ул. 3
e-mail: office@smtu.ru

Аннотация

Изучение практики проектирования современных танкеров позволяет констатировать, что суммарный объем балластных цистерн наряду с объемами грузовой части и цистерн судовых энергетических запасов, а также помещений энергетической установки, составляет достаточно большую долю общей вместимости корпуса наливного судна. Статистика показывает самые различные доли этих объемов, без явной связи с размерениями и другими характеристиками судна. Между тем имеется возможность уже на стадии выбора главных размерений установить объем балластных отсеков, соответствующий максимально возможному количеству балласта на основе требований Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 1073/78). Положение МАРПОЛ 1973/78 о том, что «вместимость танков изолированного балласта должна быть по меньшей мере такой, чтобы при любом варианте балластировки . . . , включая вариант, состоящий из водоизмещения судна порожнем плюс только изолированный балласт, осадка и дифферент судна удовлетворяли одновременно. . . » определенным параметрам посадки, фактически задает предельный суммарный объем балластных отсеков. Существенным моментом является ограниченность характеристик судна, выступающих в МАРПОЛ 1973/78 в качестве аргументов для определения количества балласта: только длина судна и диаметр гребного винта.

В статье рассмотрены соответствующие характеристики 50 танкеров, приведенные в журнале «Significant Ships» за 1991-2016 гг., выявлены связи между параметрами посадки и длинами судов, получены достаточно устойчивые зависимости между длиной проектируемого судна и количеством балласта, требуемого МАРПОЛ 1973/78.

Ключевые слова: балласт, средняя осадка, дифферент, гребной винт, Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973/78 гг.

**DETERMINATION OF THE BALLAST QUANTITY
AT THE INITIAL STAGES OF TANKER DESIGN****Anatoly V. Bukshev**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Ship Design
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: office@smtu.ru

Sun Tienshi

Master of Engineering and Technology, graduate student of the department of ship design
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: office@smtu.ru

Abstract

Learning design practices of modern tankers allow us to state that the total volume of ballast tanks, along with the volumes of the cargo and tanks of the ship's energy reserves, as well as the facilities of the power plant, is a fairly large share of the total capacity of the tanker vessel. Statistics show the most varied shares of these volumes, with no explicit connection to the dimensions and other characteristics of the vessel. Meanwhile, it is already possible at the stage of selecting the main dimensions to establish the volume of ballast tanks corresponding to the maximum possible quantity of ballast based on the requirements of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 1073/78). The provision of MARPOL 1973/78 regarding that "the capacity of segregated ballast tanks shall be at least such that, in any ballast condition... including the conditions consisting of lightweight plus segregated ballast only, the ship's draughts and trim can meet each ..." certain parameters of trim, actually sets the maximum total volume of water ballast tanks. The essential point is the limitations of the

characteristics of the vessel, acting in MARPOL 1973/78 as arguments for determining the quantity of ballast: only the length of the vessel and the diameter of the propeller screw.

The article reviews the relevant characteristics of 50 tankers listed in the "Significant Ships" magazine as of 1991-2016, identifies links between trim parameters and lengths of ships, and provides fairly stable relationships between the length of the designed ship and the quantity of ballast required by MARPOL 1973/78.

Key words: ballast, midship draughts, trim, propeller screw, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships 1973/78

Цистерны изолированного балласта занимают настолько значительную часть корпуса современного нефтеналивного танкера, что проектант вынужден учитывать эти объемы при определении главных размерений судна [1]. Поэтому уже на начальных этапах проектирования судна возникает необходимость уточнения наибольшего количества балласта, который необходимо разместить на борту танкера.

Для современных танкеров МАРПОЛ 73/78 [4] требует: «... вместимость танков изолированного балласта должна быть по меньшей мере такой, чтобы при любом варианте балластировки на любом участке рейса, включая вариант, состоящий из водоизмещения судна порожнем плюс только изолированный балласт, осадка и дифферент судна удовлетворяли одновременно следующим условиям:

а) теоретическая осадка на миделе (dm) в метрах не менее

$$dm = 2,0 + 0,02L;$$

б) осадки на носовом и кормовом перпендикулярах соответствуют осадке на миделе dm , ... при этом дифферент на корму не более $0,015L$;

с) ... осадка на кормовом перпендикуляре не менее той, которая необходима для полного погружения винта».

Таким образом, необходимый минимум балласта оказывается связанным с длиной судна и диаметром гребного винта $dв$.

«Полное погружение винта» означает, что осадка кормой $daft$ с учетом зазора между диском движителя и основной плоскостью [2], принятым в дальнейших расчетах настоящей статьи равным $0,1$ диаметра гребного винта, должна быть не менее $1,1dв$: $daft \geq 1,1dв$.

Теоретически возможны следующие варианты удовлетворения вышеуказанных требований:

1. При посадке судна без дифферента:

$$daft \geq dm.$$

2. При посадке с дифферентом на корму $0,015L$:

$$daft \geq (dm + 0,0075L).$$

3. При невыполнении условия варианта 2:

$$daft \geq (dm + 0,0075L + \Delta dm),$$

где Δdm – вынужденное дополнительное увеличение средней осадки.

В двух первых случаях минимально необходимое количество балласта будет одинаковым, соответствующим средней осадке dm .

В третьем случае количество балласта увеличивается соответственно увеличению средней осадки dm на величину Δdm .

Для оценки требуемого МАРПОЛ 73/78 количества балласта использованы материалы

журнала «Significant Ships» за 1991-2016 гг. [5] для 50 танкеров длиной от 150 до 330 м.

В выборку вошли суда, для которых были указаны длина, водоизмещение в полном грузу, масса судна порожнем и диаметр гребного винта.

Анализ сложившейся практики проектирования танкеров [5] показал достаточно тесную связь длины судна с диаметром гребного винта и требуемой осадкой кормой: $daft = 1,1dв$ (рис.1).

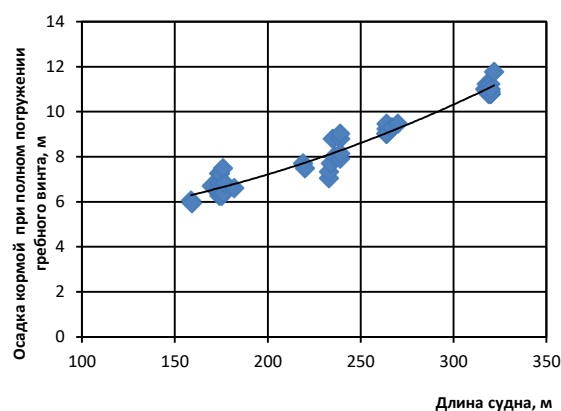


Рис.1 Зависимость осадки судна кормой $daft$, требуемой для полного погружения гребного винта, от длины судна.

Для всей выборки танкеров первый вариант удовлетворения требованиям МАРПОЛ 73/78 оказался невыполнимым (рис. 2). Вне зависимости от длины судов посадка на ровный киль не обеспечивала полное погружение винта ($daft > dm$).

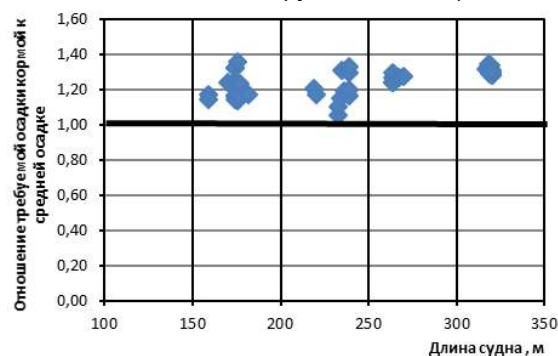


Рис. 2 Соотношение между требуемой осадкой кормой $daft$ и средней осадкой dm .

Во втором случае удовлетворение требованиям МАРПОЛ 73/78 оказалось выполнимым для большинства судов с длинами менее трёхсот метров ($daft < (dm + 0,0075L)$) - рисунок 3.

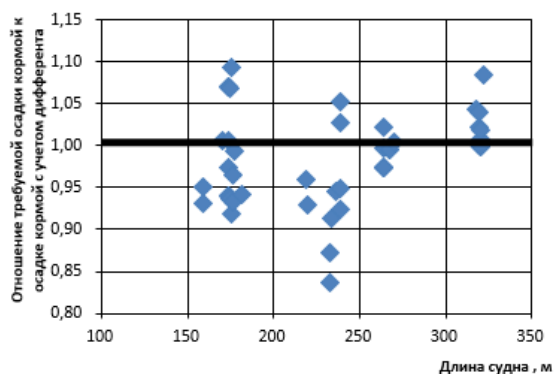


Рис. 3 Соотношение между требуемой осадкой кормой $daft$ и осадкой кормой с учётом дифферента $(dm + 0,0075L)$.

Для судов длиной свыше 300 м необходимо принимать дополнительное количество балласта для увеличения средней осадки dm на величину Δdm .

На рисунке 4 показано необходимое абсолютное увеличение средней осадки Δdm для конкретных крупных танкеров [5]: $\Delta dm = daft - (dm + 0,0075L)$

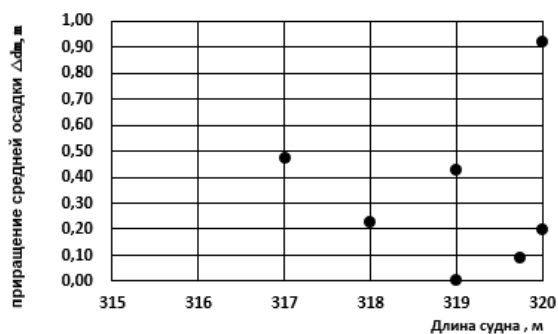


Рис. 4. Приращение средней осадки Δdm у судов длиной свыше 300 м, требующееся для полного погружения гребного винта.

В соответствии с положениями МАРПОЛ 73/78 наименьшее количество балласта $P_{бл}$, обеспечивающее требуемую среднюю осадку танкера dm при состоянии нагрузки

$$D_{бл} = D_{пор} + P_{бл}$$

может быть получено как разность между балластным водоизмещением $D_{бл}$ и водоизмещением порожнем $D_{пор}$.

Отсутствующая в «Significant Ships» информация о балластном водоизмещении судов восполнена пересчетом кривых грузового размера танкеров, входящих в представленную выборку, на основе соответствующей кривой грузового размера близкого по геометрическим параметрам формы корпуса танкера пр. 12990 типа «Победа»[3]. Результаты расчета балластного водоизмещения $D_{бл}$, соответствующего требуемой балластной осадке dm , представлены на рисунке 5 (для танкеров с длиной более 300 м с учетом приращения осадки Δdm).

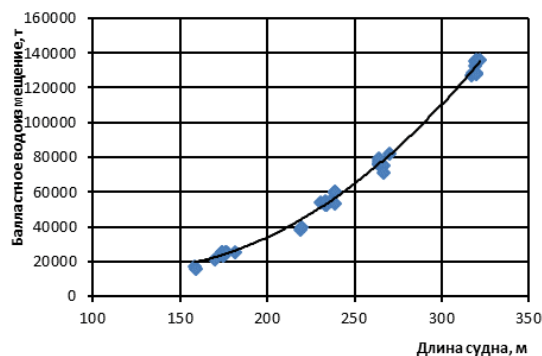


Рис. 5 Расчетное балластное водоизмещение $D_{бл}$.

На рисунке 6 представлена зависимость массы танкеров порожнем $D_{пор}$ от длины судна [2]:

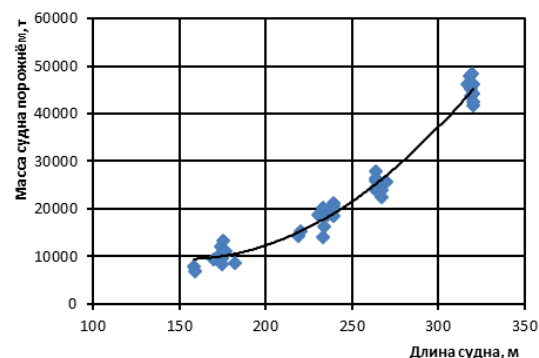


Рис. 6. Масса танкера порожнем $D_{пор}$.

Минимальное количество изолированного балласта, требуемое МАРПОЛ 73/78, соответствует разности ординат на рисунках 5 и 6 (рис. 7) и описывается уравнением

$$P_{бл} = 1,688L^2 - 3270L + 19600$$

при величине достоверности информации

$$R^2 = 0,994.$$

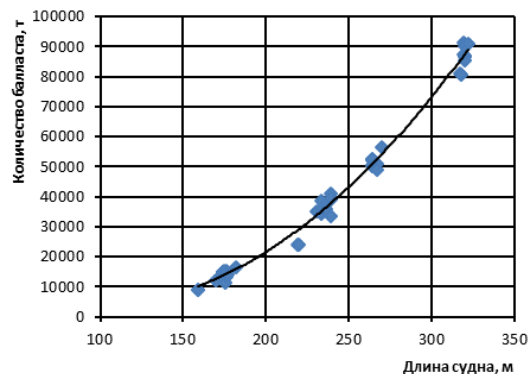


Рис. 7 Количество изолированного балласта танкера, требуемого МАРПОЛ 73/78.

Таким образом, на начальных этапах проектирования танкера при выборе главных размерений, соответствующих общей вместимости судна, емкость цистерн для размещения необходимого количества изолированного балласта может быть определена с достаточной степенью точности с помощью графика $P_{бл} = f(L)$ (рис. 7) или расчетом по вышеприведенной формуле.

Литература

1. Бронников А.В. Проектирование судов. Л., Судостроение, 1991, 319 с.
2. Ногид Л.М. Проектирование морских судов. Л., Судостроение, 1978, 206 с.
3. Родионов Н.Н. Современные танкеры. Л., Судостроение. 1980, 280 с.
4. 4. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973/78. М., ЦРИА «Морфлот», 1980, 364 с.
5. Significant Ships of 1991-2016, The Royal Institution of Naval Architects, London, UK.

References

1. Bronnikov A.V. Proektirovanie sudov. L., Sudostroenie, 1991, 319 p.
2. Nogid L.M. Proektirovanie morskich sudov. L., Sudostroenie, 1978, 206 p.
3. Rodionov N.N. Sovremennye tankery. L., Sudostroenie, 1980, 280 p.
4. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships 1973/78. M., CRIA «Morflot», 1980, 364 c.
5. Significant Ships of 1991-2016. The Royal Institution of Naval Architects, London, UK.

УДК 629.12.001.2

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА ПО ОСТОЙЧИВОСТИ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Александр Иосифович Гайкович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: a_gaikov@mail.ru

Николай Васильевич Никитин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Вай Ян Вин Хтве

Аспирант

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kogugu90@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается проблема включения в математическую модель оптимизации основных характеристик проектируемого судна требования к остойчивости на больших углах крена. При этом предполагается, что процедура генерации теоретического чертежа отсутствует. Для использования диаграммы статической остойчивости (диаграммы Рида) применяется её аппроксимация, предложенная В.Г. Власовым. Показано место предлагаемого модуля, связанного с остойчивостью на больших углах крена в последовательности поиска главных размерений судна и его коэффициентов полноты на начальных стадиях проектирования. Построена частная система функциональных ограничений задачи оптимизации, отражающая требования Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС) в части остойчивости судов. Ограничения содержат требования к диаграмме статической остойчивости и критерию погоды. Предложены формы оценок безопасности судна по остойчивости, которые базируются на сопоставлении с минимальными требованиями РМРС. Разработан программный комплекс для исследования влияния кораблестроительных элементов судна на величины предложенных оценок.

Ключевые слова: проектирование, остойчивость на больших углах крена, диаграмма статической остойчивости, математическая модель, оптимизация.

THE APPROACH TO EVALUATION OF VESSEL'S SAFETY IN TERMS OF STABILITY AT THE INITIAL STAGES OF DESIGN

Aleksandr I. Gaikovich

the professor, Dr.Sci.Tech., professor of the department of ship design
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Nikolay V. Nikitin

the professor, Dr.Sci.Tech., professor of department of ship design
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Vay Jan Vin Khtve

Postgraduate student

State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: kogugu90@gmail.com

Abstract

The article deals with the problem of including requirements for stability at large list angles in the mathematical model of optimization of the main characteristics of the designed vessel. It is assumed that the procedure for generating a theoretical drawing is not available. To use the static stability diagram (Reed diagram), its approximation is used, proposed by V.G. Vlasov. The place of the proposed module is shown, which is related to the stability at large list angles, in the sequence of search for the main dimensions of the vessel and its coefficients of fullness at the initial design stages. A partial system of functional restrictions of the optimization problem was formulated, reflecting the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) in terms of vessel stability. Restrictions contain requirements for static stability diagram and weather criterion. The forms of the vessel's safety

assessment in terms of stability are proposed, which are based on comparison with the minimum requirements of the RMRS. A software package has been developed for studying the influence of shipbuilding elements of the vessel on the values of the proposed assessments.

Keywords: design, stability at large list angles, static stability diagram, mathematical model, optimization.

Основная задача начальных стадий проектирования получить максимальный объем информации, включающей главные размерения проектируемого судна и интегральные характеристики формы корпуса в отсутствии теоретического чертежа и чертежей общего расположения. Математическая модель проекта на данном этапе должна быть полностью аналитической. В неё входят основные соотношения теории проектирования судов: уравнения и (или) неравенства нагрузки, вместимости, начальной остойчивости, ходкости, эмпирические зависимости, базирующиеся на статистике характеристик судов-прототипов [1]. Кроме того, решение оптимизационной задачи подразумевает автоматический режим решения без участия проектанта.

Качество проектирования обеспечивается обоснованностью проектных решений. Применение оптимизационных технологий на базе системного анализа позволяет увеличить сопоставляемых вариантов проекта и определить наилучший вариант по принятому критерию эффективности. В основе оптимизационной технологии проектирования лежит формулировка задачи проектирования судна как задачи математического программирования [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{C}(C_1, \dots, C_q) \\ \mathbf{X} &= \mathbf{X}(X_1, \dots, X_n) \\ (\mathbf{X})_{\min} &\leq \mathbf{X} \leq (\mathbf{X})_{\max} \\ G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C}) &\geq A_j(\mathbf{C}), \quad j=1, \dots, m \\ Z(\mathbf{X}, \mathbf{C}) &\rightarrow \text{extr} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{C}$ -- вектор технического задания (ТЗ) на проектирование; $\mathbf{X}$ -- вектор оптимизируемых параметров проекта; $(\mathbf{X})_{\min}$, $(\mathbf{X})_{\max}$ -- параметрические ограничения на диапазон изменения компонентов вектора $\mathbf{X}$; $G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ -- функции оценок j -ых качеств корабля; $A_j(\mathbf{C})$ -- функции требований к j -м качествам корабля; $Z(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ -- критерий эффективности или функцию цели для выбора наилучшего варианта.

Совокупность компонентов оптимизационной задачи (1) представляет собой математическую модель проектируемого корабля. В системе функциональных ограничений $G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C}) \geq A_j(\mathbf{C})$ обязательно должны включаться условия целостности и существования корабля как сложной технической системы.

Требования остойчивости, безусловно, относятся к таким критичным функциональным ограничениям и должны учитываться уже на самых начальных стадиях проектирования.

Требования остойчивости в классической теории проектирования отображается уравнением остойчивости [1]:

$$\bar{h} = k_C \cdot \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\delta}} \cdot \frac{T}{B} + k_P \cdot \frac{\alpha^2}{\delta} \cdot \frac{B}{T} - a_{ZG} \cdot \frac{T}{B} \cdot \frac{H}{T} \quad (2)$$

где $\bar{h}$ -- относительная поперечная метацентрическая высота, предполагаемая

элементом технического задания; k_C , k_P , a_{ZG} -- эмпирические коэффициенты для определения аппликаты центра величины, поперечного метацентрического радиуса и аппликаты центра тяжести судна соответственно; δ , α -- коэффициенты общей полноты и полноты конструктивной ватерлинии соответственно, Н/Т -- отношение высоты борта к осадке полного водоизмещения, полученное из уравнения вместимости или требований запаса плавучести; В/Т -- отношение ширины к осадке полного водоизмещения, которое является результатом решения уравнения (2). В математической модели (1) соотношение (2) преобразуется в неравенство.

Однако условием (2) требования остойчивости не исчерпываются. Российский Морской Регистр Судоходства (РМРС) оценивает достаточность остойчивость судна на основании критерия погоды и требований к диаграмме статической остойчивости (далее диаграмма Риды) [3].

Сводка этих требований сводится к следующему:

- I. Максимум плеча при угле не меньше 30° должен быть не меньше 0,2 м.
- II. Угол заката диаграммы не меньше 60° .
- III. Площадь диаграммы в пределах углов крена $0^\circ \dots 30^\circ$ должна быть не меньше 0,055 м²·рад.
- IV. Площадь диаграммы в пределах углов крена $30^\circ \dots 40^\circ$ должна быть не меньше 0,030 м²·рад.
- V. Площадь диаграммы в пределах углов крена $0^\circ \dots 40^\circ$ должна быть не меньше 0,090 м²·рад.
- VI. Остойчивость судна по критерию погоды К считается достаточной если критерий погоды больше или равен 1.

Диаграмма Риды строится на основании разработанного теоретического чертежа, которого может ещё не быть на начальных стадиях проектирования или отсутствует возможность его генерации в рамках математической модели проектируемого корабля (1).

Диаграмма может аппроксимироваться функцией, зависящей от главных размерений судна и интегральных характеристик формы его корпуса (коэффициентов полноты).

Известны несколько таких аппроксимаций: В.Л. Поздюнина, Г.Е. Павленко, В.Г. Власова, М.Л. Ольминского, Н.А. Заботкина [4], С.Н. Благовещенского, В.В. Семенова-Тян-Шанского [5], А.В. Самохвалова [6], Карпова А.Б. [7], А.И. Ракова и А.Я. Чапичевой [8], П.А. Савичева [9] Д.Ч. Манинга [10].

Были сопоставлены аппроксимации для универсального сухогрузного судна проекта 1590 (рис. 1) со следующими характеристиками:

Длина по КВЛ (L)	123,7 м
Ширина по КВЛ (B)	17,0 м
Высота борта (H)	8,5 м

Осадка в полном грузу (Т) ... 7,0 м
 Полное водоизмещение (D)..... 10767 т
 Коэффициент общей полноты (δ) 0,690
 Коэффициент полноты КВЛ (α) 0,800
 Коэффициент полноты
 мидель-шпангоута (β) 0,970



Рис. 1. Сухогрузное судно пр. 1590 «Пионер Сахалина»

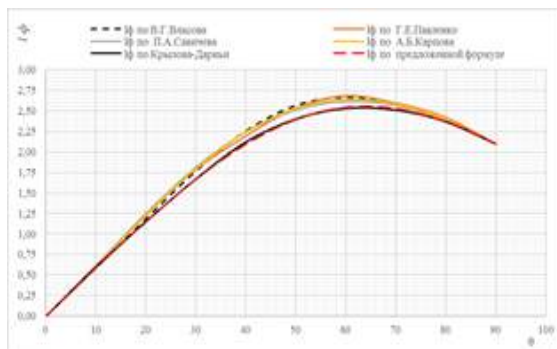


Рис.2. Сопоставление аппроксимаций диаграммы Риды в плечах

Для данного судна рассчитывалась диаграмма Риды для полного водоизмещения по аппроксимациям В.Г. Власова, П.А. Савичева, Г.В. Павленко, А.Б. Карпова и точным методом Крылова – Дарны [5].

Сопоставление результатов показано на рис.2.

Для базы была выбрана аппроксимация В.Г. Власова для вычисления диаграммы Риды l_θ , имеющая вид:

$$l_\theta = b \cdot f_1(\theta) + h \cdot f_2(\theta) + r_0 \cdot f_3(\theta) + r_{90} \cdot f_4(\theta) - a \cdot \sin(\theta) \quad (3)$$

где θ – угол крена; b, h – определяются по формулам, указанным в [4]:

$$b = 0,5 \cdot (1 - C \cdot T/H_1) \cdot B \quad (4)$$

$$h = C_1 \cdot (1 - C_2 \cdot T/H_1) \cdot H_1 \quad (5)$$

r_0, r_{90} – метacentрические радиусы судна в прямом положении и при крене 90° ищутся по выражениям [1]:

$$r_0 = 0,0877 \cdot (\alpha^2/\delta) \cdot B^2/T \quad (6)$$

$$r_{90} = r_0 \cdot (h/b)^3 \quad (7)$$

Параметр a в (1) равен:

$$a = z_G - z_C \quad (8)$$

Аппликата центра величины в прямом положении судна z_C [1]:

$$z_C = 1,02 \cdot T/(1 + \delta/\alpha) \quad (9)$$

Аппликата центра тяжести судна в полном грузу z_G :

$$z_G = a_{zG} \cdot H \quad (10)$$

В формуле (10) коэффициент a_{zG} определяется пересчетом по прототипу.

В формулах (4) и (5) значения коэффициентов приняты равными в соответствии с [4]: $C = 0,972$; $C_1 = 0,640$; $C_2 = 1,032$.

Величина H_1 определяется по выражению [4]:

$$H_1 = [1 + (\delta/\alpha) \cdot (V_H/V)] \cdot H \quad (11)$$

где V_H – сумма всех объемов, расположенных выше ватерлинии, соответствующей осадке равной высоте борта H ; V – водоизмещение судна при осадке равной высоте борта H .

Упростим формулу (11) предполагая, что $V_H = \alpha \cdot L \cdot B \cdot (H - T)$, а $V = \delta \cdot L \cdot B \cdot T$.

Тогда величина H_1 будет определяться как:

$$H_1 = \{1 + (\delta/\alpha) \cdot [\alpha \cdot L \cdot B \cdot (H - T)/(\delta \cdot L \cdot B \cdot T)]\} \cdot H = \{1 + H/T - 1\} \cdot H = H^2/T \quad (12)$$

Воспользуемся эмпирической зависимостью между коэффициентами общей полноты и полноты КВЛ [1]:

$$\alpha = 0,98 \cdot \delta^{1/2} \quad (13)$$

Значения коэффициентов (4) ... (8) могут быть представлены в виде:

$$b = B \cdot [0,5 - 0,486 \cdot (T/H)^2] \quad (14)$$

$$h = T \cdot [0,64 \cdot (H/T)^2 - 0,66] \quad (15)$$

$$r_0 = 0,0842 \cdot B^2/T \quad (16)$$

$$r_{90} = 0,0842 \cdot T \cdot (T/B) \cdot \{[0,64 \cdot (H/T)^2 - 0,66]/[0,5 - 0,486 \cdot (T/H)^2]\}^3 \quad (17)$$

С учетом (10) и (13):

$$a = T \cdot [a_{zG} \cdot H/T - 1/(0,98 + \delta^{1/2})] \quad (18)$$

Для аппроксимации диаграммы Риды в виде (3) были получены аналитические выражения для функций $f_1 \dots f_4$, показанные ниже.

$$f_1(\theta) = -0,125 \sin(4\theta) + 1,095 \sin(2\theta) - 0,282 \sin(6\theta) \quad (19)$$

$$f_2(\theta) = \sin\theta - 0,125 \sin(4\theta) - 1,095 \sin(2\theta) + 0,282 \sin(6\theta) \quad (20)$$

$$f_3(\theta) = 0,125 \sin(4\theta) - 0,0313 \sin(2\theta) + 0,094 \sin(6\theta) \quad (21)$$

$$f_4(\theta) = 0,125 \sin(4\theta) + 0,0313 \sin(2\theta) - 0,094 \sin(6\theta) \quad (22)$$

где угол крена θ в градусах, $R_1 \dots R_4$ -- коэффициенты корреляции.

Коэффициенты (14) ... (18), аппроксимирующие диаграмму Риды по В.Г. Власову, зависят от параметров проекта: B – ширина по КВЛ; T – осадка при полном водоизмещении; B/T – отношение

ширины к осадке; H/T – отношение высоты борта на миделе к осадке; δ – коэффициент общей полноты.

С использованием полученной аппроксимации диаграммы Риды можно проверить выполнение требований Регистра по остойчивости, сформулированных выше.

Параметры полученной аппроксимации диаграммы Риды определяются из уравнений и соотношений теории проектирования [2]. При использовании метода последовательных приближений расчет этих параметров может быть реализован, например, алгоритмом, показанном на рис. 3.

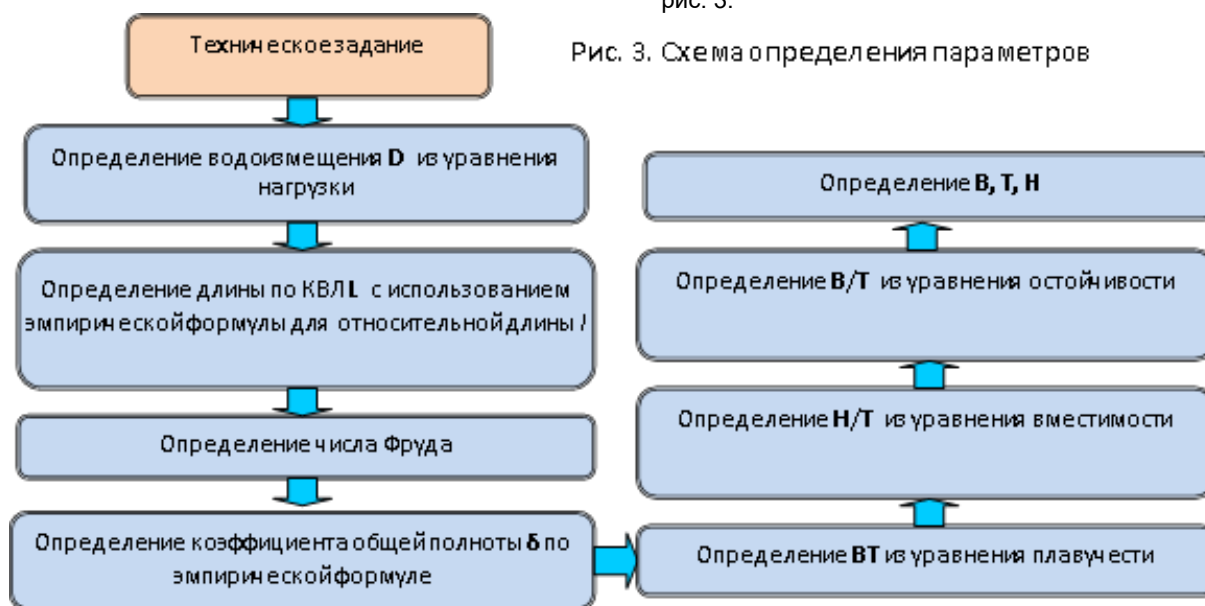


Рис. 3. Схема определения параметров

Используя полученную аппроксимацию диаграммы Риды (3), получим систему ограничений $I - V$ по требованию РМРС:

$$I. \quad B[0,42 - 0,408(T/H)^2] - B/(B/T)[0,356(H/T)^2 - 0,367] + 0,00696B(B/T) + 0,0114 \cdot B/(B/T)^2 \times \{[0,64(H/T)^2 - 0,66] / [0,5 - 0,486(T/H)^2]\}^3 - B/(B/T)[az_G(H/T) - 1/(0,98 + \delta^{1/2})]0,5 \geq 0,20 \quad (23)$$

$$II. \quad B[0,528 - 0,513(T/H)^2] + B/(B/T) \cdot [0,0166 \cdot (H/T)^2 - 0,0171] - 0,0114 \cdot B \cdot (B/T) - 0,00682B/(B/T)^2 \times \{[0,64(H/T)^2 - 0,66] / [0,5 - 0,486(T/H)^2]\}^3 - B/(B/T)[az_G(H/T) - 1/(0,98 + \delta^{1/2})]0,866 \geq 0 \quad (24)$$

$$III. \quad B[0,0665 - 0,0646(T/H)^2] - B/(B/T)[0,0595 \cdot (H/T)^2 - 0,614] + 0,00589 \cdot B \cdot (B/T) + 0,00194 \cdot B/(B/T)^2 \times \{[0,64(H/T)^2 - 0,66] / [0,5 - 0,486(T/H)^2]\}^3 - B/(B/T)[az_G(H/T) - 1/(0,98 + \delta^{1/2})]0,134 \geq 0,055 \quad (25)$$

$$IV. \quad B[0,094 - 0,0914(T/H)^2] + B/(B/T)[0,0742 \cdot (H/T)^2 - 0,0766] + 0,00007 \cdot B \cdot (B/T) + 0,00227B/(B/T)^2 \times \{[0,64(H/T)^2 - 0,66] / [0,5 - 0,486(T/H)^2]\}^3 - B/(B/T)[az_G(H/T) - 1/(0,98 + \delta^{1/2})]0,1 \geq 0,030 \quad (26)$$

$$V. \quad B[0,1605 - 0,156(T/H)^2] - B/(B/T)[0,133(H/T)^2 - 0,137] + 0,006B(B/T) + 0,00421 B/(B/T)^2 \times \{[0,64(H/T)^2 - 0,66] / [0,5 - 0,486(T/H)^2]\}^3 - B/(B/T)[az_G(H/T) - 1/(0,98 + \delta^{1/2})]0,234 \geq 0,090 \quad (27)$$

Для расчета критерия погоды используется схема из [3], показанная на рис. 4.

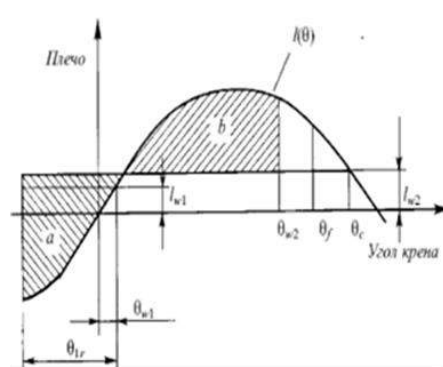


Рис. 4. Требование к остойчивости судна по критерию погоды

Кренящее плечо l_{w1} м, принимается постоянным для всех углов крена и рассчитывается по формуле:

$$l_{w1} = p_v \cdot A_v \cdot z_v / (1000 \cdot g \cdot D) \quad (28)$$

где p_v – давление ветра, равное 504 Па для судов неограниченного района плавания; z_v – плечо парусности, м, принимаемое равным приблизительно измеренному по вертикали расстоянию от центра площади парусности A_v до середины осадки судна; g – ускорение свободного падения 9,81 м/сек²; D – водоизмещение судна. С учетом допущений:

$$l_{w1} = 0,0514 \cdot A_v \cdot z_v / D, \quad (28')$$

На начальных стадиях проектирования площадь парусности можно определить как сумму парусности корпуса, надстройки и палубного груза и конструкций, описанные как прямоугольники:

$$A_v = P \cdot L \cdot T \cdot (H/T - 1) \quad (29)$$

где $P \equiv (1 + k_n + k_p)$; $k_n > 0$ – коэффициент развитости надстроек, $k_p \geq 0$ – коэффициент учета парусности палубного груза и оборудования; A_k – площадь проекции корпуса на диаметрально плоскость; L – длина судна по конструктивной ватерлинии, H – высота борта на миделе, T – осадка.

Плечо парусности в соответствии с требованиями РМРС и допущений:

$$z_v = T \cdot (H/T - 1) \cdot Q/P + T/2 \quad (30)$$

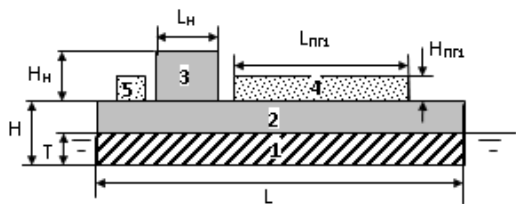


Рис. 5. Схема расчета площади парусности для начальных стадий проектирования судна
1 — подводная часть корпуса; 2 — надводная часть корпуса; 3 — надстройка; 4 — носовой штабель палубного груза; 5 — кормовой штабель палубного груза

где $Q \equiv 1/2 + k_n \cdot (az_{vn} + 1) + k_p \cdot (az_{vp} + 1)$; az_{vn} – относительная высота ЦТ проекции надстройки на ДП от палубы в долях надводного борта (полученные пересчетом с прототипа); az_{vp} – относительная высота ЦТ проекции палубного груза и палубного оборудования на ДП от палубы в долях надводного борта (полученные пересчетом с прототипа).

Используя уравнение плавучести, и, преобразуя (28'), получим

$$l_{w1} = [0,0501(H/T - 1)^2 Q + 0,0251(H/T - 1)^2 P] / (\delta \cdot (V/T)) \quad (31)$$

Кренящее плечо l_{w2} определяется по формуле

$$l_{w2} = 1,5 \cdot l_{w1} \quad (32)$$

Амплитуда качки судна с круглой скулой θ_{1r} с учетом сделанных предположений и допущений:

$$\theta_{1r} = 109 k (1,353 - 0,152(V/T) / 0,318 + 1,006 \cdot \delta \cdot x (0,128 - 0,005 \cdot 0,73 \cdot V / h^{1/2})^{1/2} \quad (33)$$

где k – коэффициент, учитывающий наличие скуловых килей; t – период качки, h – поперечная метacentрическая высота.

Для определения угла крена θ_{w3} в радианах и соответствующего начала области «б» под диаграммой Рида, используем метacentрическую формулой:

$$\theta_{w3} = l_{w2}/h \quad (34)$$

В качестве угла θ_{w2} примем угол крена $50^\circ = 0,873$ рад в соответствии с п. 2.1.2.4 части IV «Остойчивость» Правил РМРС.

Тогда площадь «б» может быть рассчитана по выражению:

$$S_b = \int_{\theta_{w3}}^{\theta_{w2}} l(\theta) d\theta - (\theta_{w2} - \theta_{w3}) \cdot l_{w2} \quad (35)$$

где $l(\theta)$ -- аппроксимация диаграммы Рида (3).

Площадь фигуры «а» определяется по выражению:

$$S_a = abs(\int_{(\theta_{1r} - \theta_{w1})}^0 l(\theta) d\theta) + (\theta_{1r} - \theta_{w1} + 0,5 \cdot \theta_{w3}) \cdot l_{w2} \quad (36)$$

Требования к остойчивости судна по критерию погоды КР:

$$KR = S_b/S_a > 1 \quad (37)$$

Итоговые формулы (23) ... (27) и (37) позволяют рассчитать критерий погоды КР и включить все требования к остойчивости на больших углах крена в аналитическую модель проектирования судна на начальных стадиях (1).

Использование аппроксимированной диаграммы Рида позволяет сопоставить варианты проекта, в том числе и при решении задачи оптимизации, по уровню безопасности. Действительно, Правила РМРС задают минимальный уровень безопасности по остойчивости. Чем параметры диаграммы Рида и значение критерия погоды больше минимальных значений, тем выше безопасность по остойчивости у проектируемого судна.

Предлагается ввести безразмерную оценку безопасности BO_i по каждому i -му требованию к остойчивости в виде:

$$BO_i = \lambda_i \left(\frac{bo_i}{[bo_i]} - 1 \right) \quad (38)$$

где λ_i – весовой коэффициент; bo_i – левые части (23) ... (27) и фактическое значение критерия погоды КР; $[bo_i]$ – правые части (23) ... (27) и значение критерия погоды равно 1. Если хотя бы один из отдельных показателей отрицателен, то общая оценка безопасности будет считаться равной 0.

Для исследования предлагаемой оценки был разработан программный комплекс, интерфейс которого показан на рис. 6.

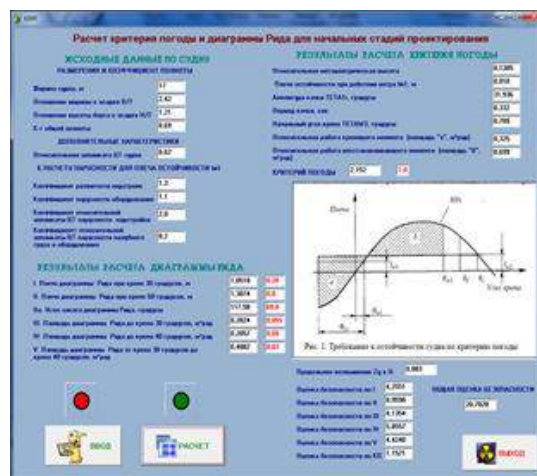


Рис. 6. Интерфейс программного комплекса для исследования остойчивости

Суммарная оценка безопасности судна по остойчивости ВО может быть представлена в нескольких видах, например:

$$BO = \min \{BO_i\}, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (39)$$

$$BO = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 BO_i \quad (40)$$

Для судна пр. 1590 величина оценки (39) оказалась равной оценке $BO_2 = 0,96$, а оценка (40) равна 3,46.

Оценки (39) и (40) зависят от параметров аппроксимации диаграммы Ридса, и, следовательно, от главных размерений, коэффициентов полноты и некоторых дополнительных характеристик.

С помощью разработанного программного комплекса можно численно получить значения производных функций ограничений по остойчивости, например, по главным размерениям судна. Тогда, имея предварительное значение стоимости одной тонны водоизмещения, можно оценить стоимость «единицу безопасности» по (39) и (40) в денежном эквиваленте.

Литература

1. Ашик В.В. Проектирование судов. – Л., изд. «Судостроение», 1985, 320 с.
2. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». – СПб., изд. НИЦ МОРИНТЕХ, 2014, 872 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Т.1, часть IV «Остойчивость» -- СПб., Российский Морской Регистр Судоходства, 2012.
4. Благовещенский С.Н. Справочник по теории корабля. -- Л., изд. Судпромгиз, 1950, 567 с.
5. Семенов-Тянь-Шанский. Статика и динамика корабля. – Л., изд. Судпромгиз, 1960, 576 с.
6. Самохвалов А.В. Обеспечение требований Регистра СССР по остойчивости при определении главных размерений и коэффициентов полноты сухогрузных судов. Автореферат диссертации. – Л., изд. ЛКИ, 1972, 17 с.
7. Карпов А.Б. Определение остойчивости при больших наклонениях в начальной стадии проектирования судна. – «Судостроение», 1982, №8, с. 8 – 9.
8. Раков А.И., Чапичева А.Я. Определение плеча остойчивости формы на ранних стадиях проектирования. -- «Судостроение», 1983, № 6, с.14 – 15
9. Савичев П.А. Приближенные формулы для определения плеч остойчивости формы. – «Судостроение», 1986, №3, с. 5 – 7.
10. Манинг Д.Ч. Теория и техника проектирования кораблей. – М., изд. Воениздат, 1960, 292 с.
11. Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Том 1. Статика корабля. – Л., изд. «Судостроение», 1976, 336 с.
12. Белоцерковский М.А. К вопросу о построении диаграмм остойчивости по диаграммам прототипа. – «Судостроение», 1939, №9 (93), с. 484 – 489

References

1. Ashik V.V. Proektirovanie sudov. – L., izd. «Sudostroenie», 1985, 320 s.
2. Gajkovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchih korablej i sudov. T.2. Analiz i sintez si-stemy «Korabl'». – Spb., izd. NIC MORINTEH, 2014, 872 s.
3. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov. T.1, chast' IV «Ostojchivost'» -- SPb., Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva, 2012.
4. Blagoveshchenskij S.N. Spravochnik po teorii korablya. -- L., izd. Sudpromgiz, 1950, 567 s.
5. Semenov-Tyan-Shanskij. Statika i dinamika korablya. – L., izd. Sudpromgiz, 1960, 576 s.
6. Samohvalov A.V. Obespechenie trebovanij Registra SSSR po ostojchivosti pri opredelenii glav-nyh razmerenij i koefficientov polnoty suhogruznyh sudov. Avtoreferat dissertacii. – L., izd. LKI, 1972, 17 s.
7. Karpov A.B. Opredelenie ostojchivosti pri bol'shikh nakloneniyah v nachal'noj stadii proektirova-niya sudna. – «Sudostroenie», 1982, №8, s. 8 – 9.
8. Rakov A.I., Chapicheva A.Ya. Opredelenie plecha ostojchivosti formy na rannih stadiyah proektirova-niya. -- «Sudostroenie», 1983, № 6, s.14 – 15
9. Savichev P.A. Priblizhennye formuly dlya opredeleniya plech ostojchivosti formy. – «Sudostroenie», 1986, №3, s. 5 – 7.
10. Maning D.Ch. Teoriya i tekhnika proektirovaniya korablej. – M., izd. Voenizdat, 1960, 292 s.
11. Blagoveshchenskij S.N., Holodilin A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. Tom 1. Statika korablya. – L., izd. «Sudostroenie», 1976, 336 s.
12. Belocerkovskij M.A. K voprosu o postroenii diagramm ostojchivosti po diagrammam prototipa. – «Sudostroenie», 1939, №9 (93), s. 484 – 489

УДК 629.5.01

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОРПУСА КРУПНОТОННАЖНОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Владимир Николаевич Тряскин

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Синьянь Юй

аспирант кафедры конструкции и технической эксплуатации судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

Аннотация

Размеры элементов конструкций корпуса судна, удовлетворяющие требованиям Правил классификационных организаций, определяются в процессе параметрического проектирования конструкций корпуса судна. Методология параметрического проектирования, обоснованная в исследованиях, выполненных на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ, базируется на методическом принципе проектирования снизу вверх: от проектирования конструктивных элементов до проектирования рамного набора перекрытий и продольных связей эквивалентного бруса. Параметрическое проектирование листовых и балочных элементов – структурных составляющих нижнего иерархического уровня конструктивной декомпозиции в соответствии с требованиями к местной прочности – первый этап процесса проектирования. Допускаемые напряжения, входящие в условия местной прочности Правил в общем случае определяются с учетом вклада напряжений от общих деформаций корпуса в общее напряженное состояние элемента конструкции. Для определения этих напряжений необходимо знать окончательно принятые характеристики поперечного сечения корпуса судна.

Излагается методический подход подготовки исходной информации для параметрического проектирования элементов нижнего иерархического уровня конструктивной декомпозиции корпуса крупнотоннажных контейнеровозов. Предложена методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций, которая базируется на сборе и систематизации статистической информации, полученной в процессе обработки данных конструктивных чертежей реальных судов, с учетом нормативных требований Правил DnV-GL и унифицированного требования МАКО S11A. Для обработки статистической информации и построения соответствующих расчетных зависимостей предложен оригинальный алгоритм.

Ключевые слова: крупнотоннажные контейнеровозы, параметрическое проектирование корпусных конструкций, правила классификационных обществ, методология параметрического проектирования конструкций, УТ МАКО, характеристики поперечного сечения корпуса, UR S11A

METHODOLOGY OF HULL GIRDER CROSS-SECTIONAL CHARACTERISTICS ESTIMATION ON THE PRELIMINARY STAGE OF LARGE CONTAINERSHIPS STRUCTURAL DESIGN

Vladimir N. Tryaskin

the professor, Dr.Sci.Tech.
head of ship structure and technical operation department,
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Xinyan Yu

M.Eng.
post-graduate student of ship structure and technical operation department
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

Abstract

The scantlings of structural elements of the ship's hull that meet the requirements of the Rules of classification Societies are determined in the process of parametric design of ship's hull structures. The methodology of parametric design, justified in studies carried out at the department of ship structure and

technical operation of St. Petersburg State Marine Technical University, is based on the methodological design principle from the “down to up”: from design of structural elements to design of the primary support members and hull girder longitudinal members. Parametric design of plate and beam elements - structural components of the lower hierarchical level of structural decomposition in accordance with the requirements for local strength - the first stage of the design process. Permissible stresses that are including in the local strength requirements of the Rules are generally determined taking into account the contribution of stresses from the general deformations of the hull to the general stress of the structural element. To determine these stresses, it is necessary to know the finally adopted characteristics of the cross section of the hull.

A methodical approach to the preparation of initial information for the parametric design of elements of the lower hierarchical level of structural decomposition of the hull in application to large-tonnage container vessels is described. A technique is proposed for evaluating the characteristics of the hull cross section at the early stages of the ship hull structures design, which is based on the collection and systematization of statistical information obtained in the process of processing data from structural drawings of real ships, taking into account the regulatory requirements of the DnV-GL Rules and the unified IACS S11A requirement. An original algorithm is proposed for processing statistical information and constructing the corresponding calculated dependencies.

Key words: DnV-GL Rules, large-tonnage container vessels, parametric design of hull structures on the early stage of vessel's designing, methodology of parametric design, hull girder cross section characteristics, statistical information in application to modern container vessels, UR S11A

Введение

Размеры элементов конструкций, удовлетворяющие требованиям нормативных документов (Правил классификационных организаций / Норм прочности), определяются в процессе реализации процедур параметрического проектирования. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна обоснована в исследованиях, выполненных на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов [1]. Результаты этих исследований представлены в ряде кандидатских диссертаций [2, 3], и обобщены в докторской диссертации [4]. Методологические принципы параметрического проектирования конструкций: системный подход; моделирование (компьютерное, в том числе) как один из основных методов решения задач проектирования; рациональная (эффективная) стратегия проектирования, основанная на итерационных поисковых процедурах, учитывающая накопленный опыт и особенности эволюции методов проектирования.

Предложенная стратегия параметрического проектирования реализует методический принцип (последовательность) проектирования «от простой модели к сложной»: от проектирования конструктивных элементов (листовых, балочных) до проектирования рамного набора перекрытий и продольных связей эквивалентного бруса. Значения конструктивных параметров, полученные в результате работы с моделью нижнего уровня, используются в математической модели задачи проектирования следующего уровня в качестве ограничений «снизу». Возможное изменение таких параметров – поисковое увеличение значения в случае доминирования проектировочного условия на рассматриваемом уровне проектирования.

На завершающем этапе проектирования предусматривается процедура «перехода» от расчетных к фактическим (принятым в конструкции - построечным) значениям конструктивных параметров. Последующий проверочный расчет конструкций рассматривается как заключительная итерация параметрического проектирования корпусной конструкции.

Такой принцип организации процесса параметрического проектирования представляет собой модель проектирования. Впервые этот методический принцип предложен специалистами кафедры Конструкции судов СПбГМТУ (ЛКИ). Эффективность его подтверждена многолетними работами кафедры по проблеме автоматизированного проектирования конструкций.

В соответствии с предложенной стратегией параметрическое проектирование конструкций корпуса судна начинается с проектирования листовых и балочных элементов (элементов нижнего иерархического уровня конструктивной декомпозиции) в соответствии с требованиями к местной прочности. Допускаемые напряжения в условиях местной прочности в общем случае определяются с учетом вклада напряжений от общих деформаций корпуса в общее напряженное состояние элемента конструкции. Так в Правилах DnV-GL для контейнеровозов (Structural Rules for Container Ships [5]) допускаемые местные напряжения для элементов листовых конструкций определяются по формуле

$$\sigma_{pl} = \sqrt{\sigma_{perm}^2 - 3\tau_L^2} - 0.89\sigma_L \quad (1)$$

а для продольных балок основного набора – по формуле:

$$\sigma_{pr} = \sigma_{perm} - |\sigma_L| \quad (2)$$

где σ_{perm} – допускаемые суммарные напряжения в рассматриваемом элементе конструкции, зависящие от типа рассматриваемого элемента и предела текучести материала; σ_L и τ_L – расчетные нормальные и касательные напряжения, обусловленные в общем случае общим изгибом и кручением корпуса судна.

Для определения напряжений σ_L и τ_L необходимо знать окончательные (фактические) геометрические характеристики поперечного сечения корпуса судна (эквивалентного бруса), которые могут быть получены только на завершающем этапе проектирования конструкций. В связи с этим достаточно точная оценка фактических значений характеристик поперечного

сечения корпуса судна на начальных этапах проектирования является актуальной задачей. Для решения этой проблемы нужно располагать представительными статистическими данными, позволяющими оценить следующие характеристики поперечного сечения корпуса судна: центральные моменты инерции относительно горизонтальной, I_y , и вертикальной,

I_z , нейтральных осей, m^4 ; аппликату нейтральной оси относительно основной плоскости, z_n , м; момент сопротивления поперечного сечения на уровне верхней палубы (верхней фибры эквивалентного бруса), $Z_{d(c)}$ и на уровне дна, Z_b , m^3 , момент инерции чистого кручения I_T , m^4 и секториальный момент инерции I_ω , m^6 .

В данной работе предложена методика оценки только характеристик I_y , I_z , z_n , $Z_{d(c)}$ и Z_b применительно крупнотоннажным контейнеровозам с контейнерной вместимостью 10 – 20 тыс. TEU¹, которая базируется на сборе, систематизации и обработке статистической информации. Статистическая информация была получена в процессе обработки данных конструктивных чертежей реальных судов с учетом нормативных требований Правил DnV-GL [5] и требований Правил PMPC [6].

Алгоритм и результаты решения задачи

Обработка статистической информации и построение соответствующих расчетных зависимостей выполнялась в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Построение зависимостей главных размерений (длины судна между перпендикулярами L_{pp} , ширины судна B , высоты борта H , расчетной осадки T_{sc}) от контейнерной вместимости судна TEU.

2. Определение расчетной длины судна L .

3. Построение зависимостей соотношений главных размерений (L/B , L/T_{sc} , H/L) и коэффициентов полноты (общей - C_B , ватерлинии - C_W) от расчетной длины судна, L .

4. Построение зависимости относительной аппликаты горизонтальной нейтральной оси, z_n/H от длины судна.

5. Построение аналитической зависимости для определения расчетного значения изгибающего момента на тихой воде, M_S базирываясь на статистических данных.

6. Построение аналитической зависимости для определения расчетного значения волнового изгибающего момента, M_W с учетом рекомендаций Правил DnV-GL.

7. Построение зависимостей центральных моментов инерции, I_y и I_z от длины судна.

8. Построение зависимостей моментов сопротивления на уровне верхней палубы (верхнего пояса эквивалентного бруса), $Z_{d(c)}$ и дна, Z_b от длины судна.

Статистические зависимости главных размерений от контейнерной вместимости судна $TEU \times 10^{-3}$ представлены на рисунках 1-4. Зависимость длины судна между перпендикулярами и проектной (scantling) осадки достаточно хорошо аппроксимируются полиномами соответственно третьего и второго порядков:

$$L_{pp} = 0.0209X^3 - 1.5933X^2 + 40.85X + 36.796 \quad (3)$$

$$T_{sc} = -0.0103X^2 + 0.4224X + 11.701 \quad (4)$$

где $X = TEU \times 10^{-3}$.

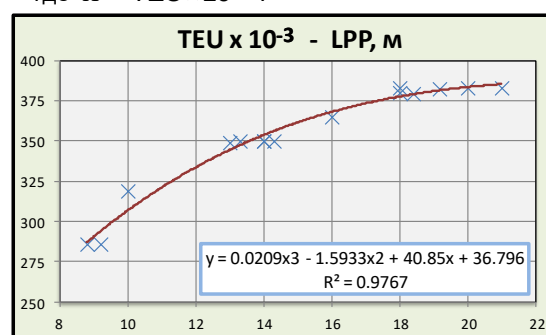


Рис.1 Зависимость длины между перпендикулярами от контейнерной вместимости, $TEU \cdot 10^{-3}$.

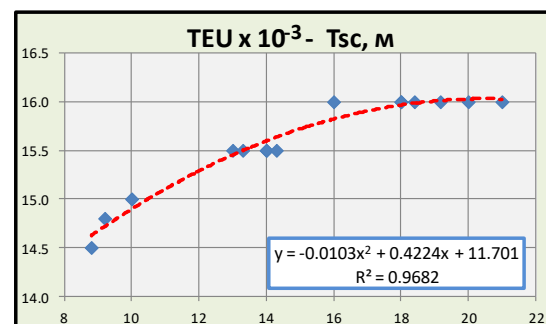


Рис.2 Зависимость расчетной осадки от контейнерной вместимости, $TEU \cdot 10^{-3}$.

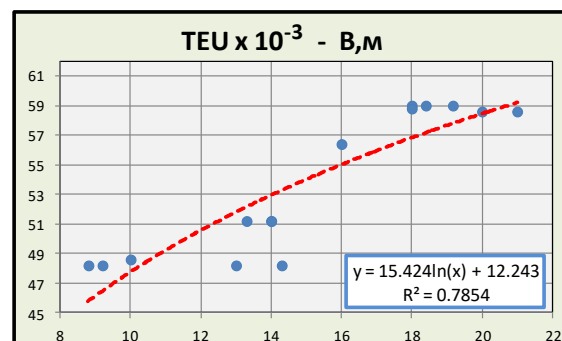


Рис.3 Зависимость ширины судна от контейнерной вместимости, $TEU \cdot 10^{-3}$.

¹ TEU (Twenty foot Equivalent Unit) – специальная единица измерения размеров контейнеровоза,

которая называется «контейнеровместимость» или просто «вместимость»

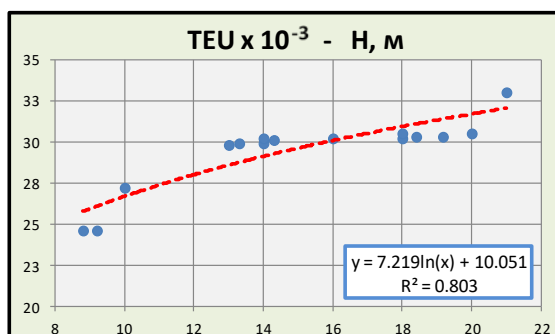


Рис.4 Зависимость высоты борта от контейнерной вместимости, TEU 10-3.

Статистические зависимости ширины, B и высоты борта судна, H скорее отражают тенденцию изменения этих характеристик от контейнерной вместимости. Это связано с тем, что в связи с особенностью груза ширина судна и высота борта изменяются скачкообразно при увеличении контейнерной вместимости.

Расчетная длина судна, L может быть определена по статистике в долях от длины между перпендикулярами. Оценки показывают, что в широком диапазоне контейнеровместимости соотношение расчетной длины и длины между перпендикулярами практически не изменяется и составляет: $k_L = L / L_{pp} \cong 0.985$. Это может быть обосновано влиянием требования Правил по выбору расчетной длины [5]:

$$L = \min \{0.97L_{WL}; \max \{L_{pp}; 0.96L_{WL}\} \} \quad (5)$$

где L_{WL} – длина судна на уровне летней грузовой ватерлинии. Очевидно, что у контейнеровозов величина $0.97L_{WL}$ меньше длины судна между перпендикулярами.

Статистика по соотношениям главных размерений и коэффициентам полноты может быть аппроксимирована следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} L/B &= 1.5035 \ln(L) - 2.3000 \\ L/T_{sc} &= 14.6214 \ln(L) - 63.4436 \\ L/H &= 2.8103 \ln(L) - 4.6645 \\ L/(H+hc) &= 3.3185 \ln(L) - 8.3383 \\ C_B &= 0.0554 \ln(L) + 0.4030 \\ C_W &= 0.0225 \ln(L) + 0.7742 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Относительная аппликата нейтральной оси, z_n/H согласно статистическим данным слабо зависит от длины судна и может быть принята равной ее среднему значению:

$$\frac{z_n}{H} = \left(\frac{z_n}{H} \right)_{average} = 0.455. \text{ Отклонение от этого}$$

значения в диапазоне длин судна $240 \leq L \leq 380$ м не превосходит 3%.

Контейнеровозы в расчетном случае загрузки имеют перегиб (hogging) на тихой воде. Величина расчетного прогибающего момента (sagging) может быть принята равной нулю, $M_{S_{sag}} \cong 0$. Расчетный суммарный изгибающий момент при перегибе, $M_{\Sigma_{hog}} = M_{S_{hog}} + M_{W_{hog}}$, как показывают

оценки, будет больше, чем расчетный суммарный изгибающий момент при прогибе: $|M_{\Sigma_{sag}}| = |M_{S_{sag}}| + |M_{W_{sag}}|$, даже при том, что в величину учитывается дополнительный ударный момент от бортового слеминга.

В связи с этим для выполняемых оценок представляет интерес наибольшая величина расчетного перегибающего момента на тихой воде, $M_{S_{hog}}$. Запишем этот момент в виде следующей аналитической зависимости:

$$M_{S_{hog}} = \frac{g \times L}{k_{M_s}} = \frac{g \rho C_B L^2 B T_{sc}}{k_{M_s}}, \text{ в которой } k_{M_s}$$

– коэффициент момента, определяемый по статистическим данным. Эту зависимость представим в следующей форме:

$$M_{S_{hog}} = \rho g \times \frac{1}{k_{M_s}} \times C_B \times L^4 \times \frac{1}{L/B} \times \frac{1}{L/T_{sc}} \quad (7)$$

где: C_B , L/B , L/T_{sc} – являются функциями расчетной длины судна L (6). В соответствии с данными по реальным проектам коэффициент момента k_{M_s} может быть оценен по формуле:

$$k_{M_s}(L) = 0.1035L + 45.3 \quad (8)$$

обеспечивающей точность предсказания расчетного перегибающего момента на тихой воде $\pm 9.0\%$. Учитывая, что $M_{S_{hog}}$ составляет не более 50% суммарного перегибающего момента, $M_{\Sigma_{hog}} = M_{S_{hog}} + M_{W_{hog}}$, точность оценки суммарного момента будет ок. 4-5%, что допустимо.

Волновой перегибающий изгибающий момент, $M_{W_{hog}}$ определяется зависимостями, представленными в Правилах DnV-GL [5]:

$$M_{(W_{hog})} = 1.5 f_R L^3 C_C W (B/L)^0.8 f_{(NL_{hog})}(L) \quad (9)$$

где:

$$f_R = 0.85$$

$$f_{NL_{hog}}(L) = \min \left\{ 1.1; 0.3 \frac{C_B}{C_W} \sqrt{L} \sqrt{\frac{T_{sc}}{L}} \right\}$$

$$C(L) = 1 - 1.50 \left(1 - \sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} \right)^{2.2}, \text{ если } L \leq L_{ref}$$

$$C(L) = 1 - 0.45 \left(\sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} - 1 \right)^{1.7}, \text{ если } L > L_{ref}$$

$$L_{ref} = 315 [C_W]^{-1.3}$$

Требуемый момент инерции поперечного сечения корпуса судна может быть получен из условия общей прочности, которое в Правилах DnV-GL [5] имеет вид:

$$\sigma_{HG} \leq \sigma_{perm} \quad (10)$$

где σ_{HG} – расчетные напряжения от общего продольного изгиба на уровне верхней палубы или

верхнего пояса эквивалентного бруса, МПа; σ_{perm} – допускаемые напряжения, МПа.

Расчетные напряжения от общего продольного изгиба определяются зависимостью:

$$\sigma_{HG} = \frac{\gamma_S M_S + \gamma_W M_W}{I_{Y_net}} (z - z_n) 10^{-3} \quad (11)$$

где M_S – расчетный изгибающий на тихой воде, кНм; M_W – расчетный волновой изгибающий, кНм.

$\gamma_S = 1$; и $\gamma_W = 1$ – частичные коэффициенты запаса; $\sigma_{perm} = \frac{R_{eH}}{\gamma_1 \gamma_2}$; $\gamma_1 = k \frac{R_{eH}}{235}$ – частный

коэффициент безопасности, учитывающий изменчивость прочностных характеристик материала; $\gamma_2 = 1,24$ – частный коэффициент запаса, учитывающий изменчивость внешних воздействий; $k = f(R_{eH})$ – коэффициент использования механических свойств стали.

Допускаемые напряжения будут зависеть от размеров судна, $\sigma_{perm}(L)$, поскольку статистика по реальным судам позволит получить неявные функции длины судна предела текучести, $R_{eH}(L)$ и коэффициента $k(L)$, от которых зависит эта величина.

Из условия общей прочности (10) может быть получена зависимость для определения требуемого значения момента инерции нетто поперечного сечения корпуса судна относительно горизонтальной нейтральной оси, $I_{Y_net}(L)$:

$$I_{Y_net}(L) = \max\{I_1; I_2\} \quad (12)$$

$$I_1 = I_{Y1_net}(L) = \frac{\gamma_S M_S(L) + \gamma_W M_W(L)}{\sigma_{perm_Coam}(R_{eH_C})} \left(\frac{H + h_C}{L} L - z_n(L) \right) 10^{-3} \quad (13)$$

$$I_2 = I_{Y2_net}(L) = \frac{\gamma_S M_S(L) + \gamma_W M_W(L)}{\sigma_{perm_U-deck}(R_{eH_U-deck})} \left(\frac{H}{L} L - z_n(L) \right) 10^{-3} \quad (14)$$

Расчетная зависимость (12), полученная на основе предложенной методики, представлена на рис. 5.

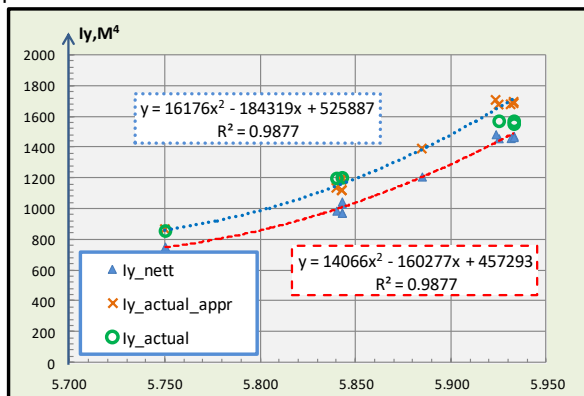


Рис. 5 Зависимость требуемого центрального момента инерции (нетто) I_{net} от логарифма

длины контейнеровоза $\ln(L)$ – красная линия.

Фактический момент инерции при построечных размерах конструктивных элементов можно определить следующим образом:

$$I_{Y_actual}(L) = k_{res} I_{Y_net}(L) \omega_c(L) \quad (15)$$

где $k_{res} \approx 1.05$ некоторый коэффициент, который учитывает, что размеры фактических характеристик элементов конструкции обычно больше требуемых в связи с дискретностью толщин листов, характеристик балок набора, округления требуемых размеров в большую сторону, других факторов; $\omega_c(L) > 1,0$ – коэффициент, учитывающий добавки на коррозионный износ к толщинам конструктивных элементов.

Если построить зависимость $\omega_c(L)$ по конструкциям реальных судов, можно получить значение фактического момента инерции и сравнить их с имеющимися данными по этим судам. Так, если принять значение множителя $\omega_c = 1.10$ – для контейнеровоза с контейнерной вместимостью TEU = 10 – 20 тыс. или ($\ln(L) = 5,75 - 5,93$), что хорошо соответствует реальной статистике, погрешность прогнозирования фактического момента инерции (пунктирная синяя линия на рис.5) не превзойдет 3-5%.

Фактические данные по построенным судам показывают, что момент инерции относительно оси $Z - I_Z$ находится в соответствии с моментом инерции относительно горизонтальной нейтральной оси I_Y . Отношение $C_{Z//} = I_Z / I_Y$ зависит от размеров судна и может быть аппроксимировано полиномом:

$$C_{Z//}(L) = 10.688 \ln(L) - 59.989 \quad (16)$$

Таким образом, при наличии статистической зависимости $I_Y(L)$ значение $I_Z(L)$ может быть однозначно определено по формуле:

$$I_Z(L) = C_{Z//}(L) I_Y(L) \quad (17)$$

При наличии зависимостей $I_{Y_net}(L)$, $\frac{H + h_C}{L}(L)$ или $\frac{H}{L}(L)$, $\frac{z_n}{H}(L)$ определение фактических и требуемых значений моментов сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса, $Z_{d(c)}$, Z_b не представляет проблем.

Заключение

Приведенные выше рекомендации позволяют определить на ранней стадии проектирования требуемые и фактические значения характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажных контейнеровозов. Для определения этих характеристик в любом сечении по длине судна

можно аппроксимировать эпюры этих характеристик за пределами цилиндрической вставки квадратичным полиномом с нулевыми

значениями, например, на кормовом и носовом перпендикулярах. Формы распределения могут быть уточнены по данным статистики.

Литература

1. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск № 2. С. 9-14.
2. Мьинт Кхайн. Методики и алгоритмы автоматизированного параметрического проектирования судовых конструкций. Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009, 183 с.
3. Ле Минь Тху. Методики и алгоритмы автоматизированного проектирования и предремонтной оценки технического состояния конструкций стальных плавучих доков. Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012, 173 с.
4. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, СПб., 2007, 339 с.
5. DnV-GL. Structural Rules for Container Ships
6. Российский морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Part XIX. Additional Requirements for structures of container ships and ships, dedicated primarily to carry their load in containers. Saint-Petersburg. Edition 2019 г.

References

1. Tryaskin V.N. Metodologiya parametriceskogo proektirovaniya konstruktsiy korpusa sudna. [Methodology of parametric designing of ship's hull structures] Transactions of the Krylov State Research Centre, 2018; Special issue 2: pp. 9-14 (in Russian)
2. Mint Khain. Metodiki i algoritmy avtomatizirovannogo parametriceskogo proektirovaniya sudovykh konstruktsiy. [Techniques and algorithms for computer-aided parametric design of ship structures]. Dis. ... cand. tech. sciences. SPb., 2009, 183 p. (in Russian)
3. Le Min Thu. Metodiki i algoritmy avtomatizirovannogo proektirovaniya i predremontnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya konstruktsiy stal'nykh plavuchikh dokov. [Techniques and algorithms for computer-aided design and pre-repair assessment of the technical condition of steel floating dock structures]. Dis. ... cand. tech. sciences. SPb., 2012, 173 p. (in Russian)
4. Tryaskin V.N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruktsiy korpusa sudna. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Methodology of automated design of hull structures. Thesis for the degree of Doctor of Technical Science]. Saint-Petersburg, 2007, 339 p. (in Russian).
5. DnV-GL. Structural Rules for Container Ships
6. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for classification and construction sea-going ships. Part XIX. Additional Requirements for structures of container ships and ships, dedicated primarily to carry their load in containers. Saint-Petersburg. Edition 2019 г.

УДК 629.543:629.5.023.46

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ТАНКЕРНЫХ РАМ В ГРУЗОВОЙ ЧАСТИ КРУПНОТОННАЖНЫХ НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА АППРОКСИМАЦИИ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Кирилл Вадимович Плотников

старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: plotnikov@smtu.ru

Владимир Николаевич Тряскин

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Аннотация

В статье обсуждаются вопросы использования метода планирования эксперимента (МПЭ) при проектировании поперечных танкерных рам в грузовой части крупнотоннажных нефтеналивных судов в соответствии с требованиями Общих Правил МАКО (Common Structural Rules). Поскольку требования этих Правил отличаются большой сложностью и в ряде задач предполагается учитывать взаимосвязь между конструктивными параметрами, при проектировании необходимо использовать специализированные алгоритмы и программное обеспечение. Для описания «поведения» такой подсистемы корпуса судна, как поперечная рама, может эффективно быть использован аппарат аппроксимации МПЭ (численного компьютерного эксперимента), который позволяет установить связь между параметрами, определяющими размеры элементов конструкции, и характеристиками подсистемы (например, массы) в виде многофакторных регрессионных зависимостей. Затем задача проектирования может быть представлена в общем виде задачи математического программирования. В статье показана постановка задачи проектирования конструкций поперечной рамы в центральном грузовом танке судна типа VLCC. В качестве варьируемых параметров приняты относительные значения моментов инерции сечений балок, образующих раму. Показано, что целевая функция и ограничения задачи, построенные на основе требований Правил, с достаточной точностью могут быть аппроксимированы регрессионными моделями второго порядка, а полученные в результате проектирования параметры конструкции близки к реальным проектным значениям.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование конструкций, конструкция корпуса судов, крупнотоннажный танкер, метод планирования эксперимента, нефтеналивные суда, Общие Правила МАКО, оптимизационно-поисковая задача, поперечные рамы, регрессионная модель, танкерные рамы, CSR

STRUCTURAL DESIGN OF OIL TANKERS TRANSVERSE WEBS USING DESIGN OF EXPERIMENTS METHOD

Kirill V. Plotnikov

Dipl.-Eng.

senior lecturer of ship structure and technical operation department,
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: plotnikov@smtu.ru

Vladimir N. Tryaskin

the professor, Dr.Sci.Tech.

head of ship structure and technical operation department,
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Abstract

The paper discusses the application of design of numerical experiments (DoE) method in structural design of ship structures. The object of the study is the design of transverse webs of double hull oil tankers in cargo tank area in accordance with the prescriptive requirements of Common Structural Rules (CSR). Even on preliminary stage of structural design process there is a need for some decision-making support. This is explained with the significant complexity of functional relations between design parameters. For oil tankers primary supporting members' main features are dependence of effective spans, design loads and effective breadth of attached plates on depth of the webs, as well as the dependence of bending moments on stiffness ratios. DoE methodology can help to find adequate

correlations between design parameters determining scantlings and global characteristics of the structure (e.g. mass) as multifactorial regression equations (response surfaces) using a minimal number of analyses. Consequently, nonlinear mathematical programming method to determine the efficient solution can be used. In this paper application of these methods is presented as an algorithm for design process of transverse web in the center tank of VLCC tanker. Moments of inertia are used as variables. Goal function is presented as characteristic of mass of the structure. Constrains are formed with requirements of CSR Prescriptive primarily. The example with results of calculations is also given. It is shown that the goal function and constraints in this model can be accurately approximated with quadratic polynomials. The study shows that obtained results are rather close to the values for existing designs.

Key words: computer-aided structural design, Common Structural Rules, CSR, design of experiments, oil tankers, nonlinear optimization problem, prescriptive rules, primary supporting members, regression models, response surface, ship structural design, transvers webs, VLCC

Введение

Наличие поперечных рамных конструкций в грузовых танках нефтеналивных судов – характерная особенность конструкции корпуса танкера. Высота этих конструкций достигает больших величин в связи с сильным влиянием требований к жесткости элементов рамы. Анализ требований Общих Правил МАКО [1], (далее Правила), в соответствии с которыми должно выполняться проектирование конструкций танкеров длиной более 150 м, показывает, что простого метода проектирования элементов танкерных рам нет в связи с жесткой функциональной зависимостью расчетных изгибающих моментов в элементах рамы от их относительной жесткости, сложной зависимостью расчетных пролетов от размеров рам, а также влиянием размеров балок и опорных книц на величину расчетной нагрузки (при изменении пролета положение расчетной точки для определения нагрузки может существенно меняться).

Вероятно, наиболее сложной будет задача проектирования элементов танкерной рамы в центральном танке для танкеров с двумя продольными переборками. Эта часть рамы состоит из рамного бимса, рамных стоек продольных переборок, иногда перевязанных распорками (рис. 1). В некоторой степени на размеры элементов рамы в центральном танке влияет и рамный бимс бортового танка, поскольку в соответствии с требованиями Правил минимальная высота рамного бимса в центральном танке не должна быть менее 90% высоты рамного бимса в бортовом танке.

В связи со сказанным выше поперечная танкерная рама является сложной подсистемой корпуса судна. Для описания «поведения» этой подсистемы может быть эффективно использован аппарат аппроксимации метода планирования эксперимента, который позволяет установить связь между параметрами, определяющими размеры элементов конструкции, и характеристиками подсистемы (например, массы) в виде многофакторных регрессионных зависимостей. При наличии аналитических зависимостей для целевой функции и ограничений задача проектирования поперечной танкерной рамы может быть представлена в общем виде задачи математического программирования:

минимизировать целевую функцию: $GF(X)$ вектора варьируемых переменных X при

следующих ограничениях в виде равенств, неравенств, а также ограничениях на область допустимых значений варьируемых параметров:

$$\begin{aligned} h_j(X) &= 0, \quad j = 1, \dots, k_h, \\ g_j(X) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, k_g, \\ X_{\min} &\leq X \leq X_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

в которой целевая функция и ограничения представлены в виде много факторных регрессионных моделей, адекватно описывающих «поведение» рассматриваемой подсистемы. Эффективность применения такой методологии при проектировании конструкций корпуса судна обоснована в работах [2, 3]. Можно отметить и зарубежные работы, использующие близкий подход, например [4].

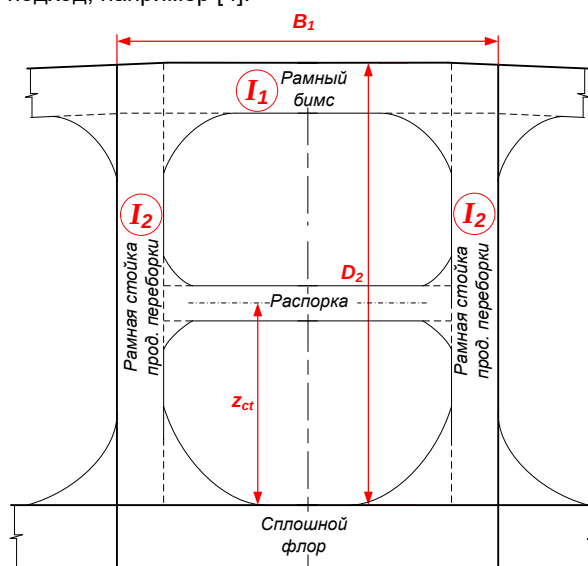


Рис. 1. Схема рамной конструкции в центральном грузовом танке

1. Алгоритм проектирования

Предлагаемая методология решения задачи проектирования поперечных рам грузовых танков нефтеналивных судов может быть реализована в соответствии со следующим алгоритмом:

1). Выбор варьируемых параметров и определение диапазонов их варьирования (границ области допустимых значений).

В общем случае конструкция рамы в центральном танке, представленная на рис. 1,

может определяться следующими независимо варьируемыми параметрами²:

I_1 , см⁴, момент инерции в середине пролета рамного бимса в центральном танке;

I_2 , см⁴, момент инерции в середине пролета рамной стойки в центральном танке;

Z_{ct} , м, аппликата осевой линии распорки, измеренная от второго дна;

R_{en} , МПа, предел текучести материала рамного бимса и рамной стойки.

Предполагаем, что предел текучести материала листов продольной переборки и палубного настила (присоединенных поясков рамного бимса и рамной стойки) – заданные величины. Для упрощения задачи также не учитываем влияние конструкции рамного бимса в бортовом танке.

Моменты инерции поперечного сечения рамных балок танкеров – большие величины. Поэтому удобно оперировать с их относительными значениями,

$\bar{I}_i = I_i / I_{0i}$, приняв в качестве

нормирующих величин I_{0i} минимальные значения моментов инерции, соответствующие минимальным значениям параметров профиля, регламентируемых Правилами из условия жесткости. В качестве нормирующего параметра аппликаты распорки целесообразно принять характерный линейный размер конструкции, например расстояние от второго дна до верхней палубы в ДП, D_2 (рис. 1).

Предел текучести материала – дискретная величина, значение которой выбирается из ограниченного списка. Наиболее подходящее значение может быть выбрано с учетом данных близкого прототипа. В рассматриваемом случае будем считать предел текучести материала балок заданной величиной, хотя задача может решаться и в более общей постановке. При этом одновременно можно получить рекомендации по выбору наиболее рационального предела текучести материала для балок танкерной рамы.

В итоге конструкция рассматриваемой поперечной рамы определяется следующим вектором варьируемых параметров:

$$\tilde{X} = \{\tilde{x}_i\}^T, i = 1, \dots, 3, \quad (2)$$

где: $\tilde{x}_1 = \bar{I}_1$, $\tilde{x}_2 = \bar{I}_2$, $\tilde{x}_3 = \bar{Z}_{ct}$ – соответствующие относительные величины.

Выбор границ области допустимых значений – сложно формализуемый этап. Для решения большинства задач нужно располагать большим практическим опытом и привлекать данные по прототипам. Будем рассматривать алгоритм проектирования, принимая в качестве прототипа конструкцию поперечной рамы в грузовых цистернах супертанкера типа VLCC длиной 350 м [5]. Информация по конструкции-прототипу приведена в табл. 1. Аппликата положения

распорки по высоте поперечной рамы, принятая в конструкции: $\bar{Z}_{ct} = 0,45$.

Указанные данные позволяют принять решение о выборе диапазона варьирования параметров конструкции:

$$1,0 \leq \tilde{x}_1 \leq 2,0; 2,0 \leq \tilde{x}_2 \leq 6,0; 0,25 \leq \tilde{x}_3 \leq 0,75.$$

Таблица 1
Значения моментов инерции балок³, образующих поперечную раму танкера-прототипа

№ п/п	Конструкция	Мин. значения	Факт. значения	Соотношения
		I_{0i} , см ⁴	I_{act_i} , см ⁴	I_{act_i} / I_{0i}
1	Рамный бимс в центр. танке	$2,94 \cdot 10^6$	$3,80 \cdot 10^6$	1,29
2	Рамная стойка в центр. танке*	$3,19 \cdot 10^6$	$9,56 \cdot 10^6$	3,00
			$11,85 \cdot 10^6$	3,75
			$17,99 \cdot 10^6$	5,64
3	Рамный бимс в борт. танке*	$3,80 \cdot 10^6$	$5,29 \cdot 10^6$	1,39

Примечание:

* – даны фактические значения в верхнем опорном сечении, середине пролёта и в нижнем опорном сечении;

** – данные даны для справки.

2). Формирование матрицы планирования эксперимента (численного эксперимента с математической моделью конструкции)

Математические модели, описывающие изменение целевой функции и ограничений, в задачах проектирования конструкций корпуса судна, достаточно простые. В большом количестве случаев можно ограничиться линейными или квадратичными моделями. Поэтому для построения таких моделей предлагается использовать центральное композиционное планирование (ЦКП) [6]. Такое планирование требует относительно небольшого количества численных экспериментов. Оно является ортогональным: если какие-то коэффициенты регрессионной модели являются малозначимыми, элементы регрессии, включающие эти коэффициенты, могут быть отброшены без повторного перестроения модели. Это сокращает трудоемкость построения регрессионных моделей и задачи проектирования в целом.

Для удобства выполнения расчетов независимые переменные (факторы) представляют в кодированном виде. Кодированные значения факторов (+1 – для верхнего уровня; -1 – для нижнего уровня и 0 – для основного) получаются при помощи преобразования

$$x_i = (\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0i}) / \Delta x_i \quad (3)$$

² Параметры, непосредственно определяющие поперечное сечение рамных балок: высота и толщина стенки, ширина и толщина свободного пояска будут определены при подборе профиля под заданное значение момента инерции

³ Требования Правил регламентируют размеры рамных балок с учетом 50-ти процентного износа элементов сечения, т.е. нетто характеристики – net50.

где x_i – кодированное (безразмерное) значение фактора; $\tilde{x}_i$ – натуральное (размерное) значение фактора; $\tilde{x}_{0i}$ – натуральное (размерное) значение основного уровня фактора; Δx_i – интервал варьирования. Обратный переход к натуральному значению осуществляется по формуле

$$\tilde{x}_i = \tilde{x}_{0i} + x_i \Delta x_i. \quad (4)$$

Для построения квадратичных моделей необходимо знать значение функции отклика для трех значений каждого параметра. В ЦКП в пределах области допустимых значений варьируемого параметра рассматриваются: верхний (+1) и нижний (-1) уровни; основной уровень (0) и уровни фактора, отстоящие от основного на величину так называемого звездного плеча (+ α) и (- α). Значение звездного плеча зависит от количества варьируемых параметров и общего количества экспериментов. Общее количество экспериментов при k варьируемых параметрах в ЦКП равно $N = 2^k + 2k + 1$. Значение звездного плеча определяется по формуле

$$\pm \alpha = \pm \sqrt{0,5 \left[(N \cdot 2^k)^{1/2} - 2^k \right]}. \quad (5)$$

Связь между значениями факторов на верхнем и нижнем уровнях и в звездных точках определяется по формуле

$$x_{\pm 1} = [x_{\pm \alpha} - x_0(1 - \alpha)] / \alpha. \quad (6)$$

В целях упрощения изложения методики и алгоритма дополнительно упростим рассматриваемую задачу, исключив из числа варьируемых параметр $\tilde{x}_3$ – относительную аппликату распорки, т.е. будем рассматривать конструкцию поперечной рамы без распорок, которая также встречается на практике. Для двух варьируемых параметров число экспериментов будет равно 9. Ниже в табл.2 и табл.3 представлен пример задания значений варьируемых параметров и вид матрицы планирования эксперимента для случая двух варьируемых параметров; при этом, как следует из формулы (5), $\mp \alpha = \mp 1$.

Таблица 2

Значения варьируемых параметров

Варьируемые параметры:		$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$
Номер параметра (фактора):		1	2
Уровни факторов	Звездное плечо (+)	$+\alpha$	2.0
	Звездное плечо (-)	$-\alpha$	1.0
	Верхний уровень	+1	2.0
	Нижний уровень	-1	1.0
	Основной уровень	0	1.5
Интервал варьирования		$\Delta \tilde{x}_i$	0.5

Таблица 3

Матрица планирования численного эксперимента

№	Кодированные (x_i) и натуральные ($\tilde{x}_i$) значения			
	x_1	x_2	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$
1	-1	-1	1.0	2.0

2	1	-1	2.0	2.0
3	-1	1	1.0	6.0
4	1	1	2.0	6.0
5	$-\alpha$	0	1.0	4.0
6	$+\alpha$	0	2.0	4.0
7	0	$-\alpha$	1.5	2.0
8	0	$+\alpha$	1.5	6.0
9	0	0	1.5	4.0

3). Формирование математической модели поперечной танкерной рамы

Математическая модель конструкции – это совокупность математических зависимостей, определяющих геометрию, размеры конструктивных элементов и характеристики (свойства) конструкции. Геометрия конструкции определяется формой корпуса, декомпозицией конструкции корпуса на составляющие и компоновочной схемой рассматриваемой конструкции. Размеры конструктивных элементов зависят от принятого типа поперечного сечения балок и требований, регламентирующих параметры элементов поперечного сечения. Характеристики (свойства) конструкции определяются совокупностью требований нормативных документов (Правил), а также постановкой задачи проектирования (целью проектирования).

Применительно к рассматриваемой конструкции геометрические параметры определяются размерами центрального танка (рис. 1). Предположим, что форма поперечного сечения балок, образующих раму, соответствует составному тавровому профилю, состоящему из стенки и симметричного свободного пояска (рис. 2).

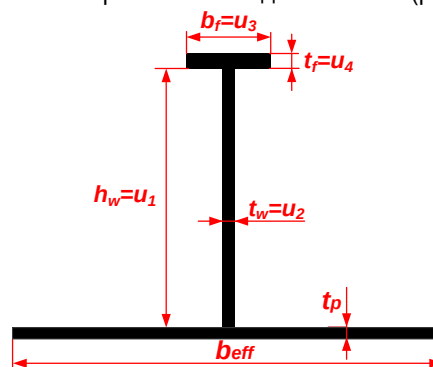


Рис. 2. Схема поперечного сечения подбираемого профиля

Параметры присоединенного пояска определяются требованиями Правил. При заданных размерах присоединенного пояска параметры поперечного сечения балок: высота и толщина стенки, ширина и толщина свободного пояска должны находиться в соответствии со значениями варьируемых параметров l_1, l_2 . Для обеспечения этого ставится и решается задача подбора профиля минимальной площади, $A(U)$ под заданное значение момента инерции $net50 I_j$, $j=1, \dots, 2$:

$$A(U) = u_1 u_2 + u_3 u_4 \rightarrow \min \quad (7)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned}h(U) &= I(U) - I_j = 0; \\g_1(U) &= u_1 - h_{w-\min} \geq 0; \\g_2(U) &= u_2 - t_{w-\min} \geq 0; \\g_3(U) &= [S_w/t_w] - S_w/u_2 \geq 0; \\g_4(U) &= [b_f/t_f] - u_3/u_4 \geq 0; \\g_5(U) &= u_4 - mu_2 \geq 0,\end{aligned}$$

где: $U = \{u_n\}^T, n=1, \dots, 4$ – вектор варьируемых переменных (см. рис. 2); $h(U)$ – ограничение-равенство, регулирующее требуемое значение момента инерции; $g_1(U)$ и $g_2(U)$ – ограничения минимальных значений параметров сечения; $g_3(U)$ и $g_4(U)$ – ограничения, регламентирующие параметры стенки и свободного пояса из условий устойчивости (в квадратных скобках – требование Правил – *slenderness requirements* – рис. 3); $g_5(U)$ – ограничение, определяющее нормальное соотношение между толщиной свободного пояса и стенки (коэффициент $m=1\div 3$).

Список ограничений задачи может быть дополнен с учетом особенностей конструкции. Результат решения задачи: фактические характеристики поперечного сечения профиля, соответствующие значению варьируемого параметра: A – площадь сечения; I – момент инерции (net50); Z_{face_pl} и Z_{att_pl} – моменты сопротивления сечения на уровне свободного и присоединенного поясков (net50), A_{shr} – площадь стенки (net50).

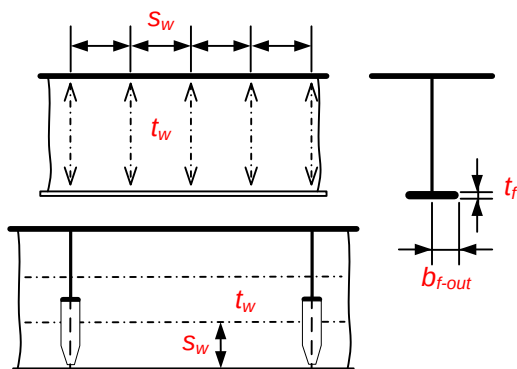


Рис.3. Схема, иллюстрирующая параметры, необходимые для определения требуемых размеров стенки и свободного пояса из условия местной устойчивости

Набор значений характеристик профилей балок должен быть дополнен характеристиками конструкции более высокого иерархического уровня. Эти характеристики формируются на основе требований Правил, регламентирующих

$$GF(X) = \sum_{n=1}^{n=3} (I_{n,0} \cdot A_{n,0}(X) + I_{n,1} \cdot k_{n,1}(X) \cdot A_{n,1}(X) + I_{n,2} \cdot k_{n,2}(X) \cdot A_{n,2}(X)), \quad (8)$$

где $A_{n,0}(X)$ – площадь поперечного сечения n -ой балки на пролете $I_{n,0}$ – на длине балки, не включающей участки усиления в районах опор (при их наличии); $A_{n,1}(X)$ – площадь сечения n -ой балки в районе нижней/левой опоры, если предусмотрены усиления; $A_{n,2}(X)$ – площадь сечения n -ой балки в районе верхней/правой

площадь сечения стенки, момент сопротивления поперечного сечения из условия прочности танкерной рамы. Характеристика свойства (качества) конструкции, например, характеристика массы, определяется с учетом геометрических параметров компоновочной схемы, особенностей закрепления балок в опорных сечениях (наличия, типа и размеров книц), размеров самих рамных балок. Как правило, характеристика массы конструкции является сложной неявной функцией варьируемых параметров, не имеющей аналитического представления.

Для решения рассматриваемой задачи необходимо определить следующие характеристики верхнего иерархического уровня:

- требуемый и фактический минимальный момент сопротивления, $Z_{1_req/act}(X)$ и площадь сечения стенки, $A_{1_req/act}(X)$ на большей части пролета рамного бимса (за пределами книц);

- требуемый и фактический минимальный момент сопротивления, $Z_{2_req/act}(X)$ и площадь сечения стенки, $A_{2_req/act}(X)$ на большей части пролета рамной стойки (на длине, равной 60% эффективного пролета рамной стойки при изгибе и сдвиге):

$$Z_{2_req}(X) = \max\{Z_{2,0}(X); 0,7(Z_{2,l}(X) + Z_{2,u}(X))\}$$

;

$$A_{2_req}(X) = \max\{A_{2,0}(X); 0,7(A_{2,l}(X) + A_{2,u}(X))\};$$

$$Z_{2_act}(X); A_{2_act}(X),$$

где: $Z_{2,0}(X)$ и $A_{2,0}(X)$ – требуемые момент сопротивления и площадь сечения стенки в любом сечении пролета; $Z_{2,l}(X)$, $Z_{2,u}(X)$, $A_{2,l}(X)$, $A_{2,u}(X)$ – требуемые момент сопротивления и площадь сечения стенки, соответственно в нижнем (l) и верхнем (u) расчетном сечении (у конца книц).

В соответствии с требованиями Правил для определения требуемых характеристик балок необходимо выполнить огромный объем расчетов, учитывая то количество расчетных случаев, которое подлежат учету. В случае применения для решения задачи метода планирования эксперимента количество расчетных случаев многократно увеличивается. Так при двух варьируемых параметрах – в 9 раз; при трех варьируемых параметрах – в 15 раз. Тем не менее, расчеты значений характеристик верхнего уровня могут быть автоматизированы и, в связи с этим, при их определении не возникает серьезной проблемы. Характеристика массы конструкции в рассматриваемом случае может быть представлена в виде следующей упрощенной зависимости

опоры, если предусмотрены усиления; $I_{n,1}(X)$ и $I_{n,2}(X)$ – протяженность участков усиления балок в районе опор; $k_{n,1}(X)$ и $k_{n,2}(X)$ – коэффициенты, учитывающие наличие, форму и размеры книц в опорных сечениях балок.

Площадь поперечного сечения балки, может быть достаточно точно оценена по формуле:

$A(X) = C_w \cdot (Z_{req}(X))^{2/3}$, где C_w – коэффициент утилизации площади по моменту сопротивления, определяемый на основе оценок для реальных профилей; $Z_{req}(X)$ – требуемый момент сопротивления балки в расчетном сечении, который предполагается известным.

4). Выполнение численных экспериментов над программной моделью системы; формирование массива значений функции отклика.

В случае применения метода планирования эксперимента для решения задачи, по существу, необходимо создать в соответствии с планом эксперимента N конструкций (моделей конструкций) и определить для них N значений характеристик – значений функции отклика. Это позволит затем применить аппарат аппроксимации метода планирования эксперимента и представить эти характеристики в виде математических зависимостей – регрессионных моделей.

Этот этап проектирования достаточно трудоемкий, но последовательность действий здесь логически понятна и они могут быть выполнены опытным конструктором – проектантом, что позволяет рекомендовать рассматриваемый алгоритм проектирования для использования в практике конструкторских бюро.

5). Выбор модели и расчет коэффициентов регрессии

Большинство проблем проектирования конструкций корпуса судна сводятся к решению задач нелинейного программирования. При этом целевая функция и ограничения задачи являются плавными и достаточно слабо изменяющимися функциями при широких диапазонах варьирования независимых переменных. Это обуславливает целесообразность выбора квадратичных моделей и хорошо разработанного аппарата построения таких моделей с использованием ЦКП. Для расчета коэффициентов регрессии при решении задачи проектирования конструкций используется программное обеспечение, разработанное на основе принципов, изложенных в [3], с учетом особенностей применения положений теории планирования эксперимента к задачам автоматизированного параметрического проектирования конструкций корпуса судна, обоснованных в [2], в том числе и в части оценки адекватности регрессионной модели.

2. Пример проектирования поперечной танкерной рамы

Исследование задачи поискового проектирования элементов поперечной танкерной рамы показали, что целевая функция и ограничения задачи, построенные на основе требований Правил, с достаточной точностью могут быть аппроксимированы регрессионными моделями второго порядка в виде:

$$\hat{Y}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{i=k} b_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{j>i=1}^{i=k} b_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

Пример результатов расчета целевой функции (характеристики массы конструкции) и фактических значений характеристик поперечного сечения балок танкерной рамы (рамного бимса, рамной стойки) в соответствии с планом эксперимента (табл. 2, 3) представлены ниже в табл.4 и 5. Аналогичные результаты получены и для требуемых характеристик балок, а также для расчетных эффективных пролетов. Их также необходимо знать для решения задачи. Эти результаты в связи с ограничением объема публикации в статье не приводятся.

Таблица 4

Коэффициенты регрессии (функция цели, фактические значения моментов сопротивления и площади стенки)

Значения коэффициентов регрессии (КР) в форме (9)					
КР	GF(X)	$Z_{1_act}(X)$	$A_{1_act}(X)$	$Z_{2_act}(X)$	$A_{2_act}(X)$
b_0	13.517	2.3512	2.8074	4.5584	3.9355
b_{b_1}	0.136	0.5560	0.3494	-0.0019	-0.0216
b_{b_2}	2.499	0.0227	0.0200	1.6032	0.7322
b_{11}	0.041	-0.0260	-0.0361	0.0064	0.0255
b_{22}	-0.277	-0.0003	-0.0009	-0.1215	-0.0962
b_{12}	0.034	0.0090	0.0046	0.0116	0.0409

С учетом полученных регрессионных моделей решение задачи поискового проектирования поперечных танкерных рам приводит к следующим результатам (табл.6, 7).

Параметр относительной жесткости рамного бимса и рамной стойки, представленный в Правилах в виде

$$\beta_{vw} = 0,9 \cdot \left(\frac{I_{bdg-vw}}{I_{bdg-dt}} \right) \left(\frac{I_{dt-n50}}{I_{vw-n50}} \right), \quad 0,1 \leq \beta_{vw} \leq 0,5,$$

равен $\beta_{vw_max}=0,5$, что следует из значения ограничения $g_9(X)$. Активным также является ограничение $g_3(X)$, которое регламентирует требование к моменту сопротивления рамной стойки в середине пролета.

Для определения параметров поперечного сечения рамных балок необходимо еще раз решить задачу (7) о подборе профиля минимальной площади под заданное значение момента инерции. Эта задача должна быть дополнена ограничениями - неравенствами на момент сопротивления и площадь сечения стенки типа $Z_{l_act}(X) - Z_{l_req}(X) \geq 0$ и $A_{l_act}(X) - A_{l_req}(X) \geq 0$, чтобы при подборе профиля требования к моменту сопротивления и площади сечения стенки не нарушались.

Таблица 5

Сопоставление результатов численного эксперимента со значениями по уравнению регрессии

№ п/п	Результаты численного эксперимента					Результаты расчета по уравнению регрессии				
	$GF(X)$	$Z_{1_act}(X)$	$A_{1_act}(X)$	$Z_{2_act}(X)$	$A_{2_act}(X)$	$GF(X)$	$Z_{1_act}(X)$	$A_{1_act}(X)$	$Z_{2_act}(X)$	$A_{2_act}(X)$
1	10.739	1.7549	2.4056	2.8614	3.2256	10.686	1.7551	2.4055	2.8536	3.1952
2	10.887	2.8489	3.0950	2.8275	3.0747	10.878	2.8490	3.0950	2.8267	3.0701
3	15.612	1.7827	2.4363	6.0379	4.5821	15.605	1.7826	2.4363	6.0369	4.5777
4	15.919	2.9127	3.1443	6.0503	4.5949	15.956	2.9125	3.1444	6.0563	4.6164
5	13.362	1.7693	2.4217	4.5579	3.9479	13.422	1.7692	2.4218	4.5667	3.9826
6	13.722	2.8810	3.1207	4.5681	3.9563	13.694	2.8811	3.1206	4.5629	3.9394
7	10.679	2.3285	2.7863	2.8251	3.0722	10.741	2.3281	2.7864	2.8337	3.1071
8	15.769	2.3732	2.8265	6.0451	4.5886	15.740	2.3735	2.8265	6.0401	4.5715
9	13.550	2.3511	2.8074	4.5620	3.9533	13.517	2.3512	2.8074	4.5584	3.9355

Поскольку значения пролетов l_{bdg_vw} и l_{shr_vw} рамной стойки, соответствующие решению задачи, известны, то определение параметров поперечного сечения балки в районе опор также сводится к задаче (7). При этом в состав ограничений будут введены ограничения-равенства, полученные из условия согласования параметров профиля в пролете и в опорных сечениях.

Таблица 6

Решение задачи нелинейного программирования

Варьируемые переменные	X_1	X_2
Нижняя граница	-1.000	-1.000
Верхняя граница	1.000	1.000
Решение в кодированной форме	0.149	0.578
Декодированные относительные значения	1.575	5.156
Абсолютные значения, см ⁴	$4.62 \cdot 10^6$	$16.44 \cdot 10^6$
Параметр относительной жесткости рамного бимса и рамной стойки, β_{vw}	0.500	

Таблица 7
Значения ограничений задачи нелинейного программирования

$GF(X)=$	14.894	Функция цели в форме (8)
$g_1(X)=$	0.641	$Z_{1_act}(X) - Z_{1_req}(X) \geq 0$
$g_2(X)=$	1.854	$Z_{1_act}(X) - Z_{1_req}(X) \geq 0$
$g_3(X)=$	0.000	$Z_{2_act}(X) - Z_{2_req}(X) \geq 0$
$g_4(X)=$	1.379	$A_{2_act}(X) - A_{2_req}(X) \geq 0$
$g_5(X)=$	1.149	$X_1 - X_{1_min} \geq 0$
$g_6(X)=$	0.851	$X_{1_max} - X_1 \geq 0$
$g_7(X)=$	1.578	$X_2 - X_{2_min} \geq 0$
$g_8(X)=$	0.422	$X_{2_max} - X_2 \geq 0$
$g_9(X)=$	0.000	$\beta_{max} - \beta(X) \geq 0$
$g_{10}(X)=$	0.400	$\beta(X) - \beta_{min} \geq 0$

Результаты, полученные при решении рассматриваемой задачи, близко соответствуют полученным в реальном проекте. Некоторое превышение размеров рамных балок связано с тем, что в рассмотренной задаче не учитывалось положительное влияние распорки.

Информация о спонсорстве

Материалы, представленные в данной публикации, подготовлены в ходе выполнения НИР "Проблемы оптимизационно-поискового проектирования корпусных конструкций транспортных судов и надводных кораблей" (в рамках гранта СПбГМУ для поддержки молодых ученых и специалистов, договор № НГ - 17/18 от 02.04.2018 г.).

Литература

- Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2019.
- Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, СПб., 2007, 339 с.
- Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск № 2. с. 9-14.
- Arai M., Shimizu T. Optimization of the design of ship structures using response surface methodology // Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Proceedings of the Eighth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Volume 1, 2001. с. 331-339
- Тряскин В.Н., Рюмин С.Н., Кутейников М.А., Бойко М.С. Автоматизированная подготовка исходных данных для расчета общей и местной прочности судна в соответствии с требованиями общих правил МАКО при разработке программного обеспечения // Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства №: 46/47, 2017. с. 112-118.
- Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965, 340 с.

References

1. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2019.
2. Tryaskin V.N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruktsiy korpusa sudna. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Methodology of automated design of hull structures. Thesis for the degree of Doctor of Technical Science]. Saint-Petersburg, 2007, 339 p. (in Russian).
3. Tryaskin V.N. Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya konstruktsiy korpusa sudna. [Methodology of parametric designing of ship's hull structures] Transactions of the Krylov State Research Centre, 2018; Special issue 2: pp. 9-14 (in Russian)
4. Arai M., Shimizu T. (2001). Optimization of the design of ship structures using response surface methodology. Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Proceedings of the Eighth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Volume 1, 2001, pp. 331-339
5. Tryaskin V.N., Rumin S.N., Kuteynikov M.A., Boyko M.S. Avtomatizirovannaya podgotovka iskhodnykh dannykh dlya rascheta obshchey i mestnoy prochnosti sudna v sootvetstvii s trebovaniyami obshchikh pravil MAKO pri razrabotke programmnoy obespecheniya [Automatic input data preparation for global and local ship strength calculation in accordance IACS Common Structural Rules and a software development task]. Research bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. No 52/53, 2017, pp. 112-118. (in Russian)
6. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov [Statistical methods of planning extreme experiments]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 340 p. (in Russian)

УДК 629.013

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА КОРПУСА СУДНА

Валерий Викторович Медведев

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Владислав Владимирович Зуев

студент магистр

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: warcraft66@yandex.ru

Аннотация

Работа посвящена решению задачи снижения выбросов парниковых газов, для которой Международная морская организация (ИМО) предлагает использовать нормируемый конструктивный коэффициент энергетической эффективности. Для расчета указанного коэффициента ИМО рекомендована соответствующая формула. Полученное по ней значение сравнивается с нормой, которая последовательно ужесточается согласно введенным этапам (фазам). Достижение нормативных значений может быть обеспечено за счет увеличения дедвейта судна при сохранении обводов и водоизмещения, а значит при сохранении скорости хода и мощности энергетической установки. Это обеспечивается уменьшением массы корпуса за счет применения новых конструкционных материалов. Исследованию и анализу принципиальной возможности реализации такого пути посвящена данная работа.

Объектом исследования выбрано сухогрузное судно, предназначенное для перевозки генеральных и навалочных грузов. Установлено, что судно не соответствует требованиям ИМО для 3-й фазы, поэтому расчеты новых судов были выполнены применительно к этой фазе. При решении поставленной задачи использованы следующие методы: расчёт корпуса как эквивалентной балки, расчет массы обшивки корпуса по программе свободного программного обеспечения (ПО) FreeShip, а также расчеты перемещений и напряжений корпуса судна в лицензионном ПО ANSYS. В качестве альтернативных материалов для стального корпуса и обшивки рассматривались титановые и алюминиевые сплавы, углепластик и стеклопластик.

Исследование показало, что принципиально возможно получить соответствие перспективным требованиям ИМО для сухогрузного судна за счет применения альтернативных конструкционных материалов. Существующая в настоящее время высокая цена этих материалов и технологий их использования может быть со временем снижена.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, энергоэффективность судна, судовая энергетическая установка, дедвейт судна, корпус судна, конструкционные материалы, эквивалентная балка, обшивка корпуса, перемещения, напряжения.

ANALYSIS OF A POSSIBILITY FOR FULFILLING PERSPECTIVE REQUIREMENTS FOR THE DESIGN ENERGY EFFICIENCY RATIO WITH RESPECT TO SHIP'S HULL MATERIAL SELECTION

Valery V. Medvedev

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,

Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Vladislav V. Zuev

Master's student

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya 3,

e-mail: warcraft66@yandex.ru

Abstract

The work is devoted to solving the problem of reducing greenhouse gas emissions, for which the International Maritime Organization (IMO) proposes to use the normalized design energy efficiency ratio. To calculate the specified IMO ratio, the appropriate formula is recommended. The value obtained from it is compared with the norm, which is subsequently tightened according to the stages (phases) introduced. Achieving standard values can be done by increasing the ship's deadweight while

maintaining the contours and displacement, and thus while maintaining the speed and power of the power plant. This is achieved by reducing the mass of a hull through the use of new structural materials. This work is devoted to research and analysis of the fundamental possibility of implementing such a path.

Dry cargo vessel was selected as an object of study, designed for transportation of general and bulk cargoes. It has been established that the vessel does not meet the requirements of the IMO for the 3rd phase; therefore, calculations for new vessels were carried out in relation to this phase. When solving the task, the following methods were used: calculation of the hull as an equivalent beam, calculation of the hull plating mass according to the Free! Ship software program, as well as calculations of the ship hull displacements and stresses in the licensed ANSYS software. Titanium and aluminum alloys, carbon and fiberglass were considered as alternative materials for the steel hull and plating.

The study showed that it is fundamentally possible to obtain compliance with the perspective IMO requirements for a dry cargo vessel through the use of alternative structural materials. The current high price of these materials and technologies for their use may be reduced over time.

Key words: greenhouse gas emissions, ship energy efficiency, ship power plant, ship deadweight, ship hull, construction materials, equivalent beam, hull plating, displacements, stresses.

Введение

В рамках решения проблемы снижения выбросов парниковых газов Международная морская организация (ИМО) предлагает использовать конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ – EEDI) для оценки выбросов CO₂ эксплуатирующихся и строящихся судов [1]. Для расчета указанного коэффициента рекомендована соответствующая формула. Полученное по формуле значение сравнивается с нормой, которая последовательно ужесточается согласно введенным этапам (фазам). Очередная фаза наступает с 1 января 2020 года, последняя – с 1 января 2025 г. Естественно, выбросы CO₂ исходят от энергетической установки судна (главных и вспомогательных двигателей), но они приводятся к работе по транспортировке грузов [2]. Сомножитель, входящий в транспортную работу, характеризует величину вместимости судна, в качестве которой предлагается принимать дедвейт, т. Потенциал различных путей повышения энергетической эффективности судов с целью приведения к соответствию с требованиями ИМО рассматривался в работе [3]. В ней, среди прочего, отмечена возможность реализации требований за счет применения новых конструкционных материалов. Однако количественных оценок применительно к разным материалам, не было, поэтому вопрос так и остаётся открытым.

В данной статье рассматривается вопрос возможности достижения нормативных значений ККЭЭ за счет увеличения дедвейта судна при сохранении обводов и водоизмещения, а значит при сохранении скорости хода и мощности энергетической установки. Это обеспечивается уменьшением массы корпуса за счет применения новых конструкционных материалов. Исследованию и анализу принципиальной возможности реализации такого пути посвящена данная работа.

1. Обоснование параметров объекта исследования – судна прототипа

Существует множество вариантов воплощения в устройство корпуса судна конструкционных материалов. Достижимый результат определяется на основе признанных приемов расчета параметров корпуса судна, начиная с вопросов теории проектирования [4]-[5], вопросов обеспечения прочности [6]-[8] и проверки соответствия нормативным документам [9]. Для того, чтобы не отвлекаться в процессе анализа различными аспектами проектирования принято решение – принять в качестве объекта исследования проект судна, который, с одной стороны, имеет уже сформированные пропорции и конструкцию корпуса, проверенные на соответствие действующим нормам и правилам, с другой – позволяет реализовать в существующих размерениях возможность размещения дополнительного полезного груза, т.е. увеличить дедвейт и, соответственно, транспортную работу.

Многоцелевое сухогрузное судно с тремя грузовыми трюмами, предназначено для морской и смешанной (река-море) перевозки генеральных и навалочных грузов (в том числе зерна), пакетированных пиломатериалов, металлолома, металла в связках и рулонах, крупногабаритных, длинномерных и тяжеловесных грузов, опасных грузов классов 1.4S, 2, 3, 4, 5, 6.1, 8, 9 в соответствии с МК МПОГ и Приложения В Кодекса ВС в Каспийском море, а также в Средиземном, Черном, Балтийском, Белом, Северном морях, включая рейсы вокруг Европы и в Ирландское море зимой. Главные размерения судна приведены в табл.1. В качестве главных двигателей (ГД) установлены два дизеля фирмы WARTSILA 6L20, работающих на тяжелом топливе вязкостью до 380 сСт. Максимальная длительная мощность каждого двигателя составляет 1200 кВт при 1000 об/мин, а удельный расход топлива по ISO – 191 г/(кВт·ч) (нагрузка 100%). Потребности в электрической энергии обеспечивает вспомогательная энергетическая установка, состоящая из двух дизелей мощностью по 292 кВт и удельным расходом топлива 215 г/(кВт·ч) каждый.

Таблица 1
Технические характеристики объекта исследования

Класс Регистра	KM Ⓢ Ice2 R2 AUT1-C
Длина наибольшая, м	139.95
Длина между перпендикулярами, м	135.74
Длина расчетная по Правилам РС, м	133.68
Ширина габаритная/расчетная, м	16.7/16.5
Высота борта, м	6
Осадка проектная в реке, м	3.6
Осадка по ЛГВЛ (море), м	4.7
Габаритная высота до верхней кромки несъемных частей при осадке в реке 3 м, не более, м	13.8
Дедвейт в реке (осадка 3,6 м), т	4518
Дедвейт в море (осадка 4,7 м), т	7154
Вместимость грузовых трюмов, м ³	10920
Вместимость балластных танков, м ³	3959
Осадка в балласте средняя, м	3.25
Винт	2 ВФШ
Скорость хода в грузу, при осадке 4,70 и 85% МДМ на глубокой воде при волнении 2 балла и ветре 3 балла, узл.	11.5

Расчетный конструктивный коэффициент энергетической эффективности для судна определяется по формуле:

$$EEDI = (f_j P_{ME} CF_{ME} SFC_{ME} + P_{AE} CF_{AE} SFC_{AE}) / (f_i DWT v_{ref}), \quad (1)$$

где f_j и f_i – поправки на класс ледовых усилений судна; P_{ME} – мощность ГД, равная 75% от расчетной, кВт; P_{AE} – расчетная мощность вспомогательных двигателей, кВт; SFC_{ME} , SFC_{AE} – удельный эффективный расход топлива главными и вспомогательными двигателями, г/(кВт·ч); CF_{ME} , CF_{AE} – выбросы CO₂ главными и вспомогательными двигателями; v_{ref} – скорость судна, при мощности ГД 75% от расчетной, узлы; DWT – дедвейт судна при осадке 4.7 м, т.

Факторы, учитывающие влияние водоизмещения и особенности конструкции для сухогрузов с ледовым классом Ice2 определяются по формулам:

$$f_j = 0.67 L_{PP}^{0.07} = 0.67 \cdot 135.74^{0.07} = 0.945;$$

$$f_i = 1.28 L_{PP}^{-0.04} = 1.28 \cdot 135.74^{-0.04} = 1.052,$$

где L_{PP} – длина между перпендикулярами, м.

Мощность $P_{ME} = 0.75 \cdot 2 \cdot 1200 = 1800$ кВт. На ходу судна потребности в электрической энергии обеспечивает один дизель, поэтому принимаем $P_{AE} = 294$ кВт и $SFC_{AE} = 215$ г/(кВт·ч).

Удельный эффективный расход топлива главными двигателями зависит от режима работы двигателя. Обычно при работе на ВФШ на режиме 75% от номинала расход уменьшается. Однако, при работе ГД на тяжелом топливе он наоборот – увеличивается, поэтому считаем, что оба явления компенсируют друг друга и в итоге $CF_{ME} = 191$ г/(кВт·ч).

Выбросы CO₂ главных и вспомогательных двигателей учитываются коэффициентами [2]: $CF_{ME} = 3.114$ – для тяжелого топлива; $CF_{AE} = 3.206$ – для дизельного топлива.

Скорость судна $v_{ref} = 11$ узл определена через адмиралтейский коэффициент.

Расчетный коэффициент энергетической эффективности для судна-прототипа равен:

$$EEDI = (0.945 \cdot 1800 \cdot 3.114 \cdot 191 + 294 \cdot 3.206 \cdot 215) / (1.052 \cdot 7154 \cdot 11) = 14.67.$$

Полученный $EEDI$ должен быть равен или меньше требуемого, который рассчитывается для судов 1 (1 янв. 2015 - 31 дек.2019), 2 (1 янв. 2020 - 31 дек. 2024) и 3 (1 янв. 2025 и далее) фазы строительства по формуле:

$$\text{Требуемый } EEDI = (1 - X/100) \cdot \text{baseline}, \quad (2)$$

где X – уменьшающий фактор, определяющийся из [2] путем линейной интерполяции, для 1 фазы $X=3.462$, для 2 фазы $X=5.123$, 3 фазы – $X=10.385$; baseline – величина Базовой линии.

Значение baseline для судна прототипа определяется согласно [2] по формуле:

$$\text{baseline} = a \cdot b^{-c} = 107.48 \cdot 7154^{-0.216} = 15.80, \quad (3)$$

где a и c – постоянные величины, определяющиеся из [2], для судна, перевозящего генеральные грузы, $a = 107.48$ и $c = 0.216$; b – дедвейт судна, т.

Результаты расчета требуемого $EEDI$ для различных фаз и сравнение с достигнутым значением для судна-прототипа приведены в табл.2. Судно-прототип соответствует текущим и перспективным требованиям ИМО для 1 и 2-й фазы, но не будет соответствовать требованиям для 3-й фазы. Поскольку до вступления в силу требований этой фазы есть несколько лет, существует возможность подготовиться к решению этой проблемы. Среди путей решения, из рассмотренных в работе [3] с анализом их достоинств и недостатков, для дальнейшего рассмотрения принята исследование возможности увеличения дедвейта судна за счет выбора нового материала корпуса судна. Расчеты новых судов были выполнены для 3-й фазы.

Таблица 2
Требуемый и расчетный $EEDI$ для судна-прототипа

Фаза постройки	Требуемый $EEDI$	Расчетный $EEDI$
0	15.80	14.67
1	15.26	
2	14.98	
3	14.16	

2. Определение дедвейта судна при изменении материала его корпуса

Условием проведения исследования было не ухудшение прочности корпуса нового судна по сравнению с судном-прототипом. Рассмотрено два приема: замена материала основных связей корпуса и замена материала только обшивки. Для решения поставленной задачи использованы следующие методы: расчёт корпуса как эквивалентной балки, расчет массы обшивки корпуса по программе свободного программного обеспечения (ПО) Free!Ship, а также расчеты методом конечных элементов перемещений и напряжений корпуса судна в лицензионном ПО ANSYS. В качестве альтернативных материалов для корпуса и обшивки из стали марки D32 рассматривались титановый (BT-3B) и алюминиевый (AMг6) сплавы, углепластик ВКУ-29 и стеклопластик фирмы Ashland (табл.3).

Таблица 3

Характеристики исследованных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел текучести, МПа	Допускаемые напряжения, МПа
Сталь	7850	315	224*
Алюминиевый сплав	2640	180	126
Титановый сплав	4450	600	468
Углепластик	1600	1400	1092
Стеклопластик	1800	1700	1326

*) Согласно пункту 1.4.6.2 РМРС [9]

Определение дедвейта на основе вычисления элементов эквивалентного бруса. Были выполнены расчеты элементов эквивалентного бруса для судна-прототипа, а также судов, изготовленных из титановых, алюминиевых сплавов, углепластика, стеклопластика. Определены допускаемые напряжения для каждого из материалов (см. табл.3).

Были найдены приближенные значения моментов сопротивления поперечного сечения для каждого из корпусов, которые в свою очередь были использованы как минимально допустимые для расчета эквивалентного бруса новых судов.

Все элементы эквивалентного бруса представлены в схеме на рис.1.

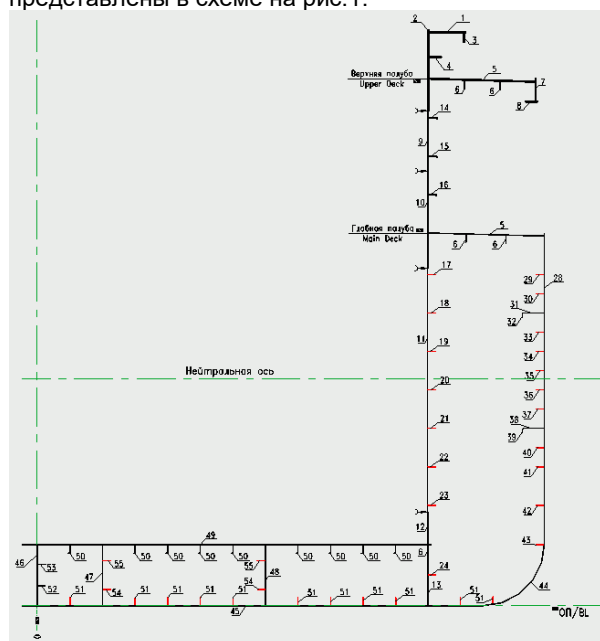


Рис.1. Схема эквивалентного бруса исследованного судна

Элементы эквивалентного бруса определялись в табличной форме для половины сечения.

Расчет элементов эквивалентного бруса для корпуса из нового материала производился с изменением толщин элементов конструкции, по итогу которого минимальный момент сопротивления поперечного сечения корпуса не

превышал найденного из условия равенства нагрузки с судном-прототипом.

Приблизительная масса изменяемых продольных связей корпуса судна была определена по формуле:

$$m = F L \rho,$$

где F – площадь поперечного сечения, м²; L – длина судна, м; ρ – плотность материала, кг/м³.

При вычитании из массы судна-прототипа массы новых корпусов можно узнать на сколько увеличится дедвейт новых судов. Расчетное значение дедвейта при изменении конструктивного материала представлено на рис.2.

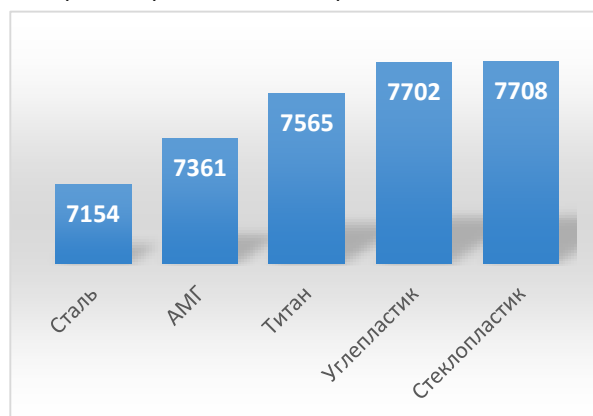


Рис.2. Дедвейт судов из различных материалов на основе вычисления элементов эквивалентного бруса, т

Для расчета **дедвейта при изменении конструктивного материала наружной обшивки корпуса судна** использована программа Free!Ship. На основании теоретического чертежа была создана 3D-модель в программе Free!Ship. Для этих целей используется методика для формирования поверхности корпуса судна, называемая моделированием поверхности, включающая в себя "вятие" оболочки при помощи перемещения и сдвига точек, как будто поверхность – очень тонкая и гибкая часть ткани. В отличие от других программ, где используется разбиение поверхностей, которые полностью моделируют судно, в данном случае применяется методика, дающая больше гибкости в проектировании любой желаемой формы.

Оценка соответствия 3D-модели теоретическому чертежу проводилась путем сравнения теоретического чертежа исходного судна и теоретического чертежа, построенного по модели (рис.3), а также путем сравнения геометрических и объемных характеристик.

Программа Free!Ship позволяет рассчитать массу корпуса, для этих целей существует кнопка свойства слоя, в котором задается толщина и плотность материала. Все полученные результаты представлены в табл.4. Там же приведены определенные аналогично описанному выше способу дедвейты судов.

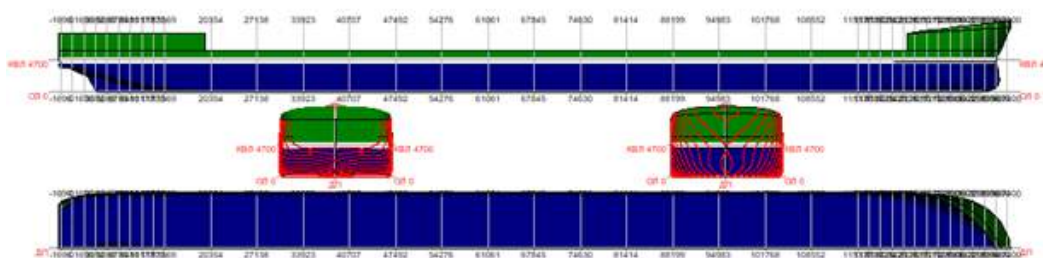


Рис.3. Теоретический чертеж, построенный в Free!Ship

Таблица 4
Характеристики обшивки из исследованных материалов и дедвейт судна

Материал	Толщина обшивки, мм	Масса обшивки, т	Дедвейт судна, т
Сталь	9	283	7154*
Алюминиевый сплав	16	169	7268
Титановый сплав	6	107	7330
Углепластик	4	26	7411
Стеклопластик	3	22	7415

Дополнительно выполнена оценка прочности корпусов судов из исследованных материалов в лицензионном ПО ANSYS. Используя чертежи миделя шпангоута и переборки была построена **трехотсечная конечно-элементная модель**, которая подвергалась равномерной нагрузке на двойное дно и градиентной, на борта отсеков и переборки, а также суммарному изгибающему моменту на тихой воде и на волнении, определенному согласно [9]. Далее выполнялся расчет, просмотр и анализ результатов: перемещений, деформаций и напряжений, который дал положительные результаты.

3. Анализ достигнутого ККЭЭ для корпусов из различных материалов

Расчетный коэффициент энергетической эффективности для судна, продольные конструкции (или только обшивка) которого изготовлены из различных материалов определялся по формуле (1), в которую подставлялось соответствующее каждому случаю, определенное выше, значение дедвейта. Следует отметить, что изменение дедвейта приводит к необходимости пересчета базовой линии (формула (3)) и требуемого значения EEDI (формула (2)). Его расчет выполнялся, как это было обосновано выше, для 3-й фазы. Итоговые результаты представлены в табл.5.

Выполнить требование ИМО только за счет замены материалы обшивки оказалось в данном случае невозможно. Однако, замена материала основных связей корпуса может дать

положительный результат. Это касается вариантов корпуса судна, выполненных из угле- и стеклопластика. Причем результат получается практически одинаковым.

Таблица 5
Требуемый и расчетный EEDI для 3 фазы

Материал	Замена материала основных связей корпуса		Замена обшивки судна	
	Требуемый EEDI	Расчетный EEDI	Требуемый EEDI	Расчетный EEDI
Сталь	14.16	14.67	14.16	14.67
Алюминиевый сплав	13.99	14.26	14.07	14.44
Титановый сплав	13.83	13.87	14.02	14.32
Углепластик	13.72	13.62	13.95	14.16
Стеклопластик	13.72	13.62	13.95	14.15

Заключение

Выполненное исследование носит оценочный характер и не претендует на полноту рассмотрения различных вариантов использования возможностей применения разных материалов в конструкциях корпуса судна. Однако, полученные результаты позволяют авторам сделать вывод о том, что принципиально возможно получить соответствие перспективным (после 01 января 2025 года) требованиям ИМО, на примере судна-прототипа, за счет применения альтернативных конструкционных материалов. Хотя сплавы алюминия и титана не показали нужного результата, соответствие может быть достигнуто при использовании углепластика и стеклопластика. Существующая в настоящее время высокая цена этих материалов и технологии их использования может быть со временем снижена при массовом применении или при появлении других высокопрочных материалов. В данной статье не рассматривалось применение судовых высокопрочных сталей, предел текучести которых превышает практически в два раза показатели стали D32. Новое поколение таких материалов уже доступно и обладает приемлемой стоимостью [10].

Литература

1. Иванченко А.А., Петров А.П., Живлюк Г.Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015, №3(31). – С.103-112.
2. IACS Recommendations №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). – 81 p.
3. Медведев В.В., Гаврилов В.В., Киселев С.Н. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. №2 (40) Т.1. – С.94-103.
4. Справочник по теории корабля. В 3 т. / Под редакцией Я.И. Войткунского. – Л., Судостроение, 1985.
5. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. В 2 т. – СПб.: Изд-во НИЦМОРИНТЕХ, 2014.
6. Шиманский Ю.А. Справочник по строительной механике корабля. Т.3. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 799 с.
7. Бойцов Г.В., Палий О.М. и др. Справочник по строительной механике корабля. В 3 т. – Л.: Судостроение, 1982.
8. Манухин В.А., Родионов А.А., Упырев В.М. Проверочные расчеты общей прочности судна: Учебное пособие. – СПб: СПбГМТУ, 2012. – 114 с.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019. – 279 с.
10. Орыщенко А.С., Голосиенко С.А., Хлусова Е.И. Новое поколение высокопрочных корпусных сталей // Судостроение. – 2013, №4. – С.73-77.

References

1. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.Ye. Energeticheskaya effektivnost' sudov i regla-mentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral'a S.O. Makarova, 2015, N 3(31), S.103-112. (In Russian)
2. IACS Recommendations №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). 81 p.
3. Medvedev V.V., Gavrilov V.V., Kiselev S.N. Obzor i analiz vozmozhnostej razlichny`x sposobov povы`sheniya e`nergeticheskoy e`ffektivnosti sudov. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2018, N2(40), T1, S.94-103. (In Russian)
4. Spravochnik po teorii korablya, 3.t., (Pod redaktsiye Ya. I. Voytkunskogo) L., Sudostroenie, 1985. (In Russian)
5. Gaykovich A.I. Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov. V 2 t. SPb.: Izd-vo NITS MORINTEKH, 2014. (In Russian)
6. Shimanskiy YU.A. Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya. T3. L.: Sudpromgiz, 1960. 799 s. (In Russian)
7. Boytsov G.V., Paliy O.M. i dr. Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya. V 3 t. L.: Sudostroyeniye, 1982. (In Russian)
8. Manuhin V.A., Rodionov A.A., Upyrev V.M. Proverochnye raschety obshey prochnosti sudna. Uchebnoe posobie. St.Petersburg, SPbGMTY, 2012, 114 p. (In Russian)
9. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus. SPb: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019. 279 s. (In Russian)
10. Oryshchenko A.S., Golosiyenko S.A., Khlusova Ye.I. Novoye pokoleniye vysokoprochnykh korpusnykh staley. Sudostroyeniye, 2013, N4, S.73-77. (In Russian)

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 620.197.3

ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТСЕКОВ СУДОВ

Екатерина Ивановна Плассеева

аспирант, ассистент кафедры химии

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru

Валерий Иванович Трусов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии,

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: vtrui2008@mail.ru

Аннотация

Предметом исследования является проблема надежности противокоррозионной защиты труднодоступных конструкций балластных, сухих и других отсеков судов. Цель работы – обоснование систем защиты повышенной надежности с участием ингибиторов коррозии. Для сухих (воздушных) отсеков взамен окраски предложен метод защиты консервационным составом на основе масел или топлив с ингибитором коррозии «ФМТ». В зависимости от конфигурации отсека проводят нанесение консерванта распылением или заполнением всего объема отсека. Для балластных отсеков предложена комбинированная система лакокрасочного покрытия, отличающаяся предварительной химической обработкой поверхностей отсека при постройке фосфатирующим составом «НОТЕХ». Состав содержит ингибитор коррозии анодного типа, обладающий высокими пассивирующими свойствами и эффективно подавляющий развитие подпленочной коррозии под слоем лакокрасочного покрытия. Защита может быть рассчитана на весь срок службы судна с минимизацией ремонтных работ при эксплуатации, что дает основания для снижения «запаса» на коррозионный износ конструкций при проектировании. Состав наносят 1-2 раза без отмывания водой перед грунтованием.

Ключевые слова: сухие и балластные отсеки судов, ингибиторы коррозии, методы временной защиты, системы лакокрасочного покрытия

CORROSION PROTECTION OF INACCESSIBLE VOIDS OF VESSEL COMPARTMENTS

Ekaterina I. Plaskeeva

Graduate student, Assistant of the Department of Chemistry

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru

Valery I. Trusov

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Chemistry,

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: vtrui2008@mail.ru

Abstract

The subject of research is the problem of reliability of corrosion protection of inaccessible voids of ballast, dry and other compartments of ships. The goal of the work is to justify the protection systems of enhanced reliability, which include corrosion inhibitors. For dry (air) compartments, instead of painting, a method has been proposed for protecting it with a conserving composition based on oils or fuels with a corrosion inhibitor "FMT". Depending on the configuration of the compartment, the conserving agent is applied by spraying or filling the entire volume of the compartment. For ballast compartments, a combined paint and varnish coating system has been proposed, which is distinguished by chemical pretreatment of the compartment surfaces during the construction with the "HOTEX" phosphate compound. The composition contains an anode-type corrosion inhibitor, which has high passivating properties and effectively suppresses the development of under-film corrosion under a layer of paint and varnish. Protection can be designed for the entire service life of the vessel with minimization of repair work during operation, which gives grounds for reducing the "margin" for corrosive wear of structures during design. The composition is applied 1-2 times without rinsing with water before priming.

Keywords: dry and ballast compartments of ships, corrosion inhibitors, temporary protection methods, paint and varnish coating systems

Введение

Создание новых производств в судостроении, решение задач повышения качества и снижения стоимости невозможны без разработки надёжных методов противокоррозионной защиты. Но если надводному и подводному борту, палубам, конструкциям надстройки уделяется повышенное внимание, то контроль состояния труднодоступных конструкций внутренних судовых отсеков затруднен, а в процессе эксплуатации защитные лакокрасочные покрытия частично и полностью разрушаются, при этом выполнение ремонтных работ по очистке поверхностей и восстановлению защитных покрытий – задача непростая. Проблема особенно актуальна на танкерном флоте, где по требованиям Конвенции «Марпол-73» грузовые танки отделены от наружного борта и днища целой системой балластных отсеков и переборок. Однокорпусные конструкции в этом отношении проще и надежнее [1]. Согласно имеющимся данным [2]:

- язвенная коррозия на конструкциях подпалубного набора, бимсах, верхних продольных ребрах жесткости в верхней части балластных танков, пиков в случае заполнения морской водой 0,3-0,6 мм/год;

- подволок и конструкции днищевой части и настила грузовых и грузо-балластных танков нефтеналивных судов 0,4-0,5 мм/год;

- палубные конструкции в зависимости от района палубы и места эксплуатации судна 0,1-0,9 мм/год;

- переборки в нижней части в местах скопления застойной воды в сухих отсеках 0,15-0,45 мм/год;

- язвенные разрушения, приводящие к замене обшивки корпуса, с внутренней стороны бортовой обшивки в труднодоступных местах 0,5-0,7 мм/год.

Именно поэтому необходимы новые технические решения, направленные на повышение эффективности защиты конструкций судовых танков.

1. Новые методы защиты

Судовые танки, коффердамы и другие отсеки с усиленной коррозией могут быть сухие (воздушные) или балластные, периодически заполняемые забортной водой. Для защиты межбортных, междудонных сухих пространств и транцевых переборок на морском флоте ранее был накоплен положительный опыт применения летучих ингибиторов атмосферной коррозии, в частности нитрита дициклогексиламина НДА взамен окраски [3,4]. К сожалению, в настоящее время производство летучих ингибиторов сокращено, они не удовлетворяют современным требованиям безопасности. НДА – ингибитор второго класса опасности.

В настоящее время предпочтение отдается малоопасным ингибиторам контактного типа, например Н-М-1, ФМТ [5,6.]. Защитные возможности этих материалов позволяют полностью исключить окрасочные работы внутри сухих отсеков, которые даже при постройке судна затруднены, не говоря о восстановлении разрушенных покрытий при эксплуатации. Ингибитор защищает как очищенную поверхность

металла, так и с продуктами коррозии, поэтому не требует абразивоструйной очистки до степени Sa2,5. Кроме того, консервационные составы не содержат токсичных летучих органических растворителей.

В зависимости от конфигурации отсека выбирается способ нанесения консерванта – заполнение всего защищаемого объема или распыление, если это возможно технически. В таблицах 1, 2 приведены данные ускоренных коррозионных испытаний ФМТ в индустриальном масле и в дизельном топливе [1]. Защитные свойства ФМТ несколько возрастают при увеличении его концентрации в масле. На образцах, законсервированных 3 % раствором ФМТ первые признаки коррозии отмечены через 11 циклов испытаний. При этом прогноз предполагаемого срока защиты в натурных составит не менее 3-х лет. Подконсервация проводится по мере необходимости без выполнения очистных работ в танке.

В условиях полного заполнения танка раствором ингибитора срок защиты не ограничен, поскольку на поверхности металла постоянно находится защитный слой адсорбированного ингибитора (табл.2). Раствор ФМТ в дизельном топливе с концентрацией 1 % вполне достаточен для обеспечения эффективной танка от судна. Важно также отметить, что ингибитор «ФМТ», как и «Н-М-1» обладают высокой фунгистатической активностью по отношению к основным видам плесневых грибов. В законсервированном танке будет подавлена и микробиологическая коррозия.

Балластируемые объемы на судах являются более сложным объектом защиты в сравнении с сухими отсеками, использование материалов временной защиты исключено по требованиям экологической безопасности. Основное средство противокоррозионной защиты - лакокрасочные покрытия в большинстве не могут без восстановления выдержать весь срок эксплуатации судна. Рассмотрим основные пути повышения надежности систем покрытия, то есть увеличение времени эксплуатации отсека со 100%-ной степенью защиты. Для эффективного решения задачи подходят комбинированные методы, сочетающие принципы постоянной и активной временной защиты с повышением ее надежности и долговечности.

Система органорастворимого лакокрасочного покрытия включает подготовку поверхности, грунтование, окраску. Сами пигменты красок могут обладать ингибирующим действием или в состав грунтовки дополнительно вводят ингибиторы коррозии. При этом возможны нарушения сочетаемости компонентов краски, неправильный выбор концентрации ингибитора и способа его введения, и, как следствие, снижение адгезии и ухудшение других показателей. Необходим строгий лабораторный контроль. Далее, в ингибированном грунте даже летучий ингибитор может проявлять только свойства контактной формы, то есть он может работать непосредственно на поверхности защищаемого металла. Основное количество ингибитора в слое грунтовки является балластом, скорость его диффузии на поверхность металла недостаточна [7]. Совместимость может быть достигнута использованием носителя (матрицы)

ингибитора, например, конверсионного покрытия. Самым универсальным и эффективным, не создающим слоя как грунт, совместимым тем самым с большинством известных типов ЛКП, и даже улучшающим адгезию грунта является, как известно, фосфатирование. Дополнительно фосфатирующий состав, например «НОТЕХ», содержит водорастворимый ингибитор коррозии анодного типа. Этот ингибитор-окислитель обладает пассивирующим действием, поверхность металла «облагорожена», в процессе эксплуатации ЛКП уже на ранних стадиях повреждения покрытия коррозия локализована. Этот принципиально важный результат по снижению скорости «подпленочной» коррозии подтверждается экспериментально. Как видно из данных табл.3, значение распространения коррозии от надреза на образцах, обработанных «НОТЕХ», существенно ниже. Состав обладает пассивирующим действием и снижает скорость коррозии стали под слоем лакокрасочной грунтовки. По совокупности всех данных, в том числе длительной эксплуатации в натурных условиях,

благодаря подавлению подпленочной коррозии срок службы ЛКП возрастает в 1,5-2 раза [7].

Заключение

Для сухих отсеков судов взамен окраски могут быть предложены упрощенные методы консервации маслами или дизельным топливом с ингибитором коррозии «ФМТ», не требующие сложного обслуживания и ремонта.

Для защиты балластных танков обосновано применение фосфатирующего и пассивирующего состава «НОТЕХ» при постройке судна на стадии подготовки корпусных конструкций под окраску. За счет подавления подпленочной коррозии срок службы судового ЛКП возрастает в 1,5-2 раза, то есть составит не менее 15-20 лет. Это дает основание для снижения «запаса» на коррозию при проектировании, а процесс восстановления покрытия при ремонте возможен с химической подготовкой «НОТЕХ» разрушенных участков без очистных работ в танке.

Таблица 1

Результаты коррозионных испытаний растворов ингибитора коррозии ФМТ в масле И-40А по ГОСТ 9.054 (метод 1) на стали Ст3 в камере тепла и влаги

Концентрация ФМТ в И-40А, масс. %	Оценка коррозионного состояния металлических образцов по ГОСТ 9.908, через цикл, % коррозионного поражения		
	6	11	15
1	1,4	2,85	7,22
3	0,00	0,91	4,63

Таблица 2

Результаты коррозионных испытаний раствора ингибитора коррозии ФМТ в дизтопливе на стали Ст3 при полном постоянном погружении

Концентрация ФМТ в ДТ, масс. %	Оценка коррозионного состояния металлических образцов по ГОСТ 9.908 при полном погружении во времени при стандартных условиях, % коррозионного поражения		
	6 месяцев	1 год	2 года
1	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00

Таблица 3

Средние величины распространения коррозии от надреза (Wd_{cp})

Покрывтие	Подготовка поверхности	№№ образцов	Wd_{cp} , мм
Грунтовка ЭФ-065, 1 слой	Пескоструйная до степени Sa 2,5	01	0,218
		02	0,062
		03	0,125
То же	Пескоструйная до степени Sa2,5 и обработанная «Нотех»	1	0,050
		2	0,012
		3	0,062

Литература

1. Р.С.Крымская. Совершенствование методов консервации продукции судостроения. – Автореферат канд. дисс. Санкт-Петербург. 2013.
2. Т.Е.Медяник, Ю.Л.Кузьмин, В.Д.Пирогов. Способы повышения коррозионной стойкости судовых корпусных конструкций//Технология судостроения. – 1992. №1. С.12-14.
3. Технологическая инструкция по применению летучих ингибиторов для защиты от коррозии труднодоступных конструкций в танках, коффердамах и других отсеках морских судов. РД 31.28.65-82. Москва. В/о «Мортехинформреклама» 1983.43С.
4. И.Л.Розенфельд, В.П.Персианцева. Ингибиторы атмосферной коррозии. - М. Наука. 1985. 279С.
5. Р.С.Крымская, В.И.Трусов, А.И.Алцыбеева, Т.М.Кузинова. Ингибитор коррозии Н-М-1// Коррозия: материалы, защита. 2011. №9. С.32.
6. В.И.Трусов, Е.А.Безродных, Е.А.Назаров,С.Н.Лебедева/ Ингибитор коррозии с медными производными хлорофилла// Коррозия: материалы, защита. 2004. №10. С.29-30.
7. В.И.Трусов, Р.С.Крымская, А.И.Грицкевич Ингибирование коррозии в системе лакокрасочного покрытия // Естественные и технические науки. 2016. №11(101) С.262-265.

References

1. R.S. Krymskaya Improving the conservation of shipbuilding products Abstract of Cand. diss. St. Petersburg 2013
2. T.E. Medyanik Yu.L. Kuzmin V.D. Pirogov Ways to improve the corrosion resistance of ship hull structures Shipbuilding technology 1992 №1 P.12-14
3. Technological instructions for the use of volatile inhibitors for corrosion protection of inaccessible structures in tanks, cofferdams and other compartments of ships RD 31.28.65-82 Moscow Vo Mortechnikinformreklama 1983 43P.
4. I.L. Rosenfeld V.P.Persiantseva Atmospheric corrosion inhibitors M. Science 1985 279P.
5. R.S. Krymskaya V.I. Trusov A.I. Altsibeeva T.M. Kuzinova Corrosion Inhibitor H-M-1 Corrosion: materials, protection 2011 №9 P.32
6. V.I. Trusov E.A. Bezrodnykh E.A.Nazarov S.N. Lebedeva Corrosion inhibitor with chlorophyll copper derivatives Corrosion: materials, protection 2004 №10 P.29-30.
7. V.I. Trusov R.S. Krymskaya A.I. Gritskevich Inhibition of corrosion in the paint coating system Natural and Technical Sciences 2016 №11 (101) P. 262-265.

УДК 621.791.042.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ПОДВОДНОЙ СВАРКИ НА ГАЗООБРАЗОВАНИЕ

Виктор Васильевич Мурзин

к.т.н., доцент кафедры сварки судовых конструкций
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

Киав Мин Сое

аспирант кафедры сварки судовых конструкций
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
e-mail: kyawminsoe4971@gmail.com

Вячеслав Михайлович Карпов

старший преподаватель кафедры сварки судовых конструкций
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
e-mail: clvr00@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается влияние режима подводной сварки на газообразование. Подводная сварка применяется для ремонта судов, строительства гидротехнических сооружений, морских нефтяных платформ и трубопроводов в речной и морской среде. Эти дефекты возникают в результате строительных работ, волнового воздействия и коррозии. Для восстановления этих металлоконструкций требуется применение высококачественных методов сварки. Для подводной сварки, электроды должны быть изолированы. Электроды для сварки в воде имеют водонепроницаемое покрытие, которое представляет собой пленку. Состав покрытия дополняют следующие элементы: смоляной парафин, целлулоидный лак. Процесс подводной сварки возможен за счет вытеснения жидкости испаряющимися газами при плавлении металла и электродного покрытия. Полученная газовая смесь выталкивает воду из сварочной ванны и позволяет удерживать дугу в газовом пузыре. В статье дан обзор литературы по подводной сварке и газообразованию. Также разработана установка для сбора выделяющихся газов. Полученные результаты представлены в виде графиков и таблиц, сделаны выводы по результатам исследования.

Ключевые слова: сварка, подводная сварка, сварки, сварочный, дуговая сварка, свариваемость стали, электрод, покрытие металла-порошковая электрода, флюса.

STUDY OF THE EFFECT OF UNDERWATER WELDING ON GAS FORMATION

Victor V. Murzin

Ph.D., associate Professor department of welding of ships structures
Saint-Petersburg state marine technical university
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

Kyaw Min Soe

Post-graduate student of welding of ships structures
Saint-Petersburg state marine technical university
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: kyawminsoe4971@gmail.com

Vyacheslav M. Karpov

senior lecturer of the Department of welding of ship structures
Saint-Petersburg state marine technical University
190121, St.-Petersburg, street Pilot, 10
e-mail: clvr00@gmail.com

Abstract

The article deals with the influence of underwater welding on gas formation. Underwater welding is used for repair of ships, construction of hydraulic structures, offshore oil platforms and pipelines in the river and marine environment. These defects occur as a result of construction works, wave action and corrosion. The restoration of these structures requires the use of high-quality welding techniques. For underwater welding, the electrodes must be insulated. Electrodes for welding in water have a waterproof coating, which is a film. The composition of the coating is supplemented by the following elements: resin paraffin, celluloid varnish. The process of underwater welding is possible due to the displacement of liquid by evaporating gases during the melting of metal and electrode coating. The resulting gas mixture pushes water out of the weld pool and keeps the arc in the gas bubble. The article reviews the literature

on underwater welding and gas formation. Also the installation for collecting the released gases is developed. The results are presented in the form of graphs and tables, the conclusions of the study.

Key words: welding, underwater welding, weld welding, arc welding, weld ability of steel, electrode coating, metal-cored electrode flux.

Введение

В работе проведен обзор литературы по подводной сварке и газообразованию. Также в ходе работы собрана установка для подводной сварки и сбора выделившихся газов. Проведены испытания на различных режимах сварки со сбором выделившихся газов. Описан ход эксперимента, приведены результаты в виде графиков и таблиц, сделаны выводы по результатам проведенных исследований.

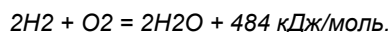
1. Газы при подводной сварке

При мокрой сварке свариваемый объект и сварщик находятся в водной среде. Технологический процесс происходит без каких-либо дополнительных сооружений и устройств [1-3]. Благодаря этому сварщик имеет довольно большую свободу перемещений. Мокрая сварка является наиболее эффективной и самой экономичной из существующих способов сварки под водой [4-11].

Дуга, в условиях сварки под водой, горит в газовой фазе, из которой формируется парогазовый пузырь. Наличие газовой фазы является необходимым условием существования дугового разряда. Формирование пузыря вокруг дуги связано с созданием в нем противодавления окружающей среде. Оно прямо пропорционально глубине погружения дуги в воду. Объем пузыря зависит от глубины, на которой горит дуга, и наличия газообразующих компонентов в обмазке электродов или шихте порошковых проволок [12].

Определенное влияние на объем парогазового пузыря оказывают электрические параметры дугового процесса.

От состава атмосферы парогазового пузыря в значительной степени зависят металлургические процессы сварки. Основной составляющей парогазового пузыря является водород. Большая его часть образуется при температуре выше 1000°С за счет термической диссоциации водяного пара с выделением свободного кислорода и водорода по следующей схеме



Для того, чтобы эта реакция проходила в заметной степени, необходима температура порядка 4000...5000 К. Процесс диссоциации воды проходит с поглощением теплоты. Согласно принципу Ле - Шателье, повышение температуры должно сдвигать равновесие процесса сторону образования водорода и кислорода. Часть ионов H^+ и OH^- образуется в реакционной зоне под действием ультрафиолетового излучения дуги за счет фотодиссоциации воды.

Существенное влияние на состав парогазового пузыря оказывают электрические параметры дуги. Установлено, что при сварке порошковыми проволоками ППС-АН1 и ППС-АН5 с увеличением напряжения на дуге концентрация водорода в

парогазовом пузыре возрастает, а соотношение между оксидом и диоксидом углерода сохраняется.

Сварка под водой может осуществляться "открытой" (горящей в парогазовом пузыре) или "заглубленной" (горящей под слоем шлака) дугой. Это было установлено в процессе проведения экспериментов, выполнявшихся в глубоководной камере С117. При сварке некоторыми опытными порошковыми проволоками с оболочкой из никелевой ленты на глубинах более 100 м дуга горела под слоем шлака. В этом случае, согласно показаниям приборов, электрические параметры дугового процесса стабилизируются. Швы имели гладкую поверхность с плавным переходом на основной металл. Поверхность шва была покрыта толстой шлаковой коркой с хорошей отделимостью. Такой дуговой процесс наблюдался вплоть до имитационной глубины 1200 м [13].

Обеспечение стабильности горения дуги под водой и мелкокапельного переноса электродного металла, которые взаимосвязаны между собой, являются важнейшей составной частью комплекса мер по улучшению процесса мокрой сварки под водой плавящимся электродом. В общем случае процесс переноса зависит от целого ряда параметров. К ним, в первую очередь, относятся режимы сварки, конструкция и диаметр плавящегося электрода, характеристики источника питания и параметры сварочной цепи, состав покрытия электрода или сердечника порошковой проволоки, глубины выполнения сварки, а также другие, сопутствующие работе под водой, параметры. От переноса металла в сварочную ванну зависят металлургия процесса сварки и качество сварного соединения.

Как уже отмечалось выше, основной составляющей парогазового пузыря при мокрой сварке под водой составляет водород, обладающий высокой теплопроводностью и потенциалом ионизации ($U_i = 13,5 \text{ В}$). Он вызывает контрагирование столба дуги, что, способствует увеличению электродинамической силы, действующей на каплю и удерживающей ее на торце электрода.

Введение в состав порошковой проволоки ППС-АН5 органических соединений стабилизирует размеры парогазового пузыря и способствует измельчению капель за счет увеличения мощности газового потока. Кроме органических соединений в проволоку ППС-АН5 вводится церий и лантан в количестве 0,15%, являющиеся хорошими стабилизаторами дугового разряда.

Металлургические процессы и формирование сварного соединения при дуговой подводной сварке плавящимся электродом происходят в специфических, по сравнению со сваркой на воздухе, условиях.

К таким условиям можно отнести:

- повышенную температуру дуги;
- высокую концентрацию кислорода и водорода в реакционной зоне;

- повышенное по отношению к атмосферному давление в реакционной зоне;
- попадание в реакционную зону химических соединений, растворенных в морской воде;
- интенсивное охлаждение металла шва и околошовной зоны.

2. Экспериментальная установка для мокрой сварки

Для исследования влияния режима подводной сварки на газообразование были проведены эксперименты. Для эксперимента необходим герметичный сосуд в котором возможно провести подводную сварку электродами со специальным покрытием и собрать выделившийся при сварки газ. Чтобы провести эксперимент, достаточно погрузить в воду только электрод, при этом не нарушив герметичность конструкции. Часть электрода оставалась вне сосуда для того, чтобы обеспечить возможность сварки с помощью обычного держателя. Это не позволяло использовать при сварке весь электрод, но для нахождения экспериментальным путём выделившихся газов необязательно сжигать весь электрод, а достаточно сжечь его часть и затем

вычислить количество выделившегося газа на 1 сантиметр электрода, так как газ будет выделяться примерно одинаково по всей длине электрода. Крепление клеммы также осуществлялось вне сосуда для подводной сварки, для этого, не нарушая герметичности, выводился стальной стержень. Это позволяло избежать необходимости использовать специальное оборудование для подводной сварки.

Для проведения эксперимента использовались плавящиеся электроды с основным покрытием УОНИИ 13/55 диаметром 3 миллиметра. Электроды УОНИИ 13/55 предназначены для ручной электродуговой сварки на постоянном токе углеродистых и низколегированных конструкционных сталей [14-15]. Сварка электродами с основным покрытием обеспечивает низкий уровень дефектов сварного шва и малое содержание водорода в наплавленном металле, вследствие чего вероятность образования пор и трещин значительно ниже, чем при использовании электродов с рутиловым и целлюлозным покрытием.

Таблица 1

Химический состав УОНИИ 13/55

C	Mn	Si	P	S
До 0,11	1,35	0,50	До 0,025	До 0,025

Таблица 2

Объём газа на 1 см электрода

№ опыта	Марка электрода	dз	Ток, А	Сожженная Часть Электрода(см)	Выделившийся Газ(мл)	Объём Выделившегося газа на 1см электрода в мл
1	УОНИИ 13/55	3	100	5	120	24
2	УОНИИ 13/55	3	100	8	205	25,6
3	УОНИИ 13/55	3	100	4.5	110	24,4
4	УОНИИ 13/55	3	115	7.4	320	43,2
5	УОНИИ 13/55	3	115	6	270	45
6	УОНИИ 13/55	3	115	8	350	43,8
7	УОНИИ 13/55	3	185	7	850	121,4
8	УОНИИ 13/55	3	185	9.3	1120	121,4
9	УОНИИ 13/55	3	185	11	1330	120,9

Таблица 3

Зависимости объёма выделившийся зоне газа от сварочного тока на 1см длина

Ток I, А	100	100	100	115	115	115	185	185	185
Объём газа 1см V, см ³	24	25,6	24,4	43,2	45	43,8	121,4	121,4	120,9

Таблица 4

Объём газа на 1 см электрода

№ опыта	Марка электрода	dз	Ток, А	Сожженная Часть Electroда(см)	Выделившийся Газ(мл)	Объём Выделившегося газа на 1см электрода в мл
1	УОНИИ 13/55	3	100	6	550	91,7
2	УОНИИ 13/55	3	100	6,5	600	92,3
3	УОНИИ 13/55	3	100	13	1200	92,3
4	УОНИИ 13/55	3	115	7	780	111,4
5	УОНИИ 13/55	3	115	6	700	116,7
6	УОНИИ 13/55	3	115	9	1000	111,1
7	УОНИИ 13/55	3	185	8	1450	181,3
8	УОНИИ 13/55	3	185	7,5	1400	186,7
9	УОНИИ 13/55	3	185	7	1330	190

Таблица 5

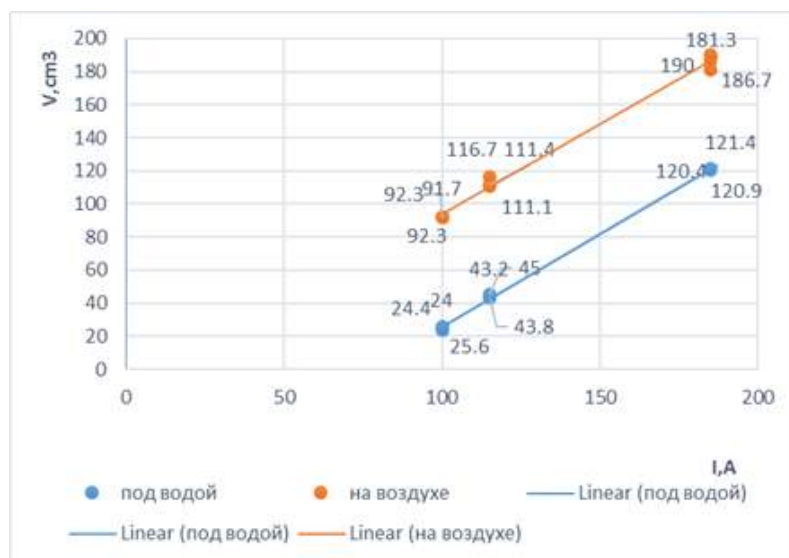
Зависимости объёма выделившийся зоне газа от сварочного тока на 1см длина

Ток I, А	100	100	100	115	115	115	185	185	185
Объём газа 1см V, см ³	91,7	92,3	92,3	111,4	116,7	111,1	181,3	186,7	190

Таблица 6

Зависимости объёма выделившийся зоне газа от сварочного тока на 1см длина

Ток I, А	100	100	100	115	115	115	185	185	185
Объём газа 1см V, см ³	24	25.6	24.4	43.2	45	43.8	121.4	120.4	120.9
Объём газа 1см V, см ³	91.7	92.3	92.3	111.4	116.7	111.1	181.3	186.7	190

Рис. 1. Чертёж результаты эксперимента при $I=100\text{А}, 115\text{А}, 185\text{А}$

Выводы

В состав газового пузыря входят: водород, кислород, угарный газ, углекислый газ, пары металла. Водород и кислород образуются вследствие термической диссоциации воды, а угарный и углекислый газы выделяются из компонентов электродного покрытия.

Как показали эксперименты сбора газов при подводной сварки чем больше сила тока, тем больше выделяется газа. Объяснить это можно тем, что чем больше энергии вкладывается в сварочную ванну и соответственно в область находящуюся возле сварки, тем активнее происходит процесс термической диссоциации воды на водород и кислород.

При сухой сварке так-же как и при подводной происходило газовыделение. В состав

электродного покрытия УОНИИ 13/55 входит мрамор и плавиковый шпат из которых и выделялись угарный и углекислый газы.

Увеличение объема выделившихся газов при сухой сварки с увеличением силы тока объясняется тем, что при увеличении тепловложения происходит увеличение температуры выделившихся газов, а с увеличением температуры газы расширяются.

Объем выделившихся газов при сухой сварки существенно выше объема выделившихся газов при подводной сварке при сравнении одних и тех же режимов сварки. Это связано с тем, что вода активно растворяет угарный и углекислые газы. При подводной сварки значительная часть выделившихся из мрамора газов растворялась водой и таким образом основной объем газов составлял водород.

Литература

1. Авилов Т. И. Исследование процесса дуговой сварки под водой // Свароч. производство. 1958. - № 5. - С. 12-14.
2. Авилов Т.И. Электроды для сварки и резки металла в воде /Сварочное производство. – 1955. № 6 - с. 13-16
3. Аснис А.Е., Игнатушенко А.А., Дьяченко Ю.В. Меры снижения содержания водорода в зоне термического влияния при механизированной подводной сварке // Автомат. сварка, 1983. № 8. - с. 1-4.
4. Анохина Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей // Журнал технической физики, 2010, том 80, с. 32-37.
5. Бонгефер К. Ф. Свойства свободных атомов водорода // Успехи физических наук Т. VIII. Вып. I. 1928 г. С. 61-97.
6. ГОСТ 9467-75 Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей.
7. ГОСТ 12.3.003-86 ССБТ. Работы электросварочные. Требования безопасности.
8. Ермаков Г.В., Перминов С.А., Кротов Л.Н. Статистические исследования кривой кипения. Первые результаты. Деп. в ВИНТИ 9.2.95. № 358-В 95. Екатеринбург: Ин-т теплофизики УРО РАН, 1995. 59 с.
9. Зацепина, Т. Н. Свойства и структура воды. / Издательство МГУ, 1974. – 167 с.
10. Кононенко В. Я. Металлургические особенности сварки в водной среде порошковыми проволоками //— 1996. — № 9. С. 22-26.
11. Кононенко В. Я. Подводная сварка и резка. – Киев: Университет «Украина», 2011. – 264 с.
12. Кононенко В. Я. Технологии подводной сварки и резки. Киев: Экотехнология, 2004. – 135 с.
13. Кононенко В. Я. Подводная сварка и резка. 2_е изд. Киев: Экотехнология, 2011. 264 с.
14. Максимов, С. Ю. Подводная мокрая сварка стали 17Г1С с предварительной обработкой кромок взрывом/ С. Ю. Максимов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 3. – с. 56-57.
15. Мурзин В.В., Руссо В.Л. Расчет состава шлака при сварке покрытыми электродами. Методические указания. СПб 2010. – 14 с.

References

1. Avilov, T. I. study of the process of arc welding under water // Equipment. production. 1958. - № 5. - P. 12-14.
2. Avilov T. I. Electrodes for welding and cutting of metal in water /Welding production. – 1955. № 6 - p. 13-16
3. Asnis A. E., Ignatenko A. A., Dyachenko Yu. V. the measures of reducing the hydrogen content in the heat affected zone in mechanized underwater welding // Automatic. welding, 1983. No. 8. - p. 1-4.
4. Anokhina E. V. Investigation of evaporation and boiling of liquids // Journal of technical physics, 2010, volume 80, pp. 32-37.
5. Bonhoeffer K. F. Properties of free atoms of hydrogen // Successes of physical Sciences, T.VIII. Issue. I. 1928, Pp. 61-97.
6. GOST 9467-75 coated metal Electrodes for manual arc welding of structural and heat-resistant steels.
7. GOST 12.3.003-86 OCCUPATIONAL SAFETY STANDARDS. Electric welding works. Safety requirement.
8. Ermakov G. V., Perminov S. A., Krotov L. N. Statistical studies of the boiling curve. Early result. DEP. in VINITI 9.2.95. No. 358-95. Ekaterinburg: Institute of Thermophysics, Ural branch of RAS, 1995. 59 PP.
9. Zatsepina, T. N. Properties and structure of water. / Publishing house of Moscow state University, 1974. – 167 p.
10. Kononenko V. Ya. and Metallurgical features of welding in an aqueous medium cored wires //-1996. — № 9. P. 22-26.
11. Kononenko V. Ya. Underwater welding and cutting. – Kyiv: University "Ukraine", 2011. – 264 p.
12. Kononenko V. Ya. Underwater welding and cutting technology. Kyiv: Ecotechnology, 2004. 135 p.
13. Kononenko V. Ya. Underwater welding and cutting. 2_е ed. Kyiv: Ecotechnology, 2011. 264 PP.
14. Maksimov, S. Yu. Underwater wet welding of steel 17G1S with pretreatment of edges explosion/ S. Yu. Maksimov // Automatic welding. – 2004. – № 3. S. 56-57.
15. Murzin V. V., Russo V. L. Calculation of slag composition during welding with coated electrodes. Methodical instructions. SPb 2010. 14 PP.

УДК 658.5+338.5

ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ И УСТАНОВЛЕНИЯ ЦЕН В СУДОСТРОЕНИИ

Алексей Васильевич Абрамов

профессор, доктор экономических наук, профессор кафедры экономики судостроительной промышленности
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.
e-mail: abr_ek@mail.ru

Анна Валентиновна Фирсова

доцент кафедры управления судостроительным производством
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Хмара

доцент, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики судостроительной промышленности Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

Аннотация:

Глобальное управление цепочками поставок, в частности, рассматривается как важный объект цифровой трансформации, оптимизации процессов и улучшения взаимодействия заинтересованных сторон с помощью информационных технологий с целью создания продукции по экономически обоснованным ценам.

Проведен анализ действующей нормативной правовой базы в области экспертно-аналитического сопровождения процесса определения трудоемкости и установления цен на проектирование, строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов.

Рассмотрена практика применения нормативно-методических документов при осуществлении информационно-аналитического обеспечения различных направлений деятельности органов исполнительной власти в судостроении и других отраслях промышленности.

В России существует незначительный опыт проведения таких работ. На основании анализа выявленных проблем сформулированы предложения по организации экспертно-аналитического сопровождения процесса определения трудоемкости и установления цен на проектирование, строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов, исходя из опыта практической реализации методических разработок в других отраслях народного хозяйства России.

Ключевые слова: информационно-аналитическое обеспечение, морская техника, нормативно-методический документ, параметрический метод, прогнозирование трудоемкости работ, оценка стоимости, сметный расчет, судостроительная промышленность.

EXPERT AND ANALYTICAL MAINTENANCE OF PROCESS OF DETERMINATION OF LABOR INPUT AND ESTABLISHMENT OF THE PRICES IN SHIPBUILDING

Alexey V. Abramov

the professor, Dr.Sci.Econ., head of the department of economics of the shipbuilding industry
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: abr_ek@mail.ru

Anna V. Firsova

the associate professor of the department of management of the shipbuilding industry
State Marine Technical University of Saint Petersburg
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

Dmitriy S. Khmara

the associate professor, Cand. Sci.Econ., associate professor of the department of economics of the shipbuilding industry
State Marine Technical University of Saint Petersburg
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

Abstract

Global management of chains of deliveries, in particular, is considered as important object of digital transformation, optimization of processes and improvement of interaction of interested parties by means of information technologies for the purpose of creation of production at economically reasonable prices.

The analysis of the operating regulatory legal base in the field of expert and analytical maintenance of process of determination of labor input and establishment of the prices of design, construction, repair, modernization and utilization of courts is carried out.

Practice of application of standard and methodical documents at implementation of information and analytical providing various activities of executive authorities in shipbuilding and other industries is considered.

In Russia there is an insignificant experience of carrying out such works.

On the basis of the analysis of the revealed problems offers on the organization of expert and analytical maintenance of process of determination of labor input and establishment of the prices of design, construction, repair, modernization and utilization of courts, as a matter of experience practical realization of methodical development in other branches of a national economy of Russia are formulated.

Keywords: information and analytical providing, sea equipment, the standard and methodical document, a parametrical method, forecasting of labor input of works, estimation of cost, budget calculation, the ship-building industry.

Введение

В развитии экономики страны существенную роль играет транспорт, в том числе морской и речной. Эффективная работа транспорта сказывается на функционировании всего народного хозяйства. Национальные судоходные компании вынуждены всерьез задумываться о развитии и об обновлении флота. Немалую роль в повышении потребности в гражданском судостроении играет активное освоение Арктической зоны России и развитие Северного Морского Пути.

В рыночной экономике судоходные компании распределяют заказы между верфями на условиях проведения тендеров. Позиция судовладельца при заключении контракта определяется факторами, влияющими на эффективность эксплуатационной деятельности. В первую очередь к таким факторам относятся строительная стоимость судна, непосредственно влияющая на эксплуатационные расходы. Чтобы выиграть тендер судостроительный завод должен заранее иметь представление о максимально допустимой стоимости нового судна, а, следовательно, и максимально возможных своих затратах на его постройку.

Существующее состояние дел в отечественном судостроении, необходимость выполнения поставленных в Стратегическом долгосрочном плане развития отрасли задач, требуют разработки действенной системы формирования учетно-экономической информации о затратах, как информационной базы управления.

Имеется положительный опыт влияния такой информации на финансовые результаты судостроительных предприятий от основной деятельности и отрасли в целом.

В общем, экспертно-аналитическое сопровождение представляет собой деятельность, основанную на предоставлении услуг по управлению финансово-промышленными группами. Основное назначение – оказание помощи экономическим субъектам по широкому спектру вопросов и проблем, а также в принятии решений для достижения оптимальных результатов.

Данный вид услуги появился на российском рынке совсем недавно и начал постепенно охватывать все большие и большие области экономики [1].

Целью данной работы – является исследование путей повышения эффективности деятельности по организации экспертно-аналитического сопровождения процесса определения трудоемкости и установления цен на проектирование, строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов.

На основании анализа выявленных проблем в статье сформулированы предложения по организации экспертно-аналитического сопровождения процесса определения трудоемкости и установления цен в судостроении, исходя из опыта практической реализации методических разработок в других отраслях народного хозяйства России

1. Материалы и методы

В настоящее время существующие методы прогнозирования затрат на постройку судов, можно сгруппировать в четыре группы: методы аналогии, методы интерполяции и экстраполяции, методы корреляционного и регрессионного анализа, комбинированные методы.

Основным недостатком, характерным для всех методов, является то, что определение уровня затрат производится без учета рыночной ситуации. При плановой экономике не уделялось большого значения прибыли отдельного судостроительного завода и возможным отклонениям фактических затрат от прогнозируемых (плановых). При рыночной экономике судостроительное предприятие должно найти компромисс между максимумом прибыли сделки и минимумом стоимости судна[4].

Высокая погрешность в обычных методах прогнозирования затрат на строительство может вызываться следующими обстоятельствами:

- несовершенством методов расчета себестоимости, нарушением границ их рационального использования;
- недостаточной проработкой конструкторско-технологической документации;
- отсутствием учета временного фактора;

- воздействием результатов деятельности завода - строителя;

- изменениями конструкции судна в процессе постройки;

- изменением цен на материалы, полуфабрикаты, покупные комплектующие изделия.

При проектировании судна необходимо помнить об ограничениях накладываемых Морским и Речным Регистрами, кроме того, судостроительный завод не может управлять всей стоимостью судна, т.к. в части комплектующего оборудования предприятие зависит от контрагентов.

Необходимо признать, что на сегодняшний день какая-либо актуальная нормативная правовая база в области мониторинга трудоемкости и установления цен на продукцию гражданского судостроения отсутствует, в отличие нормативно-правовой базы сформированной для сферы ГОЗ.

2. Результаты

Экспертно-аналитическое сопровождение процесса определения трудоемкости и установления цен на работы и услуги судостроительной промышленности должно представлять собой специально организованную, систематическую регистрацию текущих показателей трудоемкости, цен материальных ресурсов, потребляемых в ходе строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов с целью их обобщения, усреднения, анализа, прогноза, формирования расчетных показателей и использования в расчетах сметной стоимости.

Проведение такого рода мониторинга будет способствовать решению органами исполнительной власти следующих задач:

- осуществление государственной политики в сфере судостроения и судоремонта;

- выработка и принятие решений, соответствующих достижению целей, указанных в документах отраслевого стратегического планирования;

- обеспечение сметно-нормативной базы трудоемкости и ценообразования при строительстве, ремонте, модернизации и утилизации судов текущими ценами на материальные ресурсы и показателями трудоемкости;

- формирование информационного пространства текущих цен материальных ресурсов и показателей трудоемкости;

- создание и ведение электронной базы данных текущих цен;

- проведение всестороннего анализа и системного подхода к определению текущих цен на материальные ресурсы в судостроении и судоремонте;

- осуществлению прогнозирования цен;

- выработке нормативов трудоемкости.

Положительные аспекты от использования мониторинга получают и предприятия

судостроительной отрасли, в частности им будут доступны:

1. выработка и принятие решений, в соответствующих сферах деятельности;

2. решение инвестиционных задач;

3. проведение расчетов стоимости проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов;

4. анализ, планирование и контроль;

5. отбор наиболее экономичных поставщиков;

6. расчет договорных цен;

7. оценка стоимости судов.

Экспертно-аналитическое сопровождение должно основываться на следующих принципах:

1. достоверности (информация, используемая в рамках мониторинга, должна быть качественной и характеризоваться высокой степенью достоверности);

2. актуальности (информация, используемая в рамках мониторинга, должна объективно отражать существующее состояние рынка материалов используемых в судостроении);

3. постоянства (мониторинг осуществляется на постоянной основе с заданной периодичностью);

4. единства (мониторинг осуществляется по единым правилам);

5. доступности - информация о результатах мониторинга должна быть доступной для предприятий и организаций строительного комплекса и всех заинтересованных сторон.

Мониторинг осуществляется посредством сбора, электронной системы обработки, анализа и хранения информации. По окончании периода мониторинга формируются результаты в виде:

1. показателей текущих цен на материальные ресурсы, применяемые в судостроении, в том числе:

- по регионам, где расположены предприятия судостроительной промышленности;

- по государственному заказу;

- по видам конструкций.

- средние цены;

- расчетные цены (определенные с помощью индексов цен)

- отклонения цен (табл.1)

- абсолютное отклонение;

- относительное отклонение.

2. текущих показателей трудоемкости, в том числе:

- по регионам, где расположены предприятия судостроительной промышленности;

- по типу судов;

- по виду производства (проектирование, строительство, ремонт, модернизация, утилизация судов);

- по виду работ (табл. 2);

- по государственному заказу.

- запланированные показатели трудоемкости;

- отклонения показателей трудоемкости:

- абсолютное отклонение;

- относительное отклонение.

Таблица 1

Мониторинг отклонения текущих цен на материальные ресурсы от плановых

Показатель	Пл н	Фак т	Отклонение (абсолютное/ относительно е)
Цены без НДС, руб./т.			
Средневзвешенная цена стали хладостойкой повышенной прочности и улучшенной свариваемости			
Средневзвешенная цена труб (средний диаметр 219 мм, 70% оцинкованные и 30% стальные)			
Цены без НДС, руб./т.			
Судовые устройства			
Механизмы систем			
Электроэнергетическая система, внутрисудовые связь и управление,			
ГЭД и валы с винтами 1 х ... МВт, ВРК 3 х «...» МВт, ПОУ 2 х «...» МВт			
Стоимость главной энергетической установки без НДС, млн. руб.			
Паротурбогенераторная установка «...» - 2 шт., резервные ДГ 2 х «...» МВт, аварийные ДГ 3 х «...» МВт			
ГЭД и валы с винтами 1 х ... МВт, ВРК 3 х «...» МВт, ПОУ 2 х «...» МВт			
Стоимость конструктивных элементов с учетом нагрузки масс, руб./т.			
1. Корпус			
1.1. Корпус (сталь)			
2.1. Судовые устройства (якорное, швартовное, спасательное, грузовое, прочие)			
2.2. Системы без механизмов			
2.3. Механизмы систем.....			
..			

Показатели текущих цен можно дифференцировать по стадиям мониторинга:

- стадия сбора – показатели индивидуального уровня текущих цен на конкретизированные виды материальных ресурсов по конкретным предприятиям;
- стадия обработки – показатели средних текущих цен.

Информация, полученная в ходе мониторинга, является основой формирования текущих цен на ресурсы, применяемые в ходе строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов.

Перечень предприятий, подлежащих мониторингу, должен включать в себя все предприятия и организации занятые в процессе проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов и обеспечивать следующую группировку по следующим признакам:

1. ведомственная принадлежность, способов хозяйствования и форма собственности;
2. регион местонахождения;
3. по масштабу (малые, средние и крупные предприятия);
4. по уровню специализации.

Лучшим источником информации о ценах являются крупные и средние предприятия.

Для более достоверного определения стоимости материальных ресурсов и показателей трудоемкости, следует предусмотреть возможность аудита предоставляемых данных.

Таблица 2

Мониторинг отклонения показателей трудоемкости в разрезе видов работ

Вид работы	Мас-са, т.	Нормативная удельная трудоемкость, н-час./т.	Нормативная трудоемкость тыс. н-час.	Фактическая трудоемкость тыс. н-час.	Отклонение (абсолютное/относительное)
Обработка деталей ...					
Предварительная сборка конструкций ...					
Формирование ...					
Трубомотажные работы					
Механомонтажные работы					
Достроечные работы					
Испытания...					

Ведение электронной «он-лайн» базы данных, хранение и обработки исходной и расчетной информации целесообразно поручить организации, которая обладает соответствующим многолетним опытом в получении, обработки отраслевой информации и формировании на основе ее анализа отчетно-информационной документации.

Заключение

Для удовлетворения изменяющихся потребностей судостроительной отрасли в объективной информации необходимо:

При выполнении анализа данных, полученных в ходе мониторинга, могут быть достигнуты следующие результаты:

уточнение причин отклонения трудоемкости работ;

нормирование трудоемкости работ;

уточнение причин при значительных изменениях цен в сравнении с прошлым периодом;

отслеживание максимальных и минимальных границ текущих цен поставщиков однородных ресурсов;

исключение «случайных» и «единичных» поставщиков с очень низким или очень высоким уровнем цены, как не отражающих реальную динамику цен;

отслеживание и сопоставление данных, получаемых из различных внешних источников с результатами собственного мониторинга. К внешним источникам информации относятся, отраслевые организации и ассоциации, органы статистики, маркетинговые или консалтинговые агентства и другие компетентные организации;

анализ индексов цен, динамики их изменения и влияющих факторов;

анализ чувствительности сметной стоимости от изменений средних текущих цен, полученных в результате мониторинга.

Для удовлетворения изменяющихся потребностей судостроительной отрасли в объективной информации необходимо:

- создание и ведение информационных баз данных с использованием современных технологий формирования, управления, хранения и защиты информации;

- создание разветвленной многофункциональной системы сбора и передачи информации с центральным узлом сбора и обработки данных;

- постепенное приведение в соответствие с международными требованиями;

- повышение гибкости системы в зависимости от спроса

на информацию.

Необходимо отметить, что положительный эффект от использования мониторинга цен и трудоемкости получают не только органы исполнительной власти, но и сами предприятия судостроительной отрасли, в отношении которых этот мониторинг будет осуществляться [5]. В частности, им будут доступны:

- выработка и принятие решений, в соответствующих сферах деятельности;

- решение инвестиционных задач;

- проведение расчетов стоимости проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов;

- анализ, планирование и контроль;

- отбор наиболее экономичных поставщиков;

- расчет договорных цен;

- оценка стоимости судов.

При выполнении анализа данных, полученных в ходе мониторинга, могут быть достигнуты следующие результаты:

- уточнение причин отклонения трудоемкости работ;

- нормирование трудоемкости работ;

- уточнение причин при значительных изменениях цен,

в сравнении с прошлым периодом;

- отслеживание максимальных и минимальных границ текущих цен поставщиков однородных ресурсов;

- исключение «случайных» и «единичных» поставщиков с очень низким или очень высоким уровнем цены, как

не отражающих реальную динамику цен;

- отслеживание и сопоставление данных, получаемых из

различных внешних источников с результатами собственного мониторинга. К внешним источникам информации относятся: отраслевые организации и ассоциации, органы статистики, маркетинговые или консалтинговые агентства и другие компетентные организации;

- анализ индексов цен, динамики их изменения и влияющих факторов;

- анализ чувствительности сметной стоимости от изменений средних текущих цен, полученных в результате мониторинга.

Литература

1. Максимов Д.А., Микрюкова В.О. Экспертное сопровождение и его роль в развитии Российского предпринимательства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-4. – С. 746-748;
2. Мои торги. [Электронный ресурс] Экспертно-аналитическое сопровождение деятельности Минпромторга России в ходе поддержки реализации комплексных инвестиционных проектов. Режим доступа: <https://moi-torgi.ru/?action=Torgi/View&kod=0173100009516000229&src=44>
3. Персональный сайт. Архив материалов [Электронный ресурс]; Экспертно-аналитическое сопровождение реализации мероприятий Федеральной целевой программы развития образования. Режим доступа: http://rwing.clan.su/news/ehkspertno_analiticheskoe_soprovozhdenie_realizacii_meroprijatij_federalnoj_celevoj_programmy_razvitija_obrazovanija_na_2011_2015_gody_analitich/2016-02-24-179
4. Абрамов, А.В., Загородников М.А., Хмара Д.С. Практика определения затрат и установления цен на гражданскую морскую технику. Морской вестник № 1, 2017 с. 43-48
5. Абрамов, А.В., Фирсова А.В., Хмара Д.С. Пути развития информационного пространства отрасли в целях экспертно-аналитического обеспечения разработки нормативно-методической документации. Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1 (43).Т.1 – С. 78-82.

References

1. Maksimov D.A., Mikryukova V.O. Ekspertnoe soprovozhdenie i ego rol' v razvitii Rossijskogo predprinimatel'stva // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. – 2016. – No. 6-4. – Page 746-748;
2. Moi torgi. [Elektronnyj resurs] Ekspertno-analiticheskoe soprovozhdenie deyatel'nosti Minpromtorga Rossii v hode podderzhki realizacii kompleksnyh investicionnyh proektov. Rezhim dostupa: <https://moi-torgi.ru/?action=Torgi/View&kod=0173100009516000229&src=44>
3. Personal'nyj sajt. Arhiv materialov [Elektronnyj resurs]; Ekspertno-analiticheskoe soprovozhdenie realizacii meroprijatij Federal'noj celevoj programmy razvitiya obrazovaniya. Rezhim dostupa: http://rwing.clan.su/news/ehkspertno_analiticheskoe_soprovozhdenie_realizacii_meroprijatij_federalnoj_celevoj_programmy_razvitiya_obrazovaniya_na_2011_2015_gody_analitich/2016-02-24-179
4. Abramov, A.V., Zagorodnikov M.A., Hmara D.S. Praktika opredeleniya zatrat i ustanovleniya cen na grazhdanskuyu morskuyu tekhniku. Morskoj vestnik. №1, 2017 of page 43-48
5. Abramov, A.V., Firsova A.V., Hmara D.S. Puti razvitiya informacionnogo prostranstva otrasli v celyah ekspertno-analiticheskogo obespecheniya razrabotki normativno-metodicheskoy dokumentacii. Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – №. 1 (43). T.1 – Page 78-82.

УДК 658.5+614.8.067

МЕТОДИКА СОЦИАЛЬНО – ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Галина Андреевна Бронникова,

к.э.н., доцент кафедры эргономики, экологии и трудового права
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д.3
e-mail: kww@smtu.ru

Лилия Васильевна Бронникова

к.э.н., заведующий кафедрой эргономики, экологии и трудового права, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д.3
e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

Аннотация

Социально-экономическая оценка условий труда на промышленных предприятиях, в том числе в судостроительном производстве, а также оценка эффекта от их улучшения в настоящее время осуществляются с применением ограниченного количества показателей. Поэтому результат такой оценки не может быть объективным. Исследования большого объема материалов, относящихся к производственному травматизму, позволили авторам разработать приведенную в данной статье методику поэлементного расчета показателей экономических последствий производственного травматизма с применением расширенного количества исходных величин. Методика позволяет учесть взаимосвязь между тяжестью полученных травм и экономическими последствиями от них. Авторами разработана формула для укрупненного расчета.

Результаты расчета по предлагаемой методике позволяют учесть все разновидности потерь, издержек и ущерба от травматизма и использовать их для оценки эффективности вложений в конкретную профилактическую работу по предупреждению травматизма. Это должно способствовать повышению объективности обоснований при планировании мероприятий, связанных с улучшением условий труда.

Данная методика разработана на кафедре Эргономики, экологии и трудового права Санкт-Петербургского государственного морского технического университета и используется в учебном процессе для подготовки специалистов в судостроении.

Ключевые слова: методика, ущерб, производственный травматизм, последствия, эффективность мероприятий, охрана труда.

METHOD OF SOCIAL-ECONOMIC ASSESSMENT OF WORK-RELATED FATALITIES, INJURIES, AND ILLNESSES IN SHIPBUILDING INDUSTRY

Galina A. Bronnikova,

Ph.D., Associate Professor of the Department of Ergonomics, Ecology and Labor Law
St. Petersburg State Marine Technical University:
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kww@smtu.ru

Lilia V. Bronnikova

Ph.D., Head of the Department of Ergonomics, Ecology and Labor Law, St. Petersburg State Marine Technical University:
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: bronnikova.lili@gmail.com

Abstract

The socio-economic assessment of working conditions at industrial enterprises, including shipbuilding, as well as the assessment of the effect of their improvement is currently carried out using a limited number of indicators. Therefore, the result of such an assessment can not be objective. Studies of a large amount of materials related to work-related injuries have allowed the authors to develop the method of element-by-element calculation of the economic consequences of work-related injuries given in this article using an expanded number of initial values. The technique allows to take into account the relationship between the severity of the injuries and the economic consequences of them. The authors have developed a formula for enlarged calculation.

The results of the calculation according to the proposed method allow taking into account all types of losses, costs and damage from injuries and use them to assess the effectiveness of investments in specific preventive work on injury prevention. This should help to increase the objectivity of justifications when planning activities related to improving working conditions.

This methodology was developed at the Department of Ergonomics, Ecology and Labor Law of St. Petersburg State Maritime Technical University and is used in the educational process for the training of specialists in shipbuilding.

Key words: methods, damage, work-related injuries, consequences, effectiveness of measures, labor protection.

Введение

Оценка трудовой деятельности, касающаяся конкретных условий труда, уменьшение негативного воздействия отрицательных факторов производственной среды, снижение травм во время трудовой деятельности - это те факторы, которые способствуют улучшению показателей предприятия в части сокращения расходов и увеличения прибыли. Современное производство характеризуется интенсивным использованием сложных технических систем. Средства производства становятся все более автоматизированными и энергонасыщенными. Тем не менее, на производстве основным звеном по-прежнему остается человек – управляющий, обслуживающий и контролирующий работу оборудования и процессы производства. Поэтому, уровень здоровья человека, его заинтересованность трудом, качеством конечного продукта определяют уровень развития экономики государства в целом.

Общество столкнулось с проблемой, когда развитие технического прогресса оказывает негативное влияние на безопасность человека и окружающей среды. По данным статистических исследований, воздействие негативных факторов на производственную деятельность человека приводит к увеличению количества и тяжести несчастных случаев на производстве, увеличению травм и профессиональной заболеваемости. Эти процессы определяются качеством существующих систем управления и планирования производства с точки зрения охраны труда, соблюдением инструкций по охране труда и использованием методов защиты от вредных и опасных факторов производства [1].

1. Методика определения экономических последствий от производственного травматизма

При детальной проработке решения проблемы по улучшению условий труда становится очевидно, что необходимо использовать такой механизм оценки безопасности труда, который был бы выгодным всем заинтересованным сторонам:

- работодателю - позволит снизить расходы на выплаты пострадавшим за счет уменьшения суммы компенсаций при утрате трудоспособности;
- исполнителю - сохранить потенциал своего здоровья;
- государству - сократить выплату компенсации по международным договорам по охране труда.

Определение числовых значений всех показателей, характеризующих экономические последствия травматизма, является трудоемкой и многоплановой работой. В качестве итогового результата данной работы представлена разработанная авторами методика определения ущерба от несчастных случаев и производственного травматизма, которая

реализована на одном из судостроительных заводов, а также применяется для обучения студентов СПбГМТУ [5].

Методика называется «Идентификация и определение показателей, характеризующих экономические последствия производственного травматизма». Её разработка включает в себя несколько этапов:

1. Анализ документооборота, позволяющий выявить структуру показателей, характеризующих экономические последствия травматизма различной тяжести (рис. 1).

2. Разработка методики определения исходных величин для расчета.

3. Проведение исследований с использованием методики определения численных значений исходных величин, необходимых для расчета показателей (табл.1).

4. Проведение анкетного опроса специалистов предприятия для определения численных значений трудозатрат на расследование несчастных случаев различной тяжести и устранение их последствий.

5. Проведение поэлементного расчета показателей и суммарных значений потерь предприятия, социальных издержек и народно-хозяйственного ущерба от случаев микро- (М), легкого (Л) и тяжелого (Т) и всего травматизма за отчетный период.

1. Потери предприятия (П):

- расследование несчастных случаев

$$П_1^M = Zr_M \cdot Ч_M; \quad П_1^L = Zr_L \cdot Ч_L; \quad П_1^T = Zr_T \cdot Ч_T;$$

- устранение последствий

$$П_2^M = Zu_M \cdot Ч_M; \quad П_2^L = Zu_L \cdot Ч_L; \quad П_2^T = Zu_T \cdot Ч_T;$$

- компенсация временной утраты трудоспособности

$$П_3^M = ZД_M; \quad П_3^L = ZД_L; \quad П_3^T = ZД_T;$$

- компенсация постоянной утраты трудоспособности

$$П_4^T = \sum \frac{ЕП; РИ; ДУ;}{СКЛ; УИ; ДВК};$$

- замена и восстановление утраченных (поврежденных) материальных ценностей

$$П_5^M = \sum МЦ_M; \quad П_5^L = \sum МЦ_L;$$

$$П_5^T = \sum МЦ_T.$$

Суммарные потери предприятия $\sum П_i^{M, L, T}$.

2. Социальные издержки (С):

- экстренная медицинская помощь

$$C_1^M = m_n \cdot Ч_M; \quad C_1^L = m_n \cdot Ч_L; \quad C_1^T = m_n \cdot Ч_T;$$

- лечение и реабилитацию

$$C_2^M = m_n \cdot N \cdot Ч_M; \quad C_2^L = (0,78m_n + 0,22m_c) \cdot Д_L;$$

$$C_2^T = (0,78m_c + 0,22m_n) \cdot Д_T;$$

- профессиональное обучение - $C_3^T = dC_T$;
Суммарные социальные издержки - $\sum C_i^{M.L.T}$

3. Народнохозяйственный ущерб (Н):

- расследование несчастных случаев

$$H_1^M = (v - z) \cdot r_M \cdot \chi_M; \quad H_1^L = (v - z) \cdot r_L \cdot \chi_L;$$

$$H_1^T = (v - z) \cdot r_T \cdot \chi_T;$$

- устранение последствий

$$H_2^M = (v - z) \cdot u_M \cdot \chi_M; \quad H_2^L = (v - z) \cdot u_L \cdot \chi_L;$$

$$H_2^T = (v - z) \cdot u_T \cdot \chi_T;$$

- утраченная трудоспособность

$$H_3^M = (v - z) \cdot d_M; \quad H_3^L = (v - z) \cdot d_L;$$

$$H_3^T = (v - z) \cdot (d_T + d_y)$$

Суммарный ущерб народному хозяйству

$$\sum H_i^{M.L.T}$$

Суммарные экономические последствия:

$$\sum \mathcal{E}П = \mathcal{E}П_M + \mathcal{E}П_L + \mathcal{E}П_T$$

Статистическая обработка численных значений всех показателей производится с применением формулы для расчета суммарных значений

экономических последствий производственного травматизма за отчетный период - $\sum \mathcal{E}П$:

$$\sum \mathcal{E}П = 0,25N_M + 0,153D_L + 0,053 \sum_{r=1}^n D_y, \quad \text{тыс.}$$

руб.

где: N_M – количество микротравмированных, чел.;

D_L – число дней временной нетрудоспособных у легко травмированных, чел.-дни; $\sum D_y$ –

суммарный эквивалент утраченной трудоспособности тяжело травмированных – вычисляется для каждого случая по формуле $D_y = (B_L - B_{II}) \cdot \Phi$, где: B_L – возраст получения

пенсии каждого тяжело травмированного, лет; B_{II} – возраст каждого тяжело травмированного в момент получения инвалидности, лет; Φ – годовой фонд рабочего времени одного работника, чел.-дни; r – порядковый номер тяжелого случая травматизма; n – количество случаев тяжелого травматизма.

Расчет проводится в соответствии с законодательством РФ [2,3,4].

Основным преимуществом приведенной формулы является возможность быстрого определения суммарного значения экономических последствий травматизма.



Рис. 1 Структура показателей экономических последствий производственного травматизма

Таблица 1

Исходные данные, используемые в поэлементном расчете экономических потерь предприятия

Наименование исходных величин	Обозначения	Размерность	Численные значения	Источники получения реальной информации
1	2	3	4	5
Количество травмированных: – микро-; – легко; – тяжело	$Ч_m$ $Ч_l$ $Ч_t$	чел. "- "-		Документы подразделения охраны труда предприятия
Количество дней нетрудоспособности у травмированных: – микро-; – легко; – тяжело	$Д_m$ $Д_l$ $Д_t$	чел.-дни "- "-		Результаты исследования автора Г.А. Бронниковой
Эквивалент утраченной трудоспособности тяжело травмированных	$\sum_j^n D_y$	чел.-дни	-	Определяется для каждого случая тяжелого травматизма
1	2	3	4	5
Стоимость материальных ценностей, утраченных вследствие травматизма: – микро-; – легкого; – тяжелого	$МЦ_m$ $МЦ_l$ $МЦ_t$	тыс. руб. "- "-	—	Акт Н-1
Среднемесячная заработная плата одного рабочего	$З_m$	руб./чел.-мес.	—	Документы экономических служб предприятия
Среднедневная заработная плата одного рабочего	Z	руб./чел.-день	—	Документы экономических служб предприятия
Среднедневная выработка одного рабочего	V	руб./чел.-день	—	Документы экономических служб предприятия
Трудозатраты на расследование случая травматизма: – микро-; – легкого; – тяжелого	r_m r_l r_t	чел.-дни/случ. "- "-	1,6 10,0 25,0	Результаты исследования автора Г.А. Бронниковой
Трудозатраты на устранение последствий травматизма: – микро-; – легкого; – тяжелого	U_m U_l U_t	чел.-дни/случ. "- "-	1,3 16,0 35,5	Результаты исследования автора Г.А. Бронниковой
Стоимость медицинской помощи	m_n	руб./случай	—	Данные учреждений здравоохранения
Стоимость 1 дня амбулаторного лечения	m_a	руб./чел.-день	—	Данные учреждений здравоохранения
Стоимость 1 койка места стационарного лечения	m_c	руб./чел.-день	—	Данные учреждений здравоохранения
Число обращений к медицинской помощи микро-травмированными	N	обр.	3	Документы учета обращений за мед. помощью (журналы мед. служб)
Стоимость обучения одного рабочего	d	руб./чел.	—	Данные учреждений проф.-технического образования
Количество тяжело травмированных в предыдущие периоды. Из них: – инвалидов I гр.; – инвалидов II гр.;	I_I I_{II}	чел. чел.	—	Документы управления персоналом и бухгалтерского учета

Наименование исходных величин	Обозначения	Размерность	Численные значения	Источники получения реальной информации
1	2	3	4	5
Выплаты и пособия тяжело-травмированным: – единовременные пособия; – регрессные иски к пенсионному фонду; – доплаты за увечье; – санаторно-курортное лечение; – уход за инвалидами; – другие выплаты и компенсации	ЕП РИ ДУ СКЛ УИ ДВК	руб. "-" "-" "-" "-" "-"	— $P_m \cdot I \cdot 12$ $(Z_m - P_m) \cdot I \cdot 12$ СЛП · И $У \cdot I_1 \cdot 12$ —	Документы бухгалтерского учета.
Среднемесячный размер пенсии	Пм	руб./чел.	—	Оперативная информация
Стоимость санаторно-курортного лечения с учетом проезда	СЛП	руб./чел.	—	Оперативная информация
Стоимость ухода за инвалидом	у	руб./чел.	—	Оперативная информация

Заключение

Изложенный пример методологического подхода к определению экономических последствий от несчастных случаев и травм на производстве позволяет в достаточно полном объеме определить экономические последствия и провести сравнительный анализ окупаемости средств, вложенных в профилактику производственного травматизма.

Следует понимать, что методика расчета экономического эффекта мероприятий по охране и безопасности труда не является единственным расчетным критерием целесообразности проведения мероприятий по улучшению условий труда. Такого рода оценка позволяет применить научно-обоснованные методы ранжирования мероприятий и распределения финансовых ресурсов.

Литература

- Кулькова И.А., Николаев Н.А. Методический подход к оценке эффективности труда работников малых предприятий, выполняющих функции развития // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/24EVN116.pdf>. (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/24EVN116 .
- Постановление Правительства РФ от 16.10. 2000. № 789 "Об утверждении Правил установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний".
- Федеральный закон Российской Федерации "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний" от 24.07.1998 N 125-ФЗ.
- Постановление Правительства РФ от 17.08.2007. № 522 "Об утверждении правил определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека".
- Бронникова Г.А., Бронникова Л.В. Безопасность жизнедеятельности: учеб.пособие /Г.А. Бронникова, Л.В. Бронникова. – СПб.: Издательство СПбГМУ, 2015. – 192 с.

References

- Kulkova I.A., Nikolaev N.A. Methodical approach to assessing the effectiveness of the employees of small enterprises, development functions//Internet magazine "SCIENCE STUDIES", Vol. 8, N 1 (2016) . <http://naukovedenie.ru/PDF/24EVN116.pdf>. (free access). The caps. with the screen. Armenian. Eng, Eng. DOI: 10.15862/24EVN116.
- Russian Federation Government Decree from 16.10. 2000. № 789 "On approval of the rules for establishing the degree of incapacity as a result of accidents at work and occupational diseases".
- Federal law of the Russian Federation "On compulsory social insurance against industrial accidents and occupational diseases" from 24.07.1998 N 125-FZ.
- Russian Federation Government resolution dated Aug. 17. № 522 "On approval of the rules for determining the degree of gravity of the harm caused to human health".
- Bronnikova G.A., Bronnikova, L.V. Safety: training allowance/G.A. Bronnikova, L.V. Bronnikova. -St. Petersburg: Publishing House Spbsmtu, 2015. -192 s.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.316.722.016.3

КОМПЕНСАЦИЯ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Борис Федорович Дмитриев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Сергей Яковлевич Галушин

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: gs@smtu.ru

Андрей Николаевич Калмыков

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергетики
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kan@smtu.ru

Марина Александровна Максимова

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: maximovama@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются методы компенсации неактивной мощности в судовых электроэнергетических системах, основанные на различных типах структур. К основным устройствам компенсации реактивной мощности относятся: синхронные генераторы, синхронные компенсаторы, статические компенсаторы, конденсаторные батареи, статический синхронный компенсатор. В качестве ограничения воздействия нежелательных гармоник напряжения или тока в сети используются пассивные фильтры. Однако в последние годы в связи с развитием элементной базы набирают популярность активные фильтры, из которых наиболее распространенный тип активного фильтра основан на инверторе напряжения. Силовая часть компенсаторов базируется на двух и трехуровневых трехфазных структурах, а также на комбинации однофазных структур. При компенсации неактивной мощности, до 10 МВ, целесообразно применять двухуровневые трехфазные схемы, особенно в судовой ЭЭС, где нулевой провод отсутствует. В статье приведено обоснование выбора структуры компенсатора неактивной мощности, а также представлены результаты их схмотехнического моделирования.

Ключевые слова: электрическая энергия, пассивные и активные фильтры, многоуровневые структуры, компенсаторы неактивной мощности.

COMPENSATION OF IDLE POWER IN SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEMS

Boris F. Dmitriev

Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Sergey Ya. Galushin

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Automation and Measurements
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: gs@smtu.ru

Andrey N. Kalmikov

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Power Engineering
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kan@smtu.ru

Marina A. Maksimova

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Automation and Measurements
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: maximovama@yandex.ru

Abstract

The article discusses methods for compensating idle power in ship power systems based on various types of structures. The main devices for idle power compensation include: synchronous generators, synchronous capacitors, static capacitors, capacitor banks, static synchronous capacitor. Passive filters are used to limit the effects of unwanted voltage or current harmonics. However, in recent years, in

relation to development of the element base, active filters are gaining popularity, of which the most common type of active filter is one based on a voltage inverter. The power part of capacitors is based on two and three-level three-phase structures, as well as on a combination of single-phase structures. When compensating for idle power, up to 10MV, it is advisable to use two-level three-phase circuits, especially in the ship's EPS, where there is no neutral wire. The article presents the rationale for choice of the structure of idle power capacitor, as well as the results of their circuit simulation.

Keywords : electrical energy, passive and active filters, multi-level structures, idle power capacitors.

Введение

Для современных судов и кораблей созданы эффективные системы электродвижения на основе гребных электрических двигателей (ГЭД) с винторулевой колонкой (ВРК). Управление режимами работы ГЭД осуществляется полупроводниковыми преобразователями частоты, применение которых значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах ЕЭЭС. Основными причинами являются уменьшение коэффициента мощности и появление высших гармоник в потребляемом токе. В результате этого снижается надежность работы потребителей, и увеличиваются потери электроэнергии. Поэтому уменьшение указанных негативных последствий является актуальной задачей [1, 2, 3, 4, 5].

В связи с этим, большое внимание уделяется вопросам, связанным с изучением и разработкой различных методов обеспечения качества электроэнергии, увеличения коэффициента мощности и фильтрации высших гармоник. В настоящее время, перспективным методом улучшения качества электроэнергии, является применение устройств управления реактивной мощностью и активной фильтрации, т.е. компенсаторов неактивной мощности [2, 6].

С развитием силовой электроники появилась элементная база для создания такого типа устройств. Современные, быстродействующие, полностью управляемые ключи на транзисторах и запираемых тиристорах, стали основой для разработки силовых активных фильтров-преобразователей для фильтрации. Благодаря их использованию можно существенно повысить качество электроэнергии на судах [2, 5].

Полная мощность включает активную и неактивные составляющие:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + T^2} \quad (1)$$

Неактивные составляющие полной мощности Q, T, D, N характеризуют колебания энергии между сетью и нагрузкой, при которых не совершается полезная работа, а сеть загружается неактивными составляющими тока.

Анализ показывает, что активную мощность переносит только синфазная напряжению составляющая основной (первой) гармоники прямой последовательности тока, являющаяся активной составляющей тока.

Мощность несимметрии характеризует междофазовый обмен реактивной мощности при несимметричной нагрузке. Высшие гармоники тока вызывают появление мощности искажения (T) и мощности несимметрии (N). В настоящее время существует много способов компенсаций неактивной мощности, которые существенно различаются принципами действия и их реализацией, а также эффективностью при

применении в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС).

К основным устройствам компенсации реактивной мощности относятся: синхронные генераторы, синхронные компенсаторы, статические компенсаторы, конденсаторные батареи, статический синхронный компенсатор.

Несмотря на их достоинства, такие как, высокий уровень быстродействия и надежности, низкая стоимость, высокая степень готовности простота в использовании и управлении, эти устройства имеют существенные недостатки. Основными недостатками являются низкие удельные массогабаритные показатели, обусловленные необходимостью использовать тиристоры, рассчитанные на управление полной мощностью компенсации, а также значительное искажение формы тока в реакторе. Поэтому использование этих устройств в корабельной и судовой ЭЭС не рационально.

В условиях ограничений объемов и площадей корабельных и судовых сетей, применение конденсаторных батарей нецелесообразно в связи с их большими массогабаритными показателями. Кроме этого, конденсаторные батареи вызывают пожароопасность, особенно в морской среде, где имеется большое количество солей. Это означает, что применение конденсаторных батарей в ЭЭС для компенсации неактивной мощности может решать задачу только частично.

1. Статический синхронный компенсатор

Статический синхронный компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) представляет собой преобразователь напряжения на управляемых силовых транзисторах с накопительным конденсатором на стороне постоянного тока, включенный через трансформатор к сети переменного тока. Из напряжения источника постоянного тока с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формируется синусоидальное напряжение.

Отличительной особенностью СТАТКОМа является предельное быстродействие и возможность генерировать заданный ток независимо от величины входного напряжения за счет энергии запасенной на конденсаторе.

Такой компенсатор способен генерировать реактивную мощность емкостного или индуктивного характера.

В настоящее время это самый эффективный компенсатор реактивной мощности, имеющий высокое быстродействие и наилучшие массогабаритные показатели, так как для обмена реактивной мощностью используется электролитический конденсатор на стороне постоянного тока, который обладает достаточно высоким удельным массогабаритным показателем.

2. Компенсация мощности искажения

Пассивные фильтры

Для ограничения воздействия нежелательных гармоник напряжения или тока в сети используются пассивные фильтры. Пассивный фильтр состоит из нескольких LC контуров, каждый из которых настроен в резонанс на определённой частоте высшей гармоники тока сети. Таким образом, токи высших гармоник замыкаются через эти цепочки, не проходя дальше по СЭЭС. Несмотря на низкую стоимость, пассивные фильтры имеют недостатки.

Активные фильтры

В последние несколько десятилетий была создана элементная база для практической реализации методов активной фильтрации.

Активный (силовой) фильтр (АФ) представляет собой 4-х квадрантный преобразователь напряжения, на полностью управляемых ключевых элементах, с емкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усредненное значение тока (напряжения), равное разности нелинейного (фильтруемого) тока (или напряжения) и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники. Активный фильтр обеспечивает компенсацию высших гармоник тока (или напряжения) сети путём генерирования высших гармоник тока (напряжения) в сеть, в противофазе с высшими гармониками тока (напряжения) сети.

По типу включения активные фильтры подразделяются на источники напряжения и источники тока, в зависимости от цели компенсации. Самый распространенный тип активного фильтра основан на инверторе напряжения. Эти фильтры имеют небольшие габариты, менее дороги и более просты в управлении. Потери мощности в них относительно меньше чем в активных фильтрах тока.

С использованием методов активной фильтрации, появилась возможность управления параметрами пассивных фильтров.

3. Структуры силовой части компенсаторов неактивной мощности

В настоящее время, некоторые структуры силовой части компенсаторов можно считать базовыми, поскольку на их основе строятся различные топологии. К базовым структурам, получившим наибольшее распространение относятся:

- двухуровневая трёхфазная структура (рис. 1);
- трёхуровневая трёхфазная структура (рис.2) (в английской литературе - neutral point clamped inverter «NPC»);
- трёхфазная структура, состоящая из трёх однофазных (в английской литературе - «H» структура (рис.3), имеющих общий накопитель на стороне постоянного тока (рис.4), далее называемая «H» структура

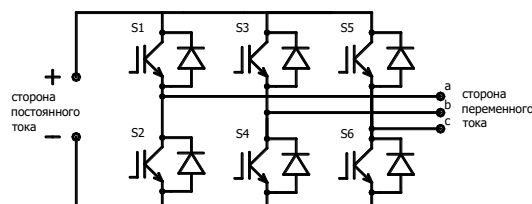


Рис. 1. Двухуровневая трёхфазная структура

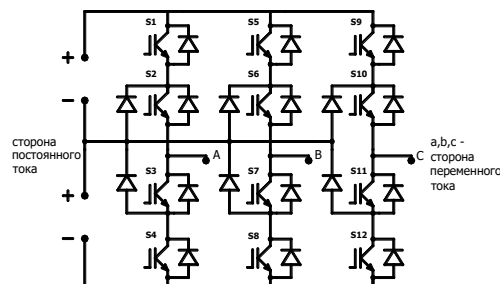


Рис. 2. Трёхуровневая трёхфазная структура

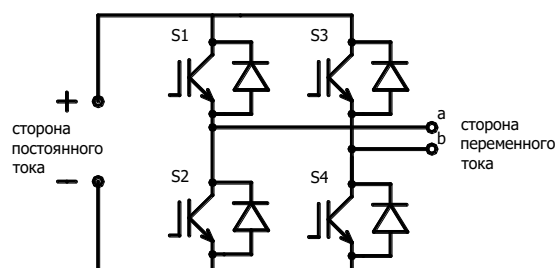


Рис. 3. Однофазная «H» структура

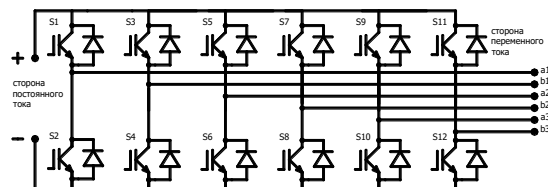


Рис. 4. Трёхфазная «H» структура, с общим накопительным конденсатором

Мощные активные фильтры (10-100MVA) состоят из группы таких преобразователей - модулей, подключённых последовательно или параллельно.

Сложные структуры

- Многоуровневая структура, состоящая из последовательного включения нескольких «H» топологий (рис.5);
- 12-ти импульсная, состоящая из последовательного или параллельного включения (при помощи трансформаторов) двух двухуровневых или трёхуровневых трёхфазных структур (рис.6);
- 24-х импульсная, состоящая из последовательного или параллельного включения двух 12-ти импульсных структур (рис.7);
- 48-ми импульсная, состоящая из последовательного или параллельного включения двух 24-х импульсных структур.

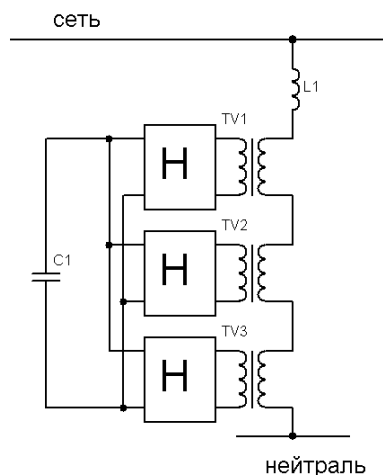


Рис. 5 Последовательное включение нескольких структур (Т1-Т3) с общим накопительным конденсатором (С1).

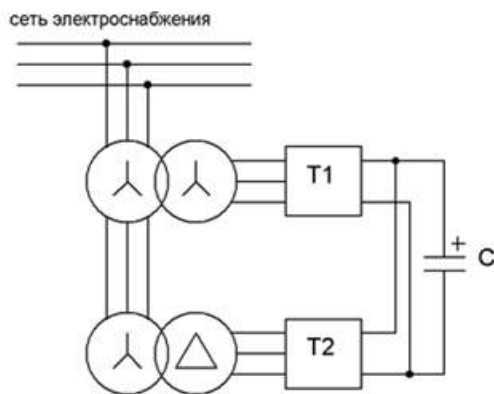


Рис. 6 12-ти - импульсная структура, состоящая из двух структур

Двухуровневая трёхфазная и трёхуровневая трёхфазная структуры называются также 6-ти импульсной, если частота коммутации ключей равна 50Гц. Пространственный вектор напряжения при этом имеет 6 положений в пространстве, а фазное напряжение имеет 6 ступенек.

Трёхфазная трёхуровневая структура стала основной в приложениях среднего напряжения. В преобразователе, имеющем эту структуру, номинальное значение напряжения ключевых элементов, в два раза меньше, чем напряжение на стороне постоянного тока, что позволяет отказаться от использования последовательного соединения ключевых элементов.

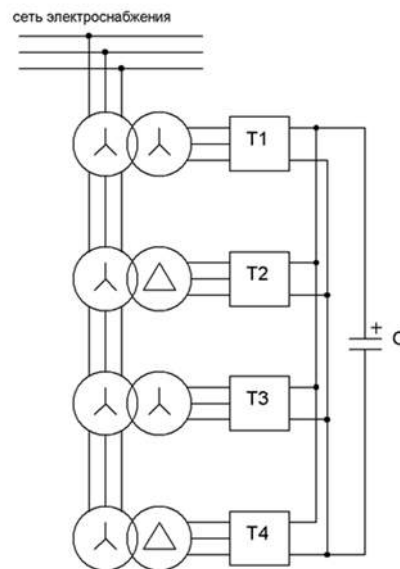


Рис.7. 24-х - импульсная структура, состоящая из нескольких структур

Это повышает эффективность использования ключевых элементов и надёжность их работы. Также напряжение преобразователя имеет три уровня (в отличие от двухуровневой трёхфазной схемы), что уменьшает величину генерируемых паразитных гармоник в сеть на частоте коммутации.

12-ти импульсная структура – включение последовательно или параллельно двух 6-ти импульсных (рис.6). Последовательное включение осуществляется посредством двух трансформаторов с соединением обмоток звезда-звезда и звезда-треугольник. На стороне сети трансформаторы соединяются последовательно.

Трансформаторы могут быть включены последовательно или параллельно. В первом случае суммируются напряжения, а во втором – токи двух преобразователей. Сигналы управления вторым преобразователем идентичны сигналам управления первым, но сдвинуты во времени на 30° основной гармоники.

24-х импульсная и 48-ми импульсная, состоят из последовательного или параллельного включения соответственно двух и четырёх 12-ти импульсных топологий (рис.7 прил.1). Минимальные по частоте высшие гармоники присутствуют в спектре на частотах 23, 25 и 47, 49 соответственно.

Для компенсации токов и напряжений обратной последовательности (симметрирование нагрузки) необходимо использовать компенсаторы на базе «Н» структур, так как при этом возможно независимо управлять током в каждой фазе трёхфазной системы. Составная структура на основе «Н» структур показана на рис. 5. При этом может использоваться общий накопительный конденсатор для всех преобразователей. Возможно последовательное включение однофазных преобразователей без использования трансформаторов, но при этом надо использовать отдельный накопитель (электролитический

конденсатор) на каждую однофазную «Н» структуру.

Использование «Н» структур упрощает конструкцию, вследствие уменьшения компонентов преобразователя – в каждом преобразователе используется на 6 диодов меньше по сравнению с трёхфазной трёхуровневой структурой. Также устраняется проблема небаланса напряжения конденсаторной батареи, присущая трёхуровневой трёхфазной структуре.

«Н» структуры нельзя включать звездой или треугольником, для создания 12-ти импульсной структуры, если используется общий накопительный конденсатор. Можно использовать отдельный накопительный конденсатор на фазу, но при этом необходимо осуществлять контроль за активной мощностью независимо по каждой фазе. В структуре с общим конденсатором больше возможности контроля напряжения конденсатора, так как каждая фаза может влиять на напряжение на накопительном конденсаторе. Вследствие этого потребуется увеличить суммарную ёмкость отдельных батарей конденсаторов. Однако, использование отдельных конденсаторных батарей, упрощает монтаж установки, так как значительно сокращается длина соединительных проводов, если учесть, что конденсаторы можно расположить возле шкафа вентилей соответствующей фазы. Сокращение длины проводников уменьшает паразитную индуктивность контура коммутации ключа, что улучшает характер переходных процессов.

Для сравнения эффективности использования различных топологий силовой части активных фильтров, вводятся следующие критерии сравнения:

- 1) Использование силовых модулей:
 - а) Отношение мощности одного силового модуля к полной мощности устройства;
 - б) Отношение номинального рабочего напряжения силового модуля к значению напряжения сети, к которой подключено устройство;
- 2) Возможности управления силовыми модулями с учётом схемотехнической реализации:
 - а) широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
 - б) амплитудно-импульсная модуляция (АИМ);
 - в) совместное использование ШИМ и АИМ модуляций.
- 3) Синусоидальность генерируемого напряжения и тока (гладкость, THD фактор). Результаты схемотехнического моделирования двухуровневой и трёхуровневой структур приведены на рис.8 и 9.
- 4) Эффективность стабилизации напряжения (тока) на стороне постоянного тока преобразователя.
- 5) Эффективность использования конденсаторного или индуктивного накопителя:
 - а) Номинальное значение напряжения или тока в накопителе;
 - б) Величина пульсации напряжения или тока в накопителе.

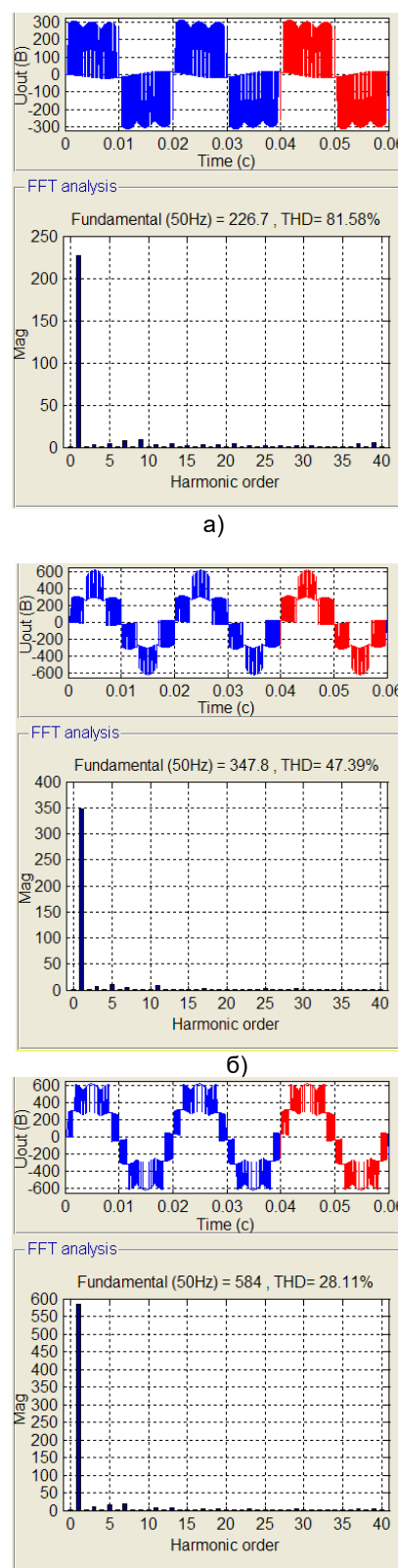


Рис. 8. Выходное напряжение и его спектральный состав при $R_n=20$ Ом, $L_n=0,1$ Гн; $f_y = 50$ Гц; $f_k = 2$ кГц и различных индексах модуляции а) $m=0,4$; б) $m=0,6$; в) $m=1,0$.

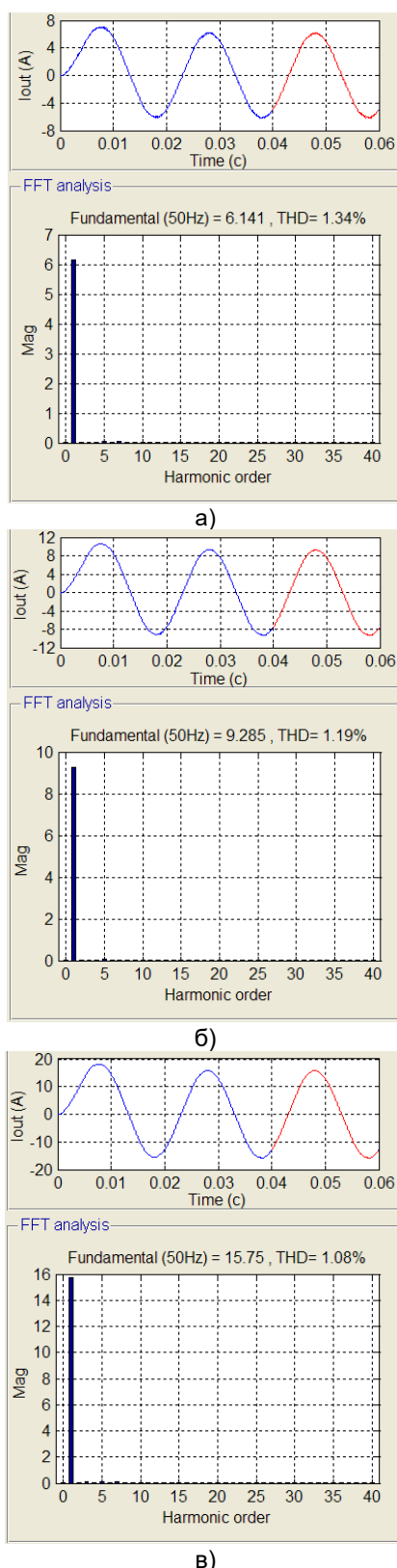


Рис. 9. Выходной ток и его спектральный состав при $R_n=20$ Ом, $L_n = 0,1$ Гн; $f_y = 50$ Гц; $f_k = 2$ кГц и различных индексах модуляции а) $m=0,4$; б) $m=0,6$; в) $m=1,0$.

При компенсации неактивной мощности, до 10МВ, целесообразно применять двухуровневые трехфазные схемы, особенно в судовой ЭЭС, где нулевой провод отсутствует. Это связано с тем, что

данные схемы силовой части не позволяют пропускать высшие гармоники 17-ю и 19-ю.

Существует два варианта решения вопроса компенсации неактивной мощности. Одним из них является использование выше предлагаемых структур. При применении дополнительных алгоритмов управления, одна и та же схема может выполнять роль компенсатора реактивной мощности (КРМ), а также АФ. Другим является сочетание в одном устройстве двух схем одновременно для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления (рис.10). Преимуществами второго варианта являются следующие [2]:

- существенное снижение потери мощности в устройствах. Это объясняется тем, что потеря мощности на силовых модулях пропорционально зависит от произведения тока на силовых модулях и частоты коммутации. Мощность высших гармоник тока существенно ниже, чем реактивная мощность, поэтому можно выбрать различные типы силовых модулей с существенно более высокой частотой коммутации для АФ, имея при этом меньшие потери мощности;
- достаточно простая система управления;
- низкая стоимость. Это обусловлено тем, что электронные ключи на большие мощности с высокой частотой коммутации на порядок дороже обычные ключи. С применением объединенной схемой, можно выбрать ключи на большие мощности с низкой частотой коммутации и на меньшие мощности с высокочастотной коммутацией.

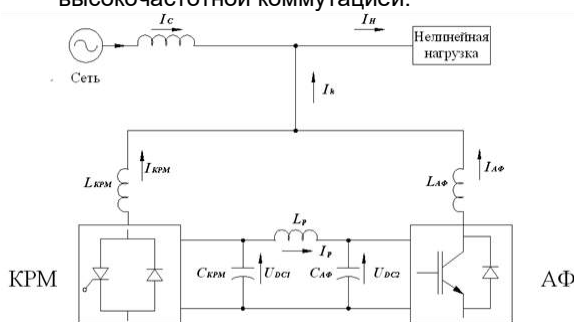


Рис. 10. Пример обобщенной схемы разрабатываемого компенсатора неактивной мощности

Благодаря использованию КРМ и АФ при объединении в одном устройстве, разрабатываемый компенсатор неактивной мощности имеет следующие особенности:

- низкочастотный преобразователь используется для компенсации реактивной мощности;
- преобразователь повышенной частоты низкого напряжения используется для компенсации высших гармоник тока сети, то есть выполняет функции активного фильтра;
- оба силовых преобразователя совместно используют одно и то же звено цепи постоянного тока с накопительными

конденсаторами, разделенными через небольшой индуктивный реактор для их развязки;

- активный фильтр выполняется на силовых модулях с малой токовой нагрузкой, обусловленной только высшими гармониками тока и может работать от более низкого напряжения на стороне постоянного тока (при наличии повышающего трансформатора на выходе).

Функция КРМ состоит в компенсации реактивной мощности, и он рассчитывается на реактивную мощность основной, первой гармоники. Другая силовая часть выполняет функцию компенсации высших гармоник тока. Для снижения стоимости и упрощения схемы управления, преобразователи КРМ и АФ используют общее звено постоянного тока с индуктивным фильтром развязки накопительных конденсаторов. Она необходима для исключения токов, обусловленных разницей частот пульсаций на накопительных конденсаторах КРМ и АФ. Из изложенного следует, что предлагаемая топология устройства способна обеспечить эффективную компенсацию неактивной мощности при меньших затратах.

Выводы

1. Характерной особенностью современных электроэнергетических систем является то, что значительная часть оборудования имеет в своем составе выпрямители, инверторы, преобразователи частоты различного

исполнения вольтамперные характеристики которых не линейны.

2. Обеспечение требуемых параметров качества электрической энергии с СЭЭС обеспечивается применением методов компенсации неактивной мощности.
3. Для устройств компенсации большой неактивной мощности ($>10\text{MVA}$) предпочтительней использовать схему с «Н» структурой. Эта схема имеет меньшее количество силовых элементов по сравнению трехфазной многоуровневой, снимает проблему небаланса напряжений на накопительных конденсаторах, позволяет управлять напряжением каждой фазы.
4. Компенсаторы неактивной мощности менее 10MVA могут быть успешно реализованы на основе трехфазных двухуровневых схем со структурой отдельных схем для силовой части- компенсации реактивной мощности основной гармоники и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления и в едином конструктивном исполнении. Это дает возможность использовать для компенсирующей части силовые модули, а в фильтрующей -высокочастотные с небольшими токами. Такая структура позволяет также с малыми затратами создавать модификации компенсатора с различными требованиями к частотному спектру фильтруемых гармоник тока.

Литература

1. Агунов А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах // СПбГМТУ, СПб, 2009. -134 с.
2. Розанов Ю.К., Рябчинский М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов, М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 632 с.
3. Дмитриев Б.Ф., Сеньков А.П., Калмыков А.Н., Токарев Л.Н. Единая электроэнергетическая система. // Электротехника. - 2017.- №5, с.5-9.
4. Дмитриев Б.Ф., Ясаков Г.С., Калмыков А.Н., Лебедев В.М. Методы повышения качества электроэнергии в единых судовых электроэнергетических системах. // Электротехника. - 2017.- №12, с. 24-29.
5. Дмитриев Б.Ф., Герман-Галкин С.Г. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей. // Электротехника. -2014- №3, стр.45-53.
6. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Мостовые выпрямители с импульсно-модуляционным управлением. // Морской вестник. - 2017.- №1 (61), с. 68-71.
7. Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Галушин С.Я. Структуры силовой части многоуровневых преобразователей в составе автономных систем электропитания. // Материалы VIII Международной конференции по автоматизированному электроприводу, г.Саранск, НИУ «МГУ» им. Н.П. Огарёва, 2014, Том 2. -572 с (76-81с).
8. Дмитриев Б.Ф., Воршевский П.А., Резниченко В.В. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания. // Электротехника, - 2017.- №12, с. 24-29.

References

1. Agunov A.V. Electricity Quality Management under Non-sinusoidal Modes // SPbGMTU, St. Petersburg, 2009. -134 p.
2. Rozanov Yu.K., Ryabchinsky M.V., Kvasnyuk A.A. Power electronics: a textbook for universities, M.: Publishing House MEI, 2007, 632 p.
3. Dmitriev B.F., Senkov A.P., Kalmykov A.N., Tokarev L.H. Unified power system. // Electrical Engineering. - 2017.- №5, p.5-9.
4. Dmitriev B.F., Yasakov G.S., Kalmykov A.N., Lebedev V.M. Methods to improve the quality of electricity in a single ship electric power systems. // Electrical Engineering. - 2017.- №12, p. 24-29.
5. Dmitriev B.F., German-Galkin S.G. The study of the spectral characteristics of multi-level semiconductor converters. // Electrical Engineering. -2014- №3, pp.45-53.
6. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Likhomanov A.M., Rozov A.Yu. Bridge rectifiers with pulse modulation control. // Maritime Bulletin. - 2017.- №1 (61), p. 68-71.

7. Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Galushin S.Ya. Structures of the power part of multi-level converters as part of autonomous power supply systems. // Proceedings of the VIII International Conference on Automated Electric Drive, Saransk, National Research University "Moscow State University" them. N.P. Ogareva, 2014, Volume 2. -572 with (76-81с).
8. Dmitriev B.F., Vorshevsky P.A., Reznichenko V.V. Methods and means of ensuring electromagnetic compatibility in ship power supply systems. // Electrical Engineering, - 2017.- №12, p. 24-29.

УДК 621.316.722.016.3

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЭЭС**Борис Федорович Дмитриев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Сергей Яковлевич Галушин

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: gs@smtu.ru

Андрей Николаевич Калмыков

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергетики
e-mail: kan@smtu.ru

Петр Александрович Воршевский

старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования судов
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: emc@corp.smtu.ru

Андрей Николаевич Москалев

кандидат технических наук, доцент кафедры математики,
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: moskalev239@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются перспективы развития многоуровневых преобразователей для судовых электроэнергетических систем. Одна из наиболее актуальных задач в преобразовательной технике - последовательное включение силовых модулей и каскадов, построенных на их основе. Увеличение выходного напряжения является единственным решением для сверхмощных применений, когда исчерпаны возможности параллельного соединения и токовая нагрузка на соединительные шины становится недопустимо высокой. В статье рассмотрены подходы к построению (MV - Medium Voltage) многоуровневых преобразователей, обеспечивающих функцию коррекции коэффициента мощности (ККМ, или PFC). Это позволяет получить синусоидальный ток в MV - сети, упростить конструкцию трансформаторов, снизить скорость изменения напряжения (dv/dt) на двигателе и обеспечить минимальные искажения формы выходного сигнала.

Необходимость применения многоуровневых преобразователей переменного напряжения (МПП) возникает в мощном тяговом электроприводе для транспортных систем наземного, надводного и подводного назначения и в электроэнергетических системах при транспортировке и преобразовании электрической энергии.

Ключевые слова: преобразование параметров электрической энергии, многоуровневые преобразователи, спектральные характеристики, индекс модуляции, широтно-импульсная модуляция.

METHODS TO IMPROVE THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY IN SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEMS**Boris F. Dmitriev**

Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: dmitrievbf@yandex.ru

Sergey Ya. Galushin

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Automation and Measurements
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: gs@smtu.ru

Andrey N. Kalmikov

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Power Engineering
e-mail: kan@smtu.ru

Petr A. Vorshevsky

Senior Lecturer at the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: emc@corp.smtu.ru

Andrey N. Moskalev

PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Mathematics Department,
190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3
e-mail: moskalev239@mail.ru

Abstract

The article discusses the prospects for development of multi-level converters for ship's electric power systems. One of the most urgent tasks in converter equipment is the sequential connection of power modules and cascades built on their basis. Increasing the output voltage is the only solution for heavy-duty applications when possibilities for parallel connection are exhausted and the current load on the busbars becomes unacceptably high. The article discusses approaches for design of (MV - Medium Voltage) multi-level converters that provide the power factor correction function (PFC). This allows obtaining a sinusoidal current in the MV network, simplify the design of transformers, reduce the voltage change rate (dv/dt) in the motor and ensure minimal output signal waveform distortion.

The need to use multi-level converters of alternating voltage occurs in a powerful electric traction drive for ground, surface-effect and underwater transport systems and in electric power systems during transferring and conversion of electrical energy.

Keywords: conversion of electrical energy parameters, multilevel converters, spectral characteristics, modulation index, pulse-width modulation.

Введение

Значительные успехи в разработке и применении МПП достигнуты благодаря зарубежным исследователям [1-7]. Однако, следует заметить, что базовые идеи построения МПП были заложены в работах проф. Т.А.Глазенко еще в середине прошлого века [8]. В цитируемой работе впервые появился термин «многоступенчатый преобразователь» при этом в понятие «многоступенчатый» вкладывался четкий физический смысл, обозначающий отношение максимального напряжения на нагрузке к максимальному напряжению на полупроводниковом ключе преобразователя. В данной статье при использовании термина «многоуровневый» авторы будут придерживаться предположенного в [8] физического смысла.

В настоящее время в зарубежной и отечественной литературе встречаются различные трактовки многоуровневости. Некоторые авторы считают все уровни (положительные, нулевые и отрицательные) в выходном напряжении преобразователя. В других работах считаются только положительные с учетом или без учета нулевого уровня.

В последние годы интерес к построению МПП постепенно возрастает и в России [9-19].

Многоуровневые полупроводниковые преобразователи, наряду с выполнением своего основного назначения, существенно улучшают качество выходного напряжения (тока). Существуют различные способы оценки качества энергоэффективности МПП.

Интегральным энергетическим критерием оценки энергоэффективности полупроводникового преобразователя следует считать коэффициент гармоник (THD – total harmonic distortion), который определяется после разложения несинусоидального выходного напряжения (тока) в ряд Фурье. Коэффициент гармоник зависит от схемы МПП, от количества уровней и от алгоритма управления преобразователем.

При построении МПП используются в основном три схемы:

- МПП с разделяющими (фиксирующими) диодами (DCI- Diode Clamped Inverter);
- МПП с «плавающими» потенциалами конденсаторов (FCI – Flying Capacitor Inverter);

- МПП на основе однофазных мостовых преобразователей (IHBI – Insulated H-Bridge Inverter)

Каждый из перечисленных МПП имеет свои преимущества и недостатки, которые хорошо известны и учитываются разработчиками при проектировании преобразователя

для конкретных условий.

В настоящей статье сравнение перечисленных МПП производится на основе расчета спектральных характеристик и определения коэффициента гармоник выходного напряжения. Базовой схемой для исследования и сравнения выбран трехуровневый однофазный инвертор напряжения [12].

1. Математическое представление способов формирования токов и напряжений многоуровневых преобразователей

Многоуровневые преобразователи переменного напряжения в регулируемое постоянное (переменное) с многократной коммутацией имеют две составные части - силовую цепь и систему управления. Силовая электрическая цепь содержит элементы (трансформаторы, диоды, ключи переменного тока), предназначенные для создания проводимости в течение управляемого интервала времени между входными и выходными выводами, т.е. между источником и нагрузкой. Силовая цепь может включать несколько этапов преобразования параметров электрической энергии - трансформация, выпрямление, широтно-импульсная модуляция и т.д.. Система управления задает начала и продолжительности интервалов проводимости силовых ключей и управляет процессом формирования кривой выходного напряжения. Таким образом, кривые выходного напряжения преобразователя состоят из участков кривых входного напряжения. Длительности этих участков определяются продолжительностью замкнутого состояния соответствующих им ключей в силовой цепи [8, 12, 19].

В настоящее время одним из важнейших факторов, влияющим на экономичность использования электрической энергии, является сокращение потребляемой полупроводниковыми преобразователями и регулируемой на их основе реактивной мощности.

Наиболее перспективной возможностью обеспечения энергосбережения и повышения

экономичности использования электрической энергии в полупроводниковых преобразователях является повышение качества энергопотребления за счёт использования топологий многоуровневого преобразования, связанных с новыми стратегиями управления (например, релейно-векторного) при реализации силовых схем полупроводниковых преобразователей с учётом современной элементной базы.

При этом становится возможным активное формирование потребляемых такими преобразователями сетевых токов и режимов энергопотребления из питающей сети.

Коэффициент мощности при наличии нелинейной нагрузки уменьшается из-за изменения формы кривой тока и сдвига по фазе между первой гармоникой потребляемого тока и напряжением сети, что ведёт к увеличению потерь в питающих сетях.

Анализ показал, что на уменьшение коэффициента мощности влияют следующие факторы:

- несинусоидальность потребляемых токов и приложенных напряжений, обусловленных нелинейной нагрузкой;
- несинусоидальность потребляемого тока, обусловленная наличием в системе сглаживающего фильтра.

Уменьшение коэффициента мощности приводит к необходимости применения более мощных источников электропитания (из-за роста потерь мощности), что сопровождается ужесточением требований, предъявляемых к надежности и безопасности работы преобразовательных устройств, а также ухудшает их удельные массогабаритные показатели и увеличивает стоимость.

Возросшие требования к степени электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразователей с питающей сетью потребовали новых технических решений для преобразователей с приданием им свойств активной коррекции коэффициента мощности. Многоуровневый принцип преобразования параметров электрической энергии позволяет осуществить практически синусоидальное потребление тока из питающей сети, синфазное с напряжением сети во всем диапазоне регулирования выходного напряжения [1, 6].

Силовая цепь может включать несколько этапов преобразования параметров электрической энергии - трансформация, выпрямление, широтно-импульсная модуляция. Система управления задает начала и продолжительности интервалов проводимости силовых ключей и управляет процессом формирования кривой выходного напряжения. Таким образом, кривые выходного напряжения преобразователя состоят из участков кривых входного напряжения. Длительности этих участков определяются продолжительностью замкнутого состояния соответствующих им ключей в силовой цепи.

Для каждого этапа преобразования выходные напряжения можно представить через соответствующие входные напряжения и коммутационные функции [8, 10, 12].

Коммутационная функция $FK_{pq}(t)$ математически описывает действия силового ключа, подающего входное напряжение U_q , на выход p . Когда $FK_{pq}=1$, это означает, что входное напряжение U_q подается на вывод p , когда $FK_{pq}=0$, напряжение U_q на этом выводе нет. Система S уравнений, характеризующая первый этап преобразования имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{11} &= FK_{11}(t)U_{\text{BX}1} + FK_{12}(t)U_{\text{BX}2} + \cdots + FK_{1m}(t)U_{\text{BX}m} \\ U_{12} &= FK_{21}(t)U_{\text{BX}1} + FK_{22}(t)U_{\text{BX}2} + \cdots + FK_{2m}(t)U_{\text{BX}m} \\ &\vdots \\ U_{1S} &= FK_{S1}(t)U_{\text{BX}1} + FK_{S2}(t)U_{\text{BX}2} + \cdots + FK_{Sm}(t)U_{\text{BX}m} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $U_{BX1}, U_{BX2}, \dots, U_{BXm}$ мгновенные значения входных напряжений. Система уравнений (1.1) может быть записана более кратко в следующей матричной форме

$$\begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{12} \\ \dots \\ U_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FK_{11}(t) & FK_{12}(t) & \dots & FK_{1m}(t) \\ FK_{21}(t) & FK_{22}(t) & \dots & FK_{2m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ FK_{s1}(t) & FK_{s2}(t) & \dots & FK_{sm}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{BX1} \\ U_{BX2} \\ \dots \\ U_{Bxm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$U_1 = FK(t) \cdot U_{\text{BY}}(t) \quad (3)$$

где FK - коммутационная матрица. Она определяет соотношение между входными и получаемыми выходными напряжениями. Аналогично описываются и все остальные этапы преобразования.

При питании от промышленных источников переменного тока входные напряжения являются симметричными синусоидальными функциями времени:

На рис. 3 изображена схема трехфазного многоуровневого преобразователя, на рис. 4 - его схемотехническая модель

$$U_{\text{BX}}(t) = \begin{vmatrix} U_{\text{BX}1}(t) \\ U_{\text{BX}2}(t) \\ \dots \\ U_{\text{BX}m}(t) \end{vmatrix} = U_{\text{BX}m} \begin{vmatrix} \sin \omega_{\text{BX}} t \\ \sin(\omega_{\text{BX}} t - \frac{2\pi}{m}) \\ \dots \\ \sin[\omega_{\text{BX}} t - (m-1)\frac{2\pi}{m}] \end{vmatrix} \quad (4)$$

где $U_{вхп}$ - амплитуда, одинаковая для всех напряжений от $U_{вх1}$ до $U_{вхп}$. Из (3) следует, что при заданных $U_{вхп}$, $\omega_{вх}$ и m , кривая выходного напряжения преобразователя полностью определяется набором матриц FK - для отдельных этапов преобразования.

Регулирование среднего значения выходного напряжения преобразователя обеспечивается за счет изменения параметров коммутационных функций (продолжительности замкнутых состояний соответствующих им ключей в силовой цепи). Представим элементы коммутационной матрицы $FK(t)$ рядами Фурье в тригонометрической форме

$$FK(t) = \gamma + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cos K(\Omega T + \alpha) \quad (5)$$

где γ - относительная продолжительность замкнутого состояния ключа в силовой цепи; U_{mk} - амплитуда k -ой гармонической составляющей для $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$; Ω - угловая частота коммутационной функции; α - начальная фаза.

После подстановки (4), (5) в (2) каждое выходное напряжение может быть представлено суммой ряда, содержащей постоянную составляющую, гармонические составляющие обусловленные коммутацией, и составляющие боковых частот, вследствие взаимодействия составляющих вызванных коммутацией и входных напряжений.

2. Математическое описание входного тока преобразователя

Кривые входных токов на отдельных этапах преобразования могут быть выражены через выходные токи при транспонировании коммутационной матрицы FK соответствующего этапа. Система m уравнений, характеризующая первый этап преобразования (рис.1) имеет вид

$$\begin{bmatrix} i_{BX1} \\ i_{BX2} \\ \vdots \\ i_{BXm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FK_{11}(t) & FK_{21}(t) & \dots & FK_{S1}(t) \\ FK_{12}(t) & FK_{22}(t) & \dots & FK_{S2}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ FK_{1m}(t) & FK_{2m}(t) & \dots & FK_{Sm}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{11} \\ i_{12} \\ \vdots \\ i_{1S} \end{bmatrix} \quad (6)$$

или

$$i_{BX}(t) = FK^T(t) \cdot i_I \quad (7)$$

Кривые входных токов, определяемые (6), являются результирующими кривыми, имеющими основную и искажающие составляющие тока, обусловленные коммутацией, т.е. каждый входной ток может быть представлен суммой синусоидальных составляющих.

Показатели качества входного тока и выходного напряжения в общем случае зависят от характера коммутационных функций. Путем оптимального выбора коммутационных функций могут быть оптимизированы отдельные показатели для того чтобы удовлетворить частным условиям применения преобразователя.

На рис.1 изображена схема трехфазного многоуровневого преобразователя.

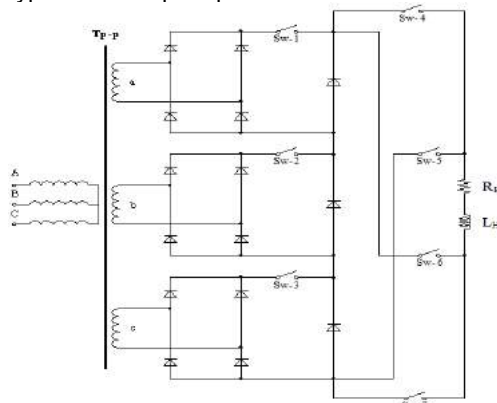
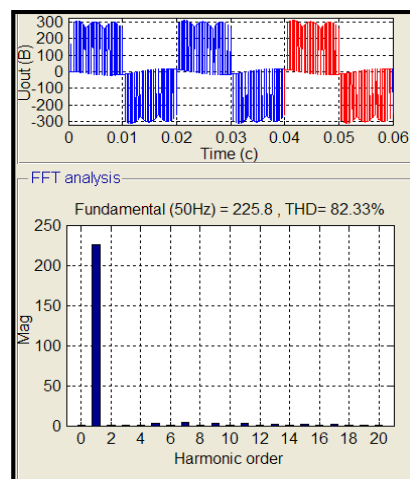


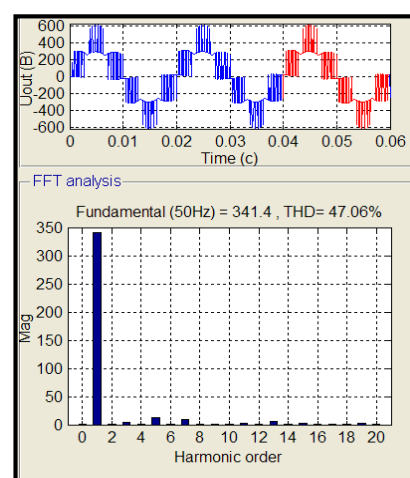
Рис. 1. Схема трехфазного многоуровневого преобразователя

3. Исследование спектральных характеристик выходного тока и напряжения

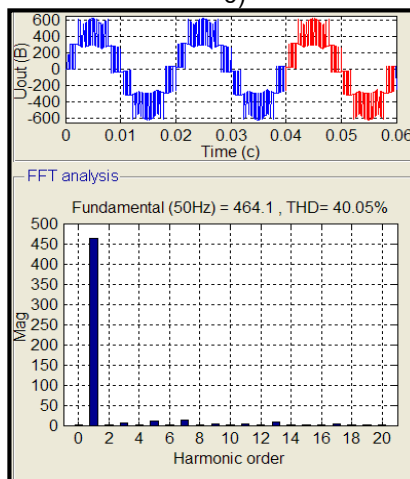
Для исследования спектральных характеристик (THD) от индекса (коэффициента) модуляции (рис. 2, 3) приведены спектральные составы выходного напряжения, выходного тока при управлении с синусоидальной ШИМ для активно-индуктивной нагрузки ($R_n=20$ Ом; $L_n = 0,1$ Гн, различных индексах модуляции: $m=0.2 \div 1$ и частоте $f_u = 50$ Гц)



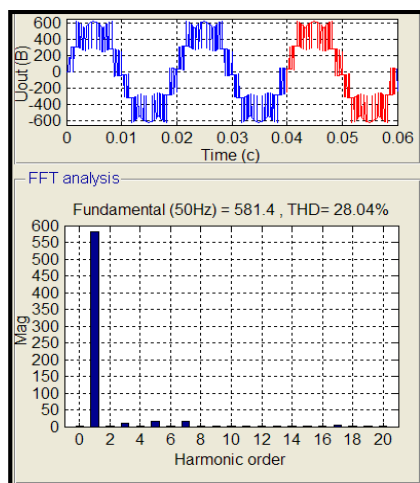
a)



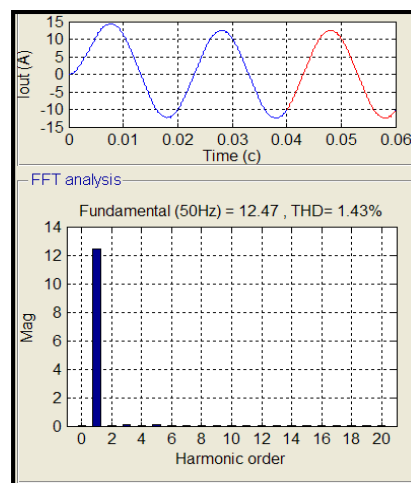
б)



в)

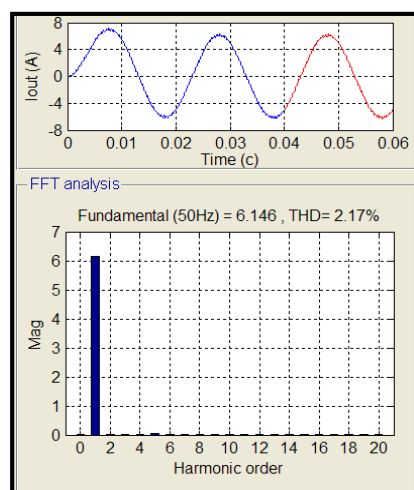


г)

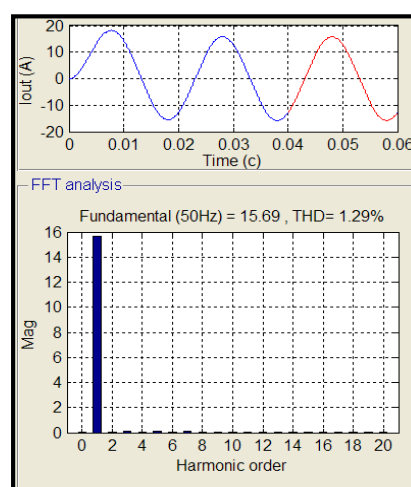


в)

Рис. 2. Выходное напряжение и его спектральный состав при $R_n=20 \text{ Ом}$, $L_n=0,1 \text{ Гн}$; $f_y=50 \text{ Гц}$; $f_k=1 \text{ кГц}$ и различных индексах модуляции, а) $m=0,4$; б) $m=0,6$; в) $m=0,8$; г) $m=1,0$.

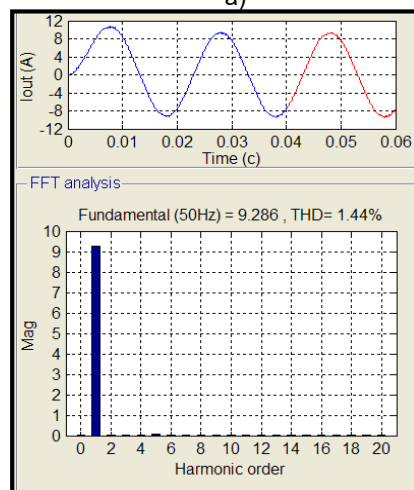


а)



г)

Рис. 3. Выходной ток и его спектральный состав при $R_n=20 \text{ Ом}$, $L_n=0,1 \text{ Гн}$; $f_y=50 \text{ Гц}$; $f_k=1 \text{ кГц}$ и различных индексах модуляции а) $m=0,4$; б) $m=0,6$; в) $m=0,8$; г) $m=1,0$.



б)

Источниками электроэнергии в различных автономных системах электропитания могут являться аккумуляторная батарея, топливные элементы, электрохимические генераторы [17].

Для подтверждения возможностей МПП выполнены исследования по реализации многоуровневого инвертора с питанием от источников постоянного напряжения (тока).

На рис. 4: представлена принципиальная схема многоуровневого инвертора

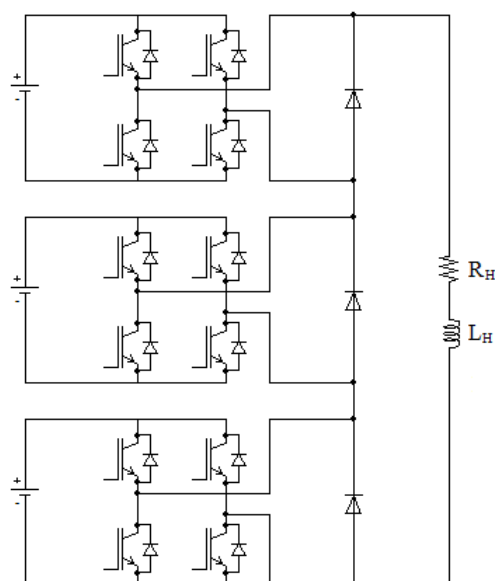


Рис.4. Принципиальная схема многоуровневого инвертора при питании от источника постоянного тока.

Выводы

Многоуровневый принцип формирования выходного напряжения позволяет реализовать высоковольтные преобразователи, например, для систем электродвижения транспортных средств и обеспечить следующие преимущества:

- высокую эффективность преобразования;
- низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения благодаря увеличению эквивалентной частоты и многоступенчатой формы сигнала;
- отсутствие больших перепадов напряжения на двигателе;
- малые искажения входного тока;
- простоту управления выходными параметрами преобразователя (скоростью, моментом, током, $\cos \varphi$).

Литература

1. Behzad Vafakhah. Multilevel Space Vector PWM for Multilevel Coupled Inductor Inverters Edmonton, Alberta 2010.
2. T. Bruckner, The active NPC Converter for Medium Voltage Drives, Verlag Shaker, 2006.
3. S. Bernet and R. Teichmann, A. Zuckerberger, and P. Steimer, "Comparison of highpower IGBTs and hard driven GTOs for high power inverters," in Proc. Conf. Rec. IEEEAPEC, 1998, pp. 711-718.
4. N. Celanovic, Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converter, Blacksburg, Virginia, 2000.
5. L. Li, D. Czarkowskj, Y. Liu, and P. Pillay, "Multilevel Space Vector PWM Technique Based on Phase-Shift Harmonic Suppression," IEEE/APEC, 2000, pp. 535-541.
6. Hartman M.P. Wielopoziomowe falowniki napiecia. Polska Akademia Nauk. Gdynia 2006.
7. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. «Энергия». Ленинградское отделение. 1973. с.303 с илл.
8. Михеев К.Е., Томасов В.С. Анализ энергетических показателей многоуровневых преобразователей систем электропривода. Научно-технический вестник НИУ ИТМО, 2002, Вып 1(77), с.46-52.
9. Харитонов С. А., Брованов С. В. Однофазный трехуровневый выпрямитель с улучшенным гармоническим спектром входного тока / С. А. Харитонов, // Электротехника. - 2006. - № 10.
10. Худяков В. Анализ свойств устройств силовой электроники в частотной области. «Силовая электроника» №1, 2006.
11. Дмитриев Б.Ф., Пьей Пью Тун. Математическое описание электромагнитных процессов в многоуровневых преобразователях для автономных систем электропитания. Морской Вестник, спец. Выпуск, №2 (125), с.40-45, 2013.
12. Дмитриев Б.Ф., Герман-Галкин С.Г. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей. Электротехника, №3, стр.45-53, 2014.
13. Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Галушин С.Я. Структуры силовой части многоуровневых преобразователей в составе автономных систем электропитания. VIII Международная конференция по автоматизированному электроприводу, г. Саранск, НИУ «МГУ» им. Н.П. Огарёва, 2014. Том 2. -572с (76-81с).
14. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Трёхфазная синусоидальная модифицированная широтно-импульсная модуляция первого рода в автономных инверторах. Морской вестник №1 (61), с. 69-72, 2017.
15. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Мостовые выпрямители с импульсно-модуляционным управлением. Морской вестник №1 (61), с. 68-71, 2017.
16. Дмитриев Б.Ф., Ясаков Г.С., Калмыков А.Н., Лебедев В.М. Методы повышения качества электроэнергии в единых судовых электроэнергетических системах. Электротехника, №12, с. 3-7, 2017.
17. Дмитриев Б.Ф., Воршевский П.А., Резниченко В.В. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания. Электротехника, №12, с. 24-29, 2017.
18. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Шабалина О.А. Влияние первичного источника питания на энергетические характеристики многоуровневых преобразователей напряжения в составе судовых электроэнергетических комплексов. Морской вестник №4 (68), с.63-73, 2018.
19. Дмитриев Б.Ф., Воршевский П.А., Резниченко В.В. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания. // Электротехника, - 2017.- №12, с. 24-29.

References

1. Behzad Vafakhah. Multilevel Space Vector PWM for Multilevel Coupled Inductor Inverters Edmonton, Alberta 2010.
2. T. Bruckner, The active NPC Converter for Medium Voltage Drives, Verlag Shaker, 2006.
3. S. Bernet and R. Teichmann, A. Zuckerberger, and P. Steimer, "Comparison of high-power IGBTs and hard driven GTOs for high-power inverters," in Proc. Conf. Rec. IEEEAPEC, 1998, pp. 711-718.
4. N. Celanovic, Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converter, Blacksburg, Virginia, 2000.
5. L. Li, D. Czarkowskj, Y. Liu, and P. Pillay, "Multilevel Space Vector PWM Technique Based on Phase-Shift Harmonic Suppression," IEEE / APEC, 2000, pp. 535-541.
6. Hartman M.P. Wielopoziomowe falowniki napiecia. Polska Akademia Nauk. Gdynia 2006.
7. Glazenko T.A. Semiconductor converters in DC electric drives. "Energy". Leningrad branch. 1973. p.303 with ill.
8. Mikheev KE, Tomasov B.C. Analysis of the energy performance of multi-level converters of electric drive systems. Scientific and Technical Bulletin of NRU ITMO, 2002, Vol. 1 (77), pp.46-52.
9. Kharitonov S. A., Brovanov S. V. A single-phase three-level rectifier with an improved harmonic spectrum of the input current / S. A. Kharitonov, // Elektrotehnika. - 2006. - № 10.
10. Khudyakov V. Analysis of the properties of power electronics devices in the frequency domain. "Power Electronics" №1, 2006.
11. Dmitriev B.F., Drinker Pio Tun. Mathematical description of electromagnetic processes in multilevel converters for autonomous power supply systems. Marine Herald, spec. Issue, №2 (125), pp. 40-45, 2013.
12. Dmitriev B.F., German-Galkin S.G. The study of the spectral characteristics of multi-level semiconductor converters. Electrical Engineering, №3, p.45-53, 2014.
13. Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Galushin S.Ya. Structures of the power part of multi-level converters as part of autonomous power supply systems. VIII International Conference on Automated Electric Drive, Saransk, National Research University "Moscow State University" N.P. Ogareva, 2014. Volume 2. -572s (76-81s).
14. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Likhomanov A.M., Rozov A.Yu. Three-phase sinusoidal modified pulse-width modulation of the first kind in autonomous inverters. Marine Bulletin number 1 (61), p. 69-72, 2017.
15. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Likhomanov A.M., Rozov A.Yu. Bridge rectifiers with pulse modulation control. Marine Bulletin number 1 (61), p. 68-71, 2017.
16. Dmitriev B.F., Yasakov G.S., Kalmykov A.N., Lebedev V.M. Methods to improve the quality of electricity in a single ship electric power systems. Electrical engineering, №12, p. 3-7, 2017.
17. Dmitriev B.F., Vorshevsky P.A., Reznichenko V.V. Methods and means of ensuring electromagnetic compatibility in ship power supply systems. Electrical engineering, №12, p. 24-29, 2017.
18. Dmitriev B.F., Galushin S.Ya., Kalmykov A.N., Shabalina O.A. The influence of the primary power source on the energy characteristics of multi-level voltage converters in the composition of the ship electric power complexes. Marine Bulletin number 4 (68), pp.63-73, 2018.
19. Dmitriev B.F., Vorshevsky P.A., Reznichenko V.V. Methods and means of ensuring electromagnetic compatibility in ship power supply systems. // Electrical Engineering, - 2017.- №12, p. 24-29.

УДК 622.33+662.732+622.78

К ВОПРОСУ О ПЕРЕРАБОТКЕ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ И ПОЛУЧЕНИИ БЕЗЗОЛЬНОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПРЯМОГО ВВОДА В ГАЗОВУЮ ТУРБИНУ

Юрий Аркадьевич Нифонтов

доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой "Экологии промышленных зон и акваторий"
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Российская Федерация, 190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: nifontov@yandex.ru

Андрей Михайлович Герасимов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Научно-производственная корпорация «Механобр-техника»
Российская Федерация, 199106, Россия, Санкт-Петербург, В.О., 22 линия, д. 3, корпус 5.
e-mail: rumpuss@gmail.com

Игорь Николаевич Бурцев

Врио Директора Института геологии Коми НЦ УрО РАН,
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Российская Федерация, Сыктывкар, Первомайская ул., 54,
e-mail: burtsev@geo.komisc.ru

Виктория Павловна Карпунина

инженер
Акционерное общество «Инженерный центр судостроения»
Российская Федерация,
198035, Россия, г. Санкт-Петербург, Межевой канал, д. 4
e-mail: 15-vika@mail.ru

Аннотация

Самым распространенным видом топлива на планете является уголь. Его запасы в Природе оцениваются в десятки триллионов тонн. Крупномасштабное использование угля в качестве источника энергии экономически целесообразно. Но доля углей высоких стадий метаморфизма с высокой удельной теплотой сгорания, низким содержанием золы, влаги и серы в общей массе добываемых углей менее 50 %. Основная часть добываемых углей низкого ранга (бурые, каменные: длиннопламенные и газовые). Их эффективное использование возможно только при улучшении технологических свойств, количественных и качественных показателей при сжигании. Традиционно используемые методы обогащения угля, основанные на удалении из угольной массы негорючей составляющей, не обеспечивают необходимого качества угля для более полного его использования и при "прямом вводе" угля в газовую турбину.

Поиск принципиально новых технических решений в области получения беззольного угля привел в Японии в середине 90-х годов XX столетия к разработке принципиально нового способа термической обработки углей органическими растворителями для экстрагирования органической составляющей. Полученный беззольный уголь был назван гиперуглем (ГУ). При достижении выхода ГУ в процессе экстракции ≥ 50 мас. % от горючей массы угля, достигнут высокий энергетический КПД, обеспечивающий экономически выгодное применение гиперугля в качестве топлива для газовых турбин с использованием внутрициклового газификации угля (бинарный цикл) – "Integrated Coal Gasification Combined Cycle – IGCC".

Ключевые слова: угли низшего ранга, внутрициклового газификация угля, органические растворители угля, экстрагирование органической составляющей, гиперуголь, топливо для газовых турбин

THE ISSUE OF PROCESSING LOW-GRADE COALS AND GETTING ASH-FREE COAL AS A FUEL FOR DIRECT INPUT INTO THE GAS TURBINE

Yuri A. Nifontov

professor, Doctor of technical Sciences
head of the department of ecology of industrial zones and water areas
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation
e-mail: nifontov@yandex.ru

Andrei M. Gerasimov

Candidate of technical Sciences, Senior Researcher
Scientific and Production Corporation "Mekhanobr-Technika"
Russian Federation, 199106, Russia, St. Petersburg, VO, 22 line, 3, building 5.
e-mail: rumpuss@gmail.com

Igor N. Burtsev

Acting Director of the Institute of Geology, Komi SC UB RAS,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher
Russian Federation, Syktyvkar, Pervomayskaya ul., 54,
e-mail: burtsev@geo.komisc.ru

Victoria P. Karpunina

the engineer
Joint Stock Company "Engineering center of shipbuilding"
Russian Federation, 198035, Russia, St. Petersburg, Mezhevoy Canal, 4
e-mail: 15-vika@mail.ru

Abstract

The most common type of fuel on the planet is coal. Its reserves in Nature are estimated at tens of trillions of tons. Large-scale use of coal as an energy source is economically feasible. But the share of coals of high stages of metamorphism with high specific heat of combustion, low ash, moisture and sulfur content in the total mass of mined coals is less than 50 %. The main part of the low-grade coal mined (brown, long-flame and gas). Effective use of low-grade coals is possible only with the improvement of technological properties, quantitative and qualitative indicators during combustion. Traditionally used methods of coal enrichment, based on the removal of the non-combustible component from the coal mass, do not provide the necessary quality of coal for its more complete use and with the "direct input" of coal into the gas turbine.

The search for fundamentally new technical solutions in the field of ashless coal production in Japan led in the mid-90s of the XX century to the development of a fundamentally new method of thermal treatment of coal with organic solvents for extracting the organic component. The resulting ashless coal was called Hyper-carbon (GU). When the yield of GU in the extraction process ≥ 50 wt. as a percentage of the combustible mass of coal, a high energy efficiency has been achieved, ensuring the cost-effective use of Hyper-carbon as a fuel for gas turbines using in-cycle coal gasification ("Integrated Coal Gasification Combined Cycle – IGCC").

Keywords: coals of lower rank, nutricology coal gasification, organic solvents, coal, extraction of the organic component, hypergol, fuel for gas turbines

Введение

Точная дата начала установления человечеством свойств природного угля не известна, достоверных сведений о ней за исключением отрывочных упоминаний в древних источниках не имеется. Но известно, что методы добычи, обогащения и использования природного угля – каменного (битуминозного) и бурого (лигнитов) непрерывно совершенствовались, что объясняется рядом основных причин, в том числе, экологическими, технологическими и экономическими.

Экологические причины

При прямом сжигании каменных и бурых углей выделяется большое количество летучих веществ с характерным острым запахом. В упоминании о "фракийском камне" (каменном угле, называемом так вне зависимости от стадии метаморфизма) Аристотелем (384-322 г. до н. э.) говорится, что он: "... при сгорании издает настолько неприятный резкий запах, что ни одна рептилия не в состоянии оставаться на месте" [1]. При увеличении объемов потребления природного угля, росло количество жалоб на загрязняющие воздух дым и неприятные запахи. В конечном итоге, это привело к тому, что в 1315 г. ремесленникам в Лондоне, и в 1348 г. – кузнецам в Цвиккау (Восточная Германия) было запрещено использовать каменный уголь. Запретительные меры по использованию природного угля в черте городов принимались и в других европейских городах-государствах. Это привело к первому, встречающемуся в источниках, технико-технологическому решению по подготовке к использованию природного угля,

закключающемуся в разработке и строительстве очагов и печей с дымоходами для отведения дымовых газов [2].

Негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека оказывали, и оказывают в настоящее время, и другие виды загрязнений, являющиеся следствием добычи, переработки и использования каменных и бурых углей. Так, только в России в 2016 г. [3]:

– в воздух поступило 58,4 тыс. т пыли, что составляет 0,15 кг пыли/т добытого угля;

– величина эмиссии в атмосферу метана и других газов (CO_2 , H_2S , SO_2), ароматических углеводородов достигла 879,5 тыс. т с концентрацией по отношению к объему добытого угля: 2,28 кг – C_xH_y /т, 0,03 кг – SO_2 /т, 0,09 кг – CO /т, 0,05 кг – NO_x /т;

– в водные объекты было сброшено 437,6 млн m^3 сточных вод, что соответствует концентрации 1,14 m^3 /т добытого угля.

При этом, из всего объема сброшенных сточных вод лишь 77,3 млн m^3 было нормативно очищено, а еще 27,1 млн m^3 — нормативно чистые без очистки. Оставшиеся 333,2 млн m^3 сточных вод (76 % от объема всех сброшенных вод) были загрязненными. Из них 209,0 млн m^3 были недостаточно очищены, а 124,2 млн m^3 вообще не подвергались очистке [3]. В дополнение ко всему, добыча и обогащение угля сопровождалась изъятием земель и образованием отходов, размещаемых на поверхности вблизи.

Всего было образовано 3236,6 млн т отходов, преимущественно представленных "инертными" — вскрышными и вмещающими породами. Из них 1526,9 млн т (47 % от суммарной массы отходов) было размещено во внешних отвалах, остальные были переработаны или использованы для

закладки выработанного пространства шахт и разрезов [3,4].

Значительная доля всего объема загрязнения окружающей среды при использовании угольного топлива принадлежит производству электрической и тепловой энергии на ТЭС: выбросы газообразных продуктов сгорания (SO_2 , NO_x , CO , парниковый газ – CO_2) и твердых частиц в атмосферу, сброс сточных вод в гидросферу, и изъятие земель для размещения золошлаковых отходов. Выбросы в атмосферу – одна из основных проблем (Рис. 1, Табл. 1) [5].

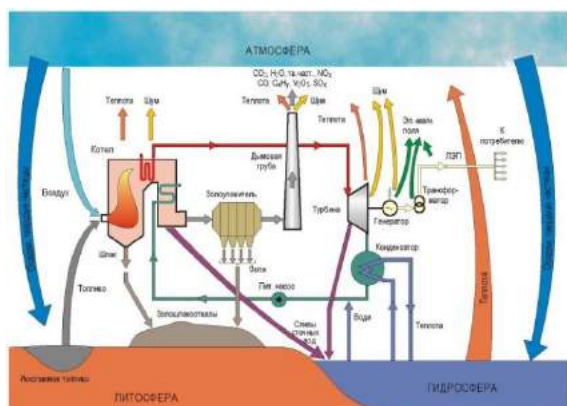


Рис. 1. Схема взаимодействия ТЭС с окружающей средой [5]

Таблица 1

Выбросы загрязняющих веществ в 2015 г. на крупнейших ТЭС России на твердом топливе, т. [5]

Наименование ТЭС	Всего	твердые вещества	диоксид серы	оксиды азота (в пересчете на NO_2)	оксид углерода
Рефтинская ГРЭС	281387	73087	141053	66571	676
Новочеркасская ГРЭС	71993	26334	31013	14079	567
Омская ТЭЦ-5	59483	11477	33581	13968	458

Золошлаковые отходы – не менее значительная проблема. В России образуется их 30 млн тонн в год. Для длительного размещения они складываются в поверхностных гидрозолошлакохранилищах (ГЗХ) в виде пульпы в золоотвалах (мокрое золоудаление), или в сухих хранилищах – при сухом золоудалении. Для обустройства ГЗХ в мировой практике задействуются огромные участки земель, овраги, отработанные шахтные и карьерные выработки.

Многолетнее применение на ТЭС мокрого золоудаления в РФ привело к накоплению около 1,5 млрд тонн золы, занимающих около 20 тыс. км². На не менее 70 % крупных ТЭС мощности действующих золоотвалов практически исчерпаны, и срок их эксплуатации при все возрастающих эксплуатационных затратах на их содержание, последующую консервацию и/или рекультивацию ограничен. Таким образом, переход на применение систем сухого золошлакоудаления становится всё более актуальным. В России такая система пока эксплуатируется лишь на нескольких ТЭС.

Загрязнение атмосферного воздуха, трансграничные переносы загрязнителя, почв, водных объектов, задействование под размещение породных и зольных отвалов земельных территорий, шламоотстойников и накопителей, в совокупности с экономическими и технологическими причинами способствовало возникновению в конце XX столетия тенденции в направлении активной замены топлива котельных и ТЭЦ с угольного на газовое и мазут.

Технологические проблемы

При развитии технологических процессов, в том числе, выплавки металлов и производства товаров потребления стали использоваться природные угли, а позже и кокс, с рядом технологических свойств: удельной теплоты сгорания; выхода летучих веществ (дымности); влажности; зольности; спекаемости и пластометрических показателей; элементного состава; содержания битумов, фосфора и серы; и др. Это способствовало разработке таких методов подготовки и переработки углей, как отсадка, флотация, магнитная сепарация, коксование, полукоксование, газификации каменных и бурых углей для получения промпродуктов и продуктов различного направления использования.

Экономические проблемы

Последние диктуются, прежде всего, стоимостью процесса переработки углей с учетом возрастающих требований к параметрам технологических свойств, экологической и промышленной безопасности, необходимостью рационального использования природных ресурсов. Влияние всего комплекса причин на использование угольного топлива в настоящее время сдерживает увеличение объемов его использования, хотя как источник энергии и сырья для производства химических продуктов природный уголь разных стадий метаморфизма является наиболее распространенным (ресурсы и разведанные запасы угля в Природе оцениваются в десятки триллионов тонн), и его крупномасштабное использование экономически целесообразно. Но доля углей высоких стадий метаморфизма с высокой удельной теплотой сгорания, низким содержанием золы, влаги и серы в общей массе добываемых углей не так велика, как требуется для энергетических нужд человечества. Основная их часть относится к низкой стадии метаморфизма (бурые, длиннопламенные, газовые). Их эффективное использования возможно лишь при улучшении технологических свойств, показателей при сжигании и газификации.

Одним из решений этой проблемы начиная со второй четверти XX столетия рассматривалось создание технологий переработки природных углей и сланцев в жидкое и газообразное топливо. Начиная с 30-50-х годов прошлого столетия, в ряде технически развитых стран выполняется значительный комплекс исследований в области производства жидких моторных и газотурбинных топлив при переработке твердых горючих ископаемых. Начиная с 80-х в ряде стран (Германии, Японии, ЮАР, Австралии, Китае, США,

Испании, Индонезии, Колумбии, и др.) заметно активизируются исследования в данной области [6-12], и осуществляется получение моторных топлив и химических продуктов методами гидрогенизации и газификации угля и горючих сланцев в значительных для опытного производства объемах. Однако, дальнейшее развитие промышленной переработки твердых горючих ископаемых в жидкое топливо сдерживается появлением на мировом рынке относительно дешевых нефти и природного газа. И вряд ли стоит ожидать прорывных технико-технологических и организационных решений в этом направлении в ближайшие десятилетия. В этой связи, данный вид переработки твердого топлива в настоящей статье не рассматривается.

При современном уровне технического развития производств представляется более перспективным обеспечение технологических свойств угольного топлива за счет снижения содержания зольности, серы [21], выбросов оксидов серы и азота. Но традиционные способы обогащения не позволяют существенно снизить уровень вредных примесей в продуктах переработки и выхлопных газах. В лучшем случае, при значительном увеличении материальных затрат, этими методами можно обеспечить снижение зольности угольного концентрата до 0,2-0,7 %. Угли, с таким уровнем минеральных компонентов не могут быть использованы при "прямом вводе" угля в газовую турбину при внутрицикловой газификации угля для генерации электроэнергии (бинарный цикл). Это обусловило потребность в более глубокой переработке угля [13, 14].

Большой интерес с учетом такого целевого назначения вызывает способ вымывания химически активными водными растворами кислот и щелочей минеральной составляющей углей и серы, но и они пока неэффективны и экономически невыгодны, так как уровень зольности угля остается в недопустимо высоких пределах – 0,1-0,7 % [7, 15], что также неприемлемо для прямого ввода в газовую турбину.

Широкого применения в качестве топлива для газовых турбин не нашли и методы, основанные на конверсии углей в жидкие и газообразные продукты: каталитическая гидрогенизация, газификация и синтез Фишера-Тропша, экстракция, термолиз в растворителях, суперкритическое растворение, каталитический гидрокрекинг, и др. Они требуют высокого уровня развития техники и технологий производства, применения сложной специальной аппаратуры, высоких давлений и температур, дорогостоящих катализаторов.

К более перспективным относится метод переработки низкосортных углей низшего ранга (низшей степени метаморфизма), разработанный в начале 1990-х в компанией Kobe Steel, Ltd. (Одна из ведущих японских компаний черной металлургии). Суть которого в разработке модернизированной технологии переработки

бурого угля (УВС) на основе экономичного способа обезвоживания по принципу "tempruga" (японская еда во фритюре), позволяющем эффективно удалять содержащуюся в низкосортном угле воду в нагретом легком масле. Особенностью этого технологического процесса является состав и последовательность (Рис. 2) операций [15].

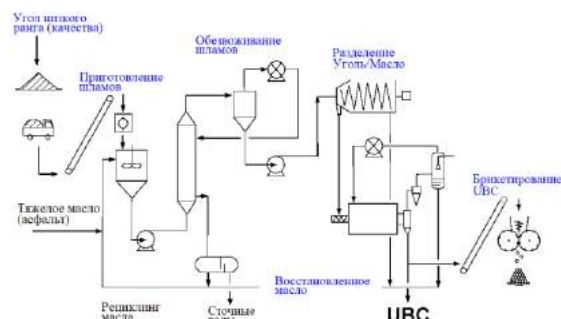


Рис. 2. Технологическая схема производственного процесса UBC [15]

1. Дезинтеграция угля. Угольная масса, предварительно дробленая до класса крупности - 50 мм измельчается в мельнице до размера частиц - 5 мм.

2. Шламовое обезвоживание. Этот этап включает смешивание измельченного угля с светлым маслом, содержащим тяжелое масло "асфальт" в баке подготовки пастообразной массы для того, чтобы подготовить угольные шламы. Полученная пастообразная масса помещается в резервуар для обезвоживания шлама при температуре 130-166 °C и давлении 400-450 кПа.

Обезвоживание массы происходит под воздействием жесткого "технологического пара", состоящего из паров воды и легкого масла. Технологический пар совместно с извлеченной из шламовой массы влагой, подается в систему циркуляции для повторного использования как источник тепла для обезвоживания угольной массы.

3. Разделение системы твердой и жидкой фазы. На этом этапе обезвоженный угольный шлам перемещается в центробежный сепаратор непрерывного действия (вертикальный) для отделения светлого масла от угольного шлама. Отделенное светлое масло возвращается в масляный бак для рециркуляции и повторного использования для обезвоживания.

4. Отделение "нефти" (масел). Обезвоженный после выделения легкого масла на центробежном сепараторе корж шламового чека подается в сушильный агрегат для отделения остаточных масел посредством косвенного теплообмена с высокотемпературным паром для восстановления UBC в форме порошка (порошок UBC). Тяжелые компоненты масла поглощаются микропорами, адсорбируясь на стенках скелета пор. Этим объясняется осветление остаточного масла (Рис. 3).



Рис. 3. Эффект освещения остаточных масел в процессе восстановления UBC в форме порошка [15]

Пары масла, содержащиеся в циркулирующем газе (в основном, в азоте) проходят через сушилку, конденсируются в стояк водяного охлаждения и отделяются от азота. Отделенные легкие масла подаются в циркуляционный масляный бак и повторно используются как светлое масло для подготовки шламовой массы.

5. Полученная после осушки масса UBC подается в вальцевой брикетный пресс для брикетирования – формования топливных брикетов (Рис. 4).

Поиск принципиально новых технических решений для получения беззольного угля привел в конце XX столетия к разработке "принципиально отличных" (новых) способов термической обработки органическими растворителями для экстрагирования органической составляющей угля [14-25].



Рис. 4. Брикеты UBC [15]

Первые работы в этом направлении проводились в Японии. Полученный беззольный уголь был назван гиперуглем (ГУ). Оптимальными растворителями признаны ароматические композиции на основе производных нафталина, такие как метил- и диметилнафталины, и два промышленных растворителя: легкое циркуляционное масло и сырое метилнафталиновое масло (СМНМ) – продукты коксования углей. Последнее, с выходом экстракции в пределах 60-80 % от органической массы угля (ОМУ) признано наиболее эффективным [14].

Технологии обрабатывались на лабораторной (опытной) установке мощностью 0,1 т угля/день в Takasago Works, KOBЕ Steel, Hyogo (Япония). При этом установлено, для получения ГУ наиболее пригодны угли низкой и средней стадий метаморфизма (Б, Д, Г, Ж).

Термическое растворение с применением органических растворителей и экстракция исходного угля проводится при $t \leq 380^\circ\text{C}$ и $p = 1$ МПа. Выход ГУ в процессе экстракции ≤ 50 мас. % от горючей массы угля с высоким энергетическим КПД, обеспечивает экономически выгодное применение ГУ в качестве топлива для газовых

турбин [13] с использованием внутрицикловой газификации угля (Integrated Coal Gasification Combined Cycle – IGCC) [14, 16].

Концептуальная схема процесса получения гиперугля представлена на рисунке 5 [16].

1. Применяемая технология в процессе удаления растворителя:

- экстракция угля – молекулярные ассоциации термально распускаются и растворяются в растворителе;

- нерастворенные частицы исходного угля (минеральные и нерастворимые органические вещества) накапливаются на дне экстрактора.

2. Осаждение:

- твердые вещества оседают под действием силы тяжести в растворе;

- в процессе гравитационного отстаивания происходит разделение фаз с осаждением растворенных частиц угля и осветлением растворителя;

- из отстойника отдельно удаляются/выводятся осветленный растворитель и осажденный экстрагируемый уголь.

3. После отделения растворителя

Гиперуголь и нерастворимые частицы угля после выпаривания растворителя накапливаются для дальнейшей переработки.

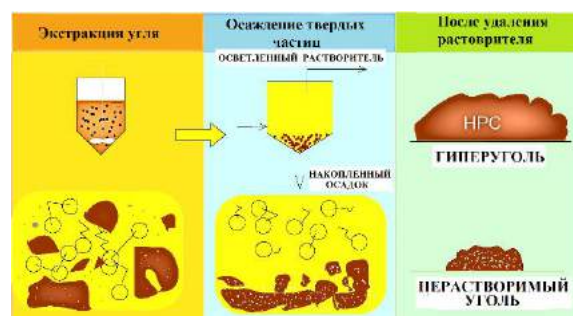


Рис. 5. Концептуальная схема получения ГУ [16]

Особенности технологии получения гиперугля характеризуются следующими показателями [16].

1. Способ получения представляет собой процесс переработки не только с получением обеззоленного угля, но и с модернизированием его структуры на молекулярном уровне.

2. Качественный состав ГУ:

- содержания золы в интервале $100 \div 1000$ ppm;
- сера в сростках и тяжелые металлы практически удалены;

- не удаляется лишь органическая сера.

3. Удельная теплота сгорания. Полученный ГУ имеет удельную теплоту сгорания в интервале $8000-8500$ Ккал/кг (высшую), исходный энергетический уголь (газовый, длиннопламенный) – 6500 Ккал/кг).

4. Обладает высокой термальной пластичностью НРС (даже если у исходных углей не отмечалась) в широком диапазоне температур с возможностью применения в качестве топлива для газовых турбин с использованием внутрицикловой газификации угля.

Технологическая схема процесса получения гиперугля (рис. 6) [16].

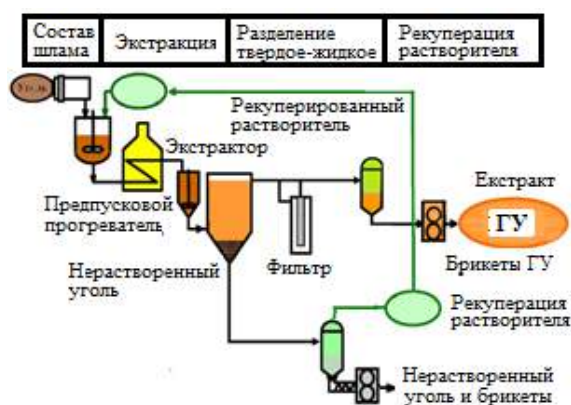


Рис. 6. Технологическая схема процесса получения гиперугля [16]

В технологическом процессе получения гиперугля применяются простые и нежесткие условия:

- двухцикловая рециркуляция растворителя на основе производных ароматических углеводородов;

- нет необходимости использования водорода;
- необходимые термодинамические параметры: $P < 2$ МПа, $t < 400$ °С.

В России и в странах Содружества работы по получению гиперугля в настоящее время, судя по публикациям, проводятся на стадии аналитических и лабораторных исследований. Серия лабораторных исследований в данном направлении была выполнена в 2016 году творческой группой специалистов института Геологии Коми НЦ УрО РАН г. Сыктывкар, и ИВЦ РАН г. Санкт-Петербург [25-27]. При этом изучены: возможность получения гиперугля (обеззолненных углей) из сырья шахты "Интинская" Интинского месторождения Печорского угольного бассейна; условия образования исходных углей методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии и определен состав биомаркеров насыщенной фракции битумоида [25-27].

В результате экстрагирования концентратов исходного угля N-метилпирролидоном авторами (Д.А. Бушнев, Н.С. Бурдельная, Д.В. Кузьмин, М.В. Мокеев, И.Н. Бурцев) были получены выходы обеззолненного экстракта (гиперугля) массой около 30 % от исходного продукта (Рис. 7).



Рис. 7. Образец обеззолненных углей (гиперуглей) из сырья шахты Интинская" [25]

На основе результатов исследований, в том числе, анализа CP/MAS спектров, результатов редактирования спектров установленное [25]:

- полученные гиперугли по структуре вещества (органического) мало отличны от исходных углей;

- угли Интинского месторождения марки ДГ являются перспективным сырьем для получения гиперугля, так как в своем исходном виде характеризуются высокой зольностью и, вследствие этого, невысокими потребительскими свойствами;

- экстракция углей N-метилпирролидоном позволяет получить выходы гиперугля до 30 %.

При проведении последующих работ методом хромато-масс-спектрометрии был исследован состав биомаркеров битумоида углей Воркутского Воргашорского угольных месторождений (шахт Воргашорская, Комсомольская, Октябрьская) и установлено, что угли Воркутского и Воргашорского угольных месторождений неоднородны по составу ароматической фракции битумоида. Для трех образцов угля экстракцией N-метилпирролидоном получен гиперуголь, который был исследован методом спектроскопии ядерно-магнитного резонанса ^{13}C ЯМР в твердом теле [26,27].

Выводы

Таким образом, эффективное снижение зольности низкосортных углей обеспечивается одним из перспективных решений в области получения и использования беззольного угля (гиперугля). При этом достигаются следующие результаты.

1. Повышается удельная теплота сгорания и термопластичность получаемого продукта.

4. Достигается высокий энергетический КПД, обеспечивающий экономически выгодное применение гиперугля в качестве топлива для газовых турбин (ТЭС, авиационные [28], морские) с использованием внутрициклового газификации угля.

2. Дополнительно расширяется область использования низкосортного угля за счет: производства топлива с повышенной удельной теплотой сгорания для традиционного сжигания, газификации с целью получения синтез-газа и водорода, добавки к ископаемому углю для производства кокса, и т. д. [14, 29].

3. Обеспечивается высокий экологический эффект за счет сокращения выбросов CO_2 (на 13-40 %), NO_x и SO_x .

Особенностью процесса является то, что:

- для получения ГУ наиболее пригодны угли низкой и средней стадии метаморфизма (Б, Д, Г, Ж), что существенно расширяет область применения углей низкой степени метаморфизма, и тем самым заметно увеличиваются топливно-энергетические ресурсы, в том числе, за счет запасов углей, характеризующихся высоким уровнем содержания золы и серы, и вследствие этого, невысокими потребительскими свойствами;

- ключевой этап технологического процесса – термическое растворение с применением органических растворителей и экстракция исходного угля проводится при вполне приемлемых технологических условиях — температуре не более 380 °С и давлении в 1 МПа.

Литература

1. Теофраст. О камнях. Пер. с англ. - М.: ИД МСП, - 2004, 256 с.
2. Бакс, К. Богатства земных недр: Пер. с нем. / Общ. Ред. И предисл. Г.И. Немкова. М.: Прогресс, - 1986, 384 с.
3. Харитоновский, А.А. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решений // А.А. Харитоновский, А.Н. Калушев, В.Н. Васева, Е.И. Симанова. НТЖ Вестник № 2, ООО «МНИИЭКО ТЭК». Пермь, 2018 г. – С. 70-81.
4. Отходы ТЭК. Общая характеристика / Донские технологии. https://don-tech.ru/info/poleznaya_info/otxody-tek.html/Электронный ресурс (Дата обращения 26.05.2019).
5. Сжигание топлива на крупных установка в целях производства энергии / ИТС по НДТ 38-2017, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. 2017 г. – 322 с.
6. Boudou J. P., Bimer J., Salbut P. D., Cagniant D., Gruber R. Effects of methanol – NaOH treatment of coal on tar and gas formation during pyrolysis: Fuel. 1995. V. 74, № 6. P. 846–852.
7. Горлов Е. Г. Термическое растворение твердых горючих ископаемых // Химия тверд. топлива. 2007. № 5. С.41–51.
8. Morimoto M., Nakagawa H., Miura K. Hydrothermal extraction and hydrothermal gasification process for brown coal conversion: Fuel. 2008. V. 87, № 4 – 5. P. 546–551.
9. Малолетнев, А.С. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей / А.С. Малолетнев, М.Я. Шпирт // Журн. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. 2008. Т. 52. № 6. С. 44 – 52.
10. Makgato M. H., Moitsheki L. J., Shoko L., Kgobane B. L., Morgan D. L., Focke W. W. Alkali-assisted coal extraction with polar aprotic solvents : Fuel Process. Technol. 2009. V. 90, № 4. P. 591–598.
11. Ashida R., Morimoto M., Makino Y. Fractionation of brown coal by sequential high temperature solvent extraction : Fuel. 2009. Vol. 88, № 8. P. 1485–1490.
12. Шендрик, Т.Г. Конверсия химически модифицированных углей и углеродсодержащих отходов в жидкие продукты [Текст] / Т. Г. Шендрик, В. А. Кучеренко, В. В. Симонова // Химия: журнал Сибирского федерального университета. - 2013. - № 6. - С. 251-265.
13. Загруднинов, Р.Ш. Внедрение газотурбинных технологий с внутрицикловой газификацией угля в технологические схемы ТЭС // Р.Ш. Загруднинов, Д.Г. Малыхин, П.К. Сеначин, С.Н. Шитова. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, №1(2), 2011. – С. 440-445.
14. Осипов, А.М., Попов А.Ф., Шендрик Т.Г., Гришук С.В. Оптимальные направления использования беззольного угля // А.М. Осипов, А.Ф. Попов, Т.Г. Шендрик, С.В. Гришук Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко НАН Украины, Донецк, Украина, Сборник научных статей Современная наука. – № 1 (6). 2011. – С. 42-46.
15. Shigeri KINOSHITA, Dr. Seiichi YAMAMOTO, Tetsuya DEGUCHI, Takuo SHIGEHISA DEMONSTRATION OF UPGRADED BROWN COAL (UBC) PROCESS BY 600 TONNES/DAY PLANT : Kobelco Technology Review No. 29 Dec. 2010. – P. 93-98.
16. Masaaki Tamura New utilization technologies for low rank coals. Paper presented at 1st International Symposium on The Sustainable Use of Low Rank Coals. "Innovation & technologies for a sustainable future". A Victorian Government initiative. April 26-30. 2010. Melbourne. Australia.
17. Global Activities for Clean Coal Technology: Yozaburo Mabuchi Senior Executive Vice President Mitsubishi Hitachi Power Systems, LTD. September 9, 2015. – 44 p.
18. Yasuo Araio, Takashi Kiga Japan's Approach to Clean Coal Technologies: Japan Coal Energy Center. International G8 Expert Workshop on Clean Coal Technologies 2007, Leipzig March 6-7, 2007. 23 p.
19. Moshfiqur Rahman, Arunkumar Samanta, Rajender Gupta Production and characterization of ash-free coal from low-rank. Canadian coal by solvent extraction: Fuel Processing Technology 115 (2013). 2013. – P. 88-98.
20. Clean Coal Technologies in Japan: Technology Innovation in the Coal Industry. JCOAL and NEDO. 2007, 114p.
21. Takanohashi, T.; Shishido, T.; Kawashima, H.; Saito, I., Characterization of HyperCoals from coals of various ranks. Fuel 2008, P. 87, P. 592-598.
22. Renganathan, K.; Zondlo, J. W.; Mintz, E. A.; Kneisl, P.; Stiller, A. H., Preparation of an ultra-low ash coal extract under mild conditions. Fuel Processing Technology 1988, P. 18, P. 273-278.
23. Aaron Cottrell, Peter Scaife, Louis Wibberley System Assessment of Hypercoal for Electricity supply in Japan: Technology Assessment report 65: QCAT Technology Transfer Centre, Technology Court Pullenvale Qld 4069 AUSTRALIA. 2010. 37 p.
24. Noriyuki Okuyama, Nobuyuki Komatsu, Takuo Shigehisa, Takao Kaneko, Shigeru Tsuruya STUDY ON THE HYPER-COAL PROCESS FOR BROWN COAL UPGRADING. Taylor & Francis LLC. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 25: 2005. P. 295–311.
25. Бушнев, Д.А. Биомаркеры углей интинского месторождения, выделение и анализ химической структуры гиперуглей // Д.А. Бушнев, Н.С. Бурдельная, Д.В. Кузьмин, М.В. Мокеев, И.Н. Бурцев. Вестник института Геологии Коми НЦ УрО РАН, № 11. Сыктывкар. 2016. – С. 23-30.
26. Бушнев, Д.А. Уголь Воркутского района: состав углеводородов биомаркеров, возможности получения обеззоленного концентрата // Д.А. Бушнев, Н.С. Бурдельная, С.В. Рябинкин Д.В. Кузьмин, М.В. Мокеев. Вестник института Геологии Коми НЦ УрО РАН, № 9. Сыктывкар. 2017. – С. 3-11.
27. Бушнев, Д.А. Химическая структура углей Воркутинского района и выделенных из них гиперуглей по данным аналитического пиролиза // Д.А. Бушнев, Н.С. Бурдельная, Д.В. Кузьмин, О.В. Валяева, А.А. Деревесникова, В.А. Белый. Вестник института Геологии Коми НЦ УрО РАН, № 8. Сыктывкар. 2018. – С. 8-12.
28. Федоров Е.П., Варламова Н.И., Яновский Л.С., Попов И.М. Перспективы развития топлив для авиатехники с газотурбинными двигателями // НТЖ "Двигатель", № 6(102) 2015. – С. 8-11.

29. A. Uchida, Y. Yamazaki, S. Matsuo, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, M. Hamaguchi Effect of HPC (Hyper-coal) on Strength of Ferro-coke during Caking Temperature, *ISIJ International*, Vol. 57 (2017), No. 9, pp. 1524–1530.

References

1. Teofrast. O kamnyakh. *Per. s angl. M.: ID MSP*, 2004, 256 s.
2. Baks, K. Bogatstva zemnykh nedr: *Per. s nem. Obshch. Red. I predisl. G.I. Nemkova. M.: Progress*, 1986, 384s.
3. Kharitonovskiy, A.A. Ekologiya ugol'noy promyshlennosti: sostoyanie, problemy, puti resheniy, A.A. Kharitonovskiy, A.N. Kalushev, V.N. Vaseva, E.I. Simanova. *NTZh Vestnik № 2, ООО «МНИИЕКО ТЕК». Perm'*, 2018 g. S. 70-81.
4. Otkhody TEK. Obshchaya kharakteristika Donskie tekhnologii, https://don-tech.ru/info/poleznaya_info/otkhody-tek.html (Data obrashcheniya 26.05.2019).
5. Szhiganie topliva na krupnykh ustanovka v tselyakh proizvodstva energii, ITS po NDT 38-2017, *Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. M.* 2017 g.322 s.
6. Boudou J. P., Bimer J., Salbut P. D., Cagniant D., Gruber R. *Effects of methanol – NaOH treatment of coal on tar and gas formation during pyrolysis : Fuel. 1995. V. 74, № 6. P. 846–852.*
7. Gorlov E. G. *Termicheskoe rastvorenie tverdykh goryuchikh iskopaemykh, Khimiya tverd. topliva. 2007. № 5. S.41–51.*
8. Morimoto M., Nakagawa H., Miura K. Hydrothermal extraction and hydrothermal gasification process for brown coal conversion : *Fuel. 2008. V. 87, № 4 – 5. P. 546–551.*
9. Maloletnev, A.S. *Sovremennoe sostoyanie tekhnologiy polucheniya zhidkogo topliva iz ugley*, A.S. Maloletnev, M.Ya. Shpirt, *Zhurn. Ros. khim. o-va im. D.I. Mendeleeva. 2008. T. 52. № 6. S. 44 – 52.*
10. Makgato M. H., Moitsheki L. J., Shoko L., Kgobane B. L., Morgan D. L., Focke W. W. Alkali-assisted coal extraction with polar aprotic solvents : *Fuel Process. Technol. 2009. V. 90, № 4. P. 591–598.*
11. Ashida R., Morimoto M., Makino Y. Fractionation of brown coal by sequential high temperature solvent extraction : *Fuel. 2009. Vol. 88, № 8. P. 1485–1490.*
12. Shendrik, T.G. *Konversiya khimicheskikh modifitsirovannykh ugley i uglerodsoderzhashchikh otkhodov v zhidkie produkty [Tekst]*, T. G. Shendrik, V. A. Kucherenko, V. V. Simonova, *Khimiya: zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. 2013. № 6. S. 251-265.*
13. Zagrutdinov, R.Sh. *Vnedrenie gazoturbinnnykh tekhnologiy s vnutritsiklovoy gazifikatsiey uglya v tekhnologicheskie skhemy TES*, R.Sh. Zagrutdinov, D.G. Malykhin, P.K. Senachin, S.N. Shitova. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, t. 13, №1(2), 2011. S. 440-445.*
14. Osipov, A.M., Popov A.F., Shendrik T.G., Grishchuk S.V. *Optimal'nye napravleniya ispol'zovaniya bezzol'nogo uglya*, A.M. Osipov, A.F. Popov, T.G. Shendrik, S.V. Grishchuk *Institut fiziko-organicheskoy khimii i uglekhemii im. L.M. Litvinenko NAN Ukrainy, Donetsk, Ukraina, Sbornik nauchnykh statey Sovremennaya nauka. № 1 (6). 2011. S. 42-46.*
15. Shigeri KINOSHITA, Dr. Seiichi YAMAMOTO, Tetsuya DEGUCHI, Takuo SHIGEHISA *DEMONSTRATION OF UPGRADED BROWN COAL (UBC) PROCESS BY 600 TONNES/DAY PLANT : Kobelco Technology Review No. 29 Dec. 2010. P. 93-98.*
16. Masaaki Tamura *New utilization technologies for low rank coals. Paper presented at 1st International Symposium on The Sustainable Use of Low Rank Coals. "Innovation & technologies for a sustainable future". A Victorian Government initiative. April 26-30. 2010. Melbourne. Australia.*
17. Global Activities for Clean Coal Technology: Yozaburo Mabuchi Senior Executive Vice President Mitsubishi Hitachi Power Systems, LTD. *September 9, 2015. 44 p.*
18. Yasuo Araio, Takashi Kiga *Japan's Approach to Clean Coal Technologies: Japan Coal Energy Center. International G8 Expert Workshop on Clean Coal Technologies 2007, Leipzig March 6-7, 2007. 23 p.*
19. Moshfiquir Rahman, Arunkumar Samanta, Rajender Gupta *Production and characterization of ash-free coal from low-rank. Canadian coal by solvent extraction: Fuel Processing Technology 115 (2013). 2013. P. 88-98.*
20. *Clean Coal Technologies in Japan: Technology Innovation in the Coal Industry. JCOAL and NEDO. 2007, 114p.*
21. Takanohashi, T.; Shishido, T.; Kawashima, H.; Saito, I., *Characterization of HyperCoals from coals of various ranks. Fuel 2008, P. 87, P. 592-598.*
22. Renganathan, K.; Zondlo, J. W.; Mintz, E. A.; Kneisl, P.; Stiller, A. H., *Preparation of an ultra-low ash coal extract under mild conditions. Fuel Processing Technology 1988, P. 18, P. 273-278.*
23. Aaron Cottrell, Peter Scaife. *Louis Wibberley System Assessment of Hypercoal for Electricity supply in Japan: Technology Assessment report 65: QCAT Technology Transfer Centre, Technology Court Pullenvale Qld 4069 AUSTRALIA. 2010. 37 p.*
24. Noriyuki Okuyama, Nobuyuki Komatsu, Takuo Shigehisa, Takao Kaneko, Shigeru Tsuruya *STUDY ON THE HYPER-COAL PROCESS FOR BROWN COAL UPGRADING. Taylor & Francis LLC. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 25: 2005. P. 295–311.*
25. Bushnev, D.A. *Biomarkery ugley intinskogo mestorozhdeniya, vydelenie i analiz khimicheskoy struktury giperugley*, D.A. Bushnev, N.S. Burdel'naya, D.V. Kuz'min, M.V. Mokeev, I.N. Burtsev. *Vestnik instituta Geologii Komi NTs URO RAN, № 11. Syktyvkar. 2016. S. 23-30.*
26. Bushnev, D.A. *Ugol' Vorkutskogo rayona: sostav uglevodorodov biomarkerov, vozmozhnosti polucheniya obezvolennogo kontsentrata*, D.A. Bushnev, N.S. Burdel'naya, S.V. Ryabinkin D.V. Kuz'min, M.V. Mokeev. *Vestnik instituta Geologii Komi NTs URO RAN, № 9. Syktyvkar. 2017. S. 3-11.*
27. Bushnev, D.A. *Khimicheskaya struktura ugley Vutinskogo rayona i vydelenykh iz nikh giperugley po dannym analiticheskogo piroliza*, D.A. Bushnev, N.S. Burdel'naya, D.V. Kuz'min, O.V. Valyaeva, A.A. Derevesnikova, V.A. Belyy. *Vestnik instituta Geologii Komi NTs URO RAN, № 8. Syktyvkar. 2018.S. 8-12.*

28. Fedorov, E.P. *Perspektivy razvitiya topliv dlya aviatekhniki s gazoturbinnymi dvigatelyami*, E.P. Fedorov, N.I. Varlamova, L.S. Yanovskiy, I.M. Popov. *NTZh "Dvigatel"*, № 6 (102) 2015.S. 8-11.
29. A. Uchida, Y. Yamazaki, S. Matsuo, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, M. Hamaguchi Effect of HPC (Hyper-coal) on Strength of Ferro-coke during Caking Temperature, *ISIJ International*, Vol. 57 (2017), No. 9, pp. 1524–1530.

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

УДК 541.13

**О ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЁТ ВЫДЕЛЕНИЯ ДЖОУЛЕВА ТЕПЛА В
ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРИ РАБОТЕ
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ****Борис Пинкусович Шарфарец**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт аналитического
приборостроения Российской академии наук» (ИАП РАН)
190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26
e-mail: sharb@mail.ru

Фёдор Фёдорович Легуша

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: legusha@smtu.ru

Аннотация

На примере заполненного жидкостью кругового капилляра, к которому приложено постоянное тангенциальное электрическое поле, изучается диссипация энергии, вызванная выделением Джоулева тепла при протекании тока. При этом для соблюдения баланса энергии учитывается явление перенапряжения на электродах. Изучены вопросы баланса энергии в стационарном электроосмотическом процессе в указанном капилляре. Получено выражение для суммарной мощности потерь в объеме капилляра, вызванных вязким трением и выделением Джоулева тепла. Приведено его упрощенное асимптотическое выражение, зависящее от безразмерного параметра: отношения радиуса капилляра к длине Дебая. Численно показано, что асимптотика начинает действовать при значении параметра, большем четырех. Для реальных капилляров это справедливо, так как длина Дебая в двойном электрическом слое составляет единицы нанометров. Полученная асимптотика сводит выражения для потерь, состоящие из сложных функций к простым алгебраическим выражениям, куда входят все параметры физического процесса. Анализ потерь показывает, что суммарная мощность потерь пропорциональна длине капилляра, квадрату амплитуды вектора электрической напряженности, отношению радиуса капилляра к длине Дебая. Кроме того, величина суммарной мощности потерь линейно зависит от динамической вязкости рабочей жидкости, электрокинетического потенциала двойного электрического слоя на границе раздела фаз в капилляре, подвижности ионов и их концентрации в жидкости, заряда ионов, а также диэлектрической проницаемости жидкости. Полученные выражения очень компактны, что позволяют легко анализировать влияние каждого параметра задачи на происходящие электрокинетические процессы и, следовательно, оптимизировать конструкцию электроакустического преобразователя.

Приведенные выражения позволяют оптимизировать конструкцию электроакустического преобразователя нового типа, основанного на использовании электрокинетических явлений.

Ключевые слова Электрокинетические явления, электроосмос, диссипативная функция, вязкое трение, Джоулево тепло, баланс энергии, перенапряжение, электроакустический преобразователь.

**ON ENERGY DISSIPATION DUE TO THE RELEASE OF JOULE HEAT IN AN
ELECTROOSMOTIC PROCESS DURING THE OPERATION OF AN
ELECTROACOUSTIC CONVERTER****Boris P. Sharfarets**

The Leading Researcher, Dr.Sci. Phys.and Math.,
Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,
IAI RAS, Rizhsky pr., 26, St. Petersburg, 190103, Russia,
e-mail: bshar@yandex.ru

Fedor F. Legusha

the professor, Dr. Sci.Phys.-Math., the professor of department of physics,
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya Str., 24, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: legusha@smtu.ru

Abstract

Using the example of a circular capillary filled with liquid, to which a constant tangential electric field is applied, the dissipation of energy caused by the release of Joule heat during the flow of current is

studied. At the same time, to observe the energy balance, the phenomenon of overvoltage on the electrodes is taken into account. The problems of energy balance in a stationary electroosmotic process in the specified capillary were studied. An expression for the total power loss in the capillary volume caused by viscous friction and the release of Joule heat is obtained. Its simplified asymptotic expression is given, depending on the dimensionless parameter: the ratio of the capillary radius to the Debye length. It is shown numerically that the asymptotic behavior starts when the value of the parameter is greater than four. For real capillaries, this is true, since the Debye length in the electric double layer is a few nanometers. The resulting asymptotics reduces the expressions for losses, consisting of complex functions to simple algebraic expressions, which include all the parameters of the physical process. Loss analysis shows that the total power of the losses is proportional to the length of the capillary, the square of the amplitude of the vector of electrical tension, the ratio of the radius of the capillary to the length of Debye. In addition, the magnitude of the total power loss linearly depends on the dynamic viscosity of the working fluid, the electrokinetic potential of an electrical double layer at the interface between the phases in the capillary, the mobility of ions and their concentration in the fluid, the charge of ions, and the dielectric constant of the fluid. The obtained expressions are very compact, which makes it easy to analyze the influence of each parameter of the problem on the electrokinetic processes that occur and, therefore, to optimize the design of the electro-acoustic transducer.

The above expressions allow us to optimize the design of an electroacoustic converter of a new type, based on the use of electrokinetic phenomena.

Key words: Electrokinetic phenomena, electroosmosis, dissipative function, viscous friction, Joule heat, energy balance, overvoltage, electroacoustic transducer.

Введение

В работах [1-6] начат цикл статей, описывающих физические модели для реализации излучателя нового вида, основанного на использовании такого процесса электрокинетических явлений, как электроосмос. В этом цикле были описаны физические процессы, проясняющие принцип действия этого излучателя. В работе [7] начато рассмотрение диссипативных процессов в указанном излучателе на примере вязкого трения. В настоящей работе рассматривается диссипация за счет выделения Джоулева тепла, а также рассматривается общий баланс энергии с учетом всех рассмотренных диссипативных процессов: вязкого трения и выделения Джоулева тепла. Учет диссипации энергии в преобразователе является важным для оптимизации его конструкции.

1. Постановка проблемы

В настоящей работе рассматривается такой диссипативный процесс, как выделение Джоулева тепла при протекании тока в электролите при реализации электроакустического преобразования, рассмотренного в [1-6]. Учитывается также полный баланс энергии с учетом вязкого трения и выделения Джоулева тепла в стационарном электроосмотическом процессе применительно к наполненному жидкостью цилиндрическому капилляру. При этом ставится задача получения выражений для диссипативных членов, зависящих от всех параметров задачи.

2. Диссипация, вызванная протеканием электрического тока в жидкости

Наряду с диссипацией энергии по причине вязкого трения в электроосмотических процессах происходит рассеяние энергии вследствие наличия в жидкости электрического тока, приводящего к потерям энергии вследствие нагрева жидкости.

Прежде чем перейти собственно к потерям, вызванным выделением Джоулева тепла, рассмотрим кратко такое явление, как *электрохимическое перенапряжение*.

Перенапряжением в электрохимии называется отклонение значения электродного потенциала от равновесного при пропускании электрического тока. Величина перенапряжения зависит от плотности тока и обычно тем больше, чем больше плотность тока. При одном и том же значении плотности тока перенапряжение зависит от природы электрода и типа протекающей на его поверхности реакции, состава раствора, температуры, и других факторов и может колебаться от долей мВ, до нескольких вольт [8, с. 66].

Так в [9, с. 30] приведено соотношение, связывающее разность потенциалов $\Delta\Phi_e$, приложенную к электродам с разностью потенциалов $\Delta\Phi_{el}$, приводящей к появлению электрического тока в электролите (т.е. приложенную непосредственно на границах электролита) и перенапряжением η

$$\Delta\Phi_e = \Delta\Phi_{el} + \eta.$$

Количество выделяемого в единицу времени в единице объема электролита джоулева тепла W , называемого *удельной мощностью тока* (УМТ) (или *плотностью тепловой мощности тока*), определяется законом Джоуля-Ленца, который в линейной изотропной среде записывается так [10, с. 604] (носители заряда в каждой точке движутся вдоль направления вектора E_{el} . Поэтому вектора E_{el} , и j в изотропных средах коллинеарны)

$$W = j \cdot E_{el}. \quad (1)$$

Здесь $E_{el} = \frac{\Delta\Phi_{el}}{l}$ - вектор напряженности электрического поля, приложенного к электролиту, толщиной l ; j - вектор плотности тока.

Найдем мощность потерь вследствие выделения Джоулева тепла W в рассмотренном выше капилляре при электроосмотическом процессе.

Выражения для искомых плотности тока в жидкости и удельной проводимости даны,

например, в следующих работах по электрохимии [9, 11, 12]. Здесь следуем [12].

Вначале определяется суммарная скорость движения ионов. Выражение для вектора суммарной скорости движения ионов i -го вида $\mathbf{U}_i$ под воздействием электрического поля, диффузии и движения самой жидкости имеет следующий вид [12, с. 24]

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{v}_{ei} - D_i \frac{\nabla c_i}{c_i} + \mathbf{v} = u_i \mathbf{E}_{el} - \mathbf{v}_{D_i} + \mathbf{v}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{v}_{ei} = u_i \mathbf{E}_{el}$ - миграционная скорость иона под воздействием электрического поля $\mathbf{E}_{el}$; u_i - подвижность иона (знак подвижности совпадает со

$$\mathbf{j}_i = \rho_{ei} u_i \mathbf{E}_{el} - e_i D_i \nabla c_i + \rho_{ei} \mathbf{v} = \sigma_i \mathbf{E}_{el} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}. \quad (3)$$

Для совокупной плотности тока с учетом ионов всех типов суммирование последних уравнений дает

$$\mathbf{j} = \sum_{i=1}^N \mathbf{j}_i = \sum_{i=1}^N (\sigma_i \mathbf{E}_{el} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}) = \sigma \mathbf{E}_{el} - \sum_{i=1}^N (D_i \nabla \rho_{ei}) + \rho_e \mathbf{v}, \quad (4)$$

где $\rho_e = \sum_{i=1}^N \rho_{ei}$ - совокупная плотность заряда в жидкости; $\sigma_i = \rho_{ei} u_i$ и $\sigma = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} u_i$ - парциальная и полная

удельная проводимости соответственно. Соответственно в (3), (4) первый член справа характеризует миграционную составляющую плотности тока (ток проводимости), второй – его составляющую, вызванную диффузионными процессами и третий член – его конвективную составляющую.

Далее, допуская наличие в жидкости одной пары ионов одинаковой валентности, но разного знака (бинарный электролит), запишем выражение (22) для плотности тока не подразумевая выполнения условия электронейтральности, т.е. $\rho_e^+ + \rho_e^- \neq 0$. Имеем $\rho_{e1} = \rho_e^+$, $\rho_{e2} = \rho_e^-$, $u_1 = u^+$, $u_2 = u^-$, $e_1 = q$, $e_2 = -q$. Здесь q заряд иона в единицах заряда протона. Таким образом $\rho_e^+ = qc_1$, $\rho_e^- = -qc_2$, где c_1 , c_2 - концентрации положительного и отрицательного ионов соответственно. Как отмечено выше, подвижность отрицательного иона является отрицательной величиной. Подставляя приведенные величины в (4), получаем

$$\mathbf{j} = \sum_{i=1}^2 (\rho_{ei} u_i \mathbf{E}_{el} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}) = (\rho_e^+ u_1 - \rho_e^- |u_2|) \mathbf{E}_{el} - (D_1 \nabla \rho_e^+ - D_2 \nabla \rho_e^-) + (\rho_e^+ + \rho_e^-) \mathbf{v}. \quad (5)$$

Как видно, конвективная составляющая плотности тока при $\rho_e^+ + \rho_e^- \neq 0$ отлична от нуля.

Вычислим удельную мощность тока $W = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}_{el}$ (1) применительно к электроосмотическому процессу в рассмотренном выше капилляре для бинарного электролита, плотность тока в котором описывается выражением (5).

Перепишем выражение (5), подставив соответствующие функции и максимально его упростив. Учтем, что $\rho_e^+ + \rho_e^- = \rho_e$. Далее, согласно [11, с. 149]

$$\rho_e(r) = -\varepsilon \varepsilon_0 \Delta \varphi(r) = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\lambda_D^2} \varphi(r) = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta}}{\lambda_D^2} \frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)}, \quad (0 < r < a). \quad (6)$$

Кроме того, согласно [11, с. 149, выражение (8.38)], градиенты $\nabla \rho_e^+$ и $\nabla \rho_e^-$ ортогональны вектору $\mathbf{E}_{el}$ внешнего стационарного электрического поля, поэтому слагаемое $D_1 \nabla \rho_e^+ - D_2 \nabla \rho_e^-$ в (23) на величину W влияния не оказывает (см. (1)). Далее, примем для простоты равенство подвижностей отрицательного и положительного ионов $u_1 = |u_2| = u$ и учтем, что

$$\rho_e^+ u_1 - \rho_e^- |u_2| = u(c^+ q + c^- q) = uq(c^+ + c^-).$$

Тогда, согласно выражению для концентраций положительного и отрицательного ионов в приближении Дебая-Хюккеля [11, с. 148, выражение (8.33)], сумма концентраций равна (это выражение в [11] относится к плоской границе раздела, но имеет совершенно аналогичную структуру, что вновь приводит к равенству (6))

$$c^+ + c^- = 2c_0,$$

где c_0 - равновесная концентрация каждого из ионов.

С учетом сказанного получаем следующее выражение для $\mathbf{j}$

$$\mathbf{j} = 2c_0 u q \mathbf{E}_{el} + \rho_e \mathbf{v}.$$

Здесь $\mathbf{v} = (0, 0, v_3)$, где v_3 - электроосмотическая скорость в капилляре ([7, выражения (11), (12)]).

Для УМТ W получаем

$$W = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}_{el} = 2c_0 u q E_{el} \cdot \mathbf{E}_{el} + \rho_e \mathbf{v} \cdot \mathbf{E}_{el} = 2c_0 u q E_{el}^2 + \rho_e v_3 E_{el}.$$

Подставляя в последнюю формулу выражения (6) для ρ_e и выражение для v_3 (выражение (11) работы [7]), окончательно получаем

$$W = 2c_0 u q E^2 - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo}}{\lambda_D^2} \frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} \left[1 - \frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} \right] E. \quad (7)$$

Сравнение ДФ [7, выражение (14)] и УМТ (7) показывает, что обе эти функции пропорциональны квадрату амплитуды вектора электрической напряженности E .

Найдем диссипирующую в единицу времени энергию q_I за счет выделения джоулева тепла во всем объеме капилляра, подставляя (7) в следующее выражение

$$q_I = 2\pi l \int_0^a W r dr. \quad (8)$$

Вычисления дают следующий результат

$$\begin{aligned} q_I &= 2\pi l \int_0^a \left(2c_0 u q E_{el}^2 - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el}}{\lambda_D^2} \left(\frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} - \left(\frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} \right)^2 \right) \right) r dr = \\ &= 2\pi l \left(2c_0 u q E_{el}^2 \frac{a^2}{2} - \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el} \left(\frac{a}{\lambda_D} \frac{I_1(a/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_D^2} \left(1 - \left(\frac{I_1(a/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} \right)^2 \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Рассчитаем численно входящую в последнее выражение функцию безразмерного параметра a/λ_D

$$\Psi_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right) = \frac{a}{\lambda_D} \frac{I_1(a/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_D^2} \left(1 - \left(\frac{I_1(a/\lambda_D)}{I_0(a/\lambda_D)} \right)^2 \right). \quad (10)$$

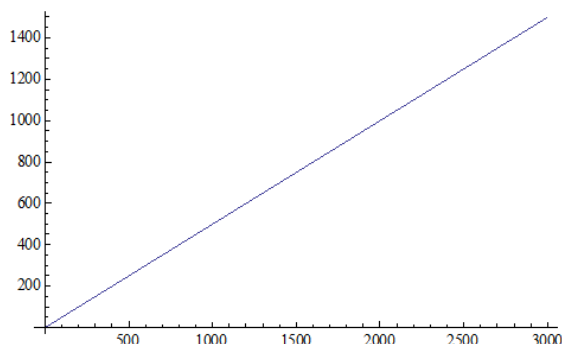


Рис. 1. График функции $\Psi_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right)$. Ось x - a/λ_D , ось y - Ψ_2

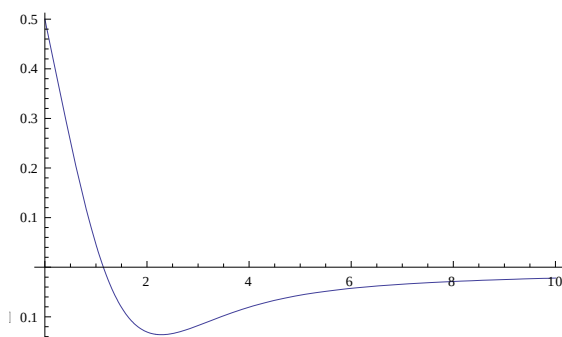


Рис. 2. График функции $\Delta_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right)$. Ось x - a/λ_D , ось y - Δ_2

График функции (10) в зависимости от аргумента a/λ_D показан на рис. 1. Аналогично со случаем вязкой диссипации [7] принимаем, что асимптотически при больших значениях аргумента имеет место равенство

$$\Psi_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) \approx \Psi_1\left(\frac{a}{\lambda_D}\right) / 2.$$

График функции невязки

$$\Delta_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right) = \Psi_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right)$$

представлен на рис. 2 (после $\frac{a}{\lambda_D} \geq 4$ функция невязки $\Delta_2\left(\frac{a}{\lambda_D}\right)$

быстро стремится к нулю: $\Delta_2(4) = -0.08$

$$\Delta_2(10) = -0.022; \quad \Delta_2(20) = -0.01; \quad \Delta_2(30) = -0.0065;$$

$$\Delta_2(100) = -0.002; \quad \Delta_2(1000) = -0.00019)$$

Поэтому, как и в случае вязкой диссипации [7], величину q_1 из (9) можно при $\frac{a}{\lambda_D} \geq 4$ аппроксимировать выражением

$$q_I \approx 2\pi \left(2c_0 u q E_{el}^2 \frac{a^2}{2} - \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el} \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) \right) = \pi \left(2c_0 u q E_{el}^2 a^2 - \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) \right). \quad (11)$$

Окончательно имеем для суммарной мощности потерь в рассмотренном капилляре $q_\Sigma = Q + q_I$, где Q определено выражением (18) в [7]

$$q_\Sigma = Q + q_I \approx \pi \left[\frac{1}{2} \eta V_{eo}^2 \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) + \left(2c_0 u q E_{el}^2 a^2 - \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) \right) \right]. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показывает, что суммарная мощность потерь пропорциональна длине капилляра, квадрату амплитуды вектора E_{el} , отношению радиуса капилляра к длине Дебая a/λ_D (или иначе величине пор). Кроме того величина суммарной мощности потерь q_Σ линейно зависит от динамической вязкости рабочей жидкости η , дзета-потенциала $\tilde{\zeta}$, подвижности ионов u , их концентрации c_0 , заряда ионов q , а также диэлектрической проницаемости ε .

3. Баланс мощности при электроосмотическом потоке

Суммарная подводимая к преобразователю мощность равна

$$W_e = \Delta \Phi_e I,$$

где I - суммарный ток в электродах. В условиях, когда электроосмотический процесс носит стационарный характер, что означает нулевой баланс приложенных сил, должен соблюдаться баланс подводимой к системе и теряемой в ней в единицу времени энергии. Это математически можно записать в виде $W_e = q_\Sigma + \eta I$, где q_Σ определяется в (30). Или в развернутом виде

$$\Delta \Phi_e I = \eta I + \pi \left[\frac{1}{2} \eta V_{eo}^2 \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) + \left(2c_0 u q E_{el}^2 a^2 - \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta} V_{eo} E_{el} \left(\frac{a}{\lambda_D} - 1 \right) \right) \right]. \quad (13)$$

Таким образом, уравнение (13) характеризует баланс подводимой и диссипирующей в единицу времени энергий в стационарном электроосмотическом процессе.

В заключение для примера приведем значения некоторых величин [11, с. 145]:

Ионы при T-25° С	H+	Ag+	K+	Li+	Na+	Br-	Cl-	F-	I-	OH-
подвижность иона $u \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	36.2	6.42	7.62	4.01	5.19	8.09	7.91	5.70	7.96	20.6
Коэффициент диффузии $D \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{с}^{-1}$	9.31	1.65	1.96	1.03	1.33	2.08	2.03	1.46	2.05	5.30

Кроме того, $\tilde{\zeta} \approx 100 \text{ мВ}$ [11, с. 159], $\lambda_D \approx 10 \text{ нм}$ [11, с. 150].

Заключение

Выше рассмотрены вопросы баланса энергии в стационарном электроосмотическом процессе в цилиндрическом капилляре, к находящейся в котором жидкости с помощью электродов приложена разность потенциалов. Рассматривается диссипация энергии за счет выделения Джоулева тепла. Приводятся в значительной степени упрощенные выражения, позволяющие оценивать величину указанных

диссипативных процессов с помощью параметров, характеризующих происходящие физические процессы. Корректный учет диссипативных потерь в излучателе нового типа позволит оптимизировать его конструкцию.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-19-02 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования.

Литература

1. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть I. Гидродинамический аспект//Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 25-35.
2. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть II. Акустический аспект//Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 36-44.
3. Шарфарец Б.П. Применение системы уравнений электрогидродинамики для математического моделирования нового способа электроакустического преобразования//Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 4. С. 127-134.

4. Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Шарфарец Б.П., Гуляев Ю.В. Теоретическое обоснование нового метода электроакустического преобразования. Линейное приближение // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 483. № 3. С. 260-264.
5. Шарфарец Б.П. Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 135-142.
6. Шарфарец Б.П., Лебедев Г.А., Пыхов Д. С., Сергеев В. А., Сетин А. И. Акустический преобразователь, построенный на использовании электрокинетических явлений // Морские интеллектуальные технологии. 2019. 1 (43) Т. 1. С. 147-152.
7. Шарфарец Б.П., Легуша Ф.Ф. О диссипации энергии в электроосмотическом процессе, протекающем при работе электроакустического преобразователя нового типа // Морские интеллектуальные технологии, 2019. Т. 1, № 2(44), с. 143-148.
8. Химическая энциклопедия. Т. 4. М.: БРЭ. 1995. 639 с.
9. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир. 1977. 464 с.
10. Физическая энциклопедия. Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1988. 704 с.
11. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
12. Electrohydrodynamics. Edited by Antonio Castellanos. Wien: Springer-Verlag. 1998. 362 p.

References

1. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode ehlektro-akusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na ehlektrokineticheskikh yavleniyah. Chast' I. Gidrodinamicheskij aspekt // Nauchnoe priborostroenie. 2018. Т. 28. № 2. S. 25-35.
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode elektroakusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na elektrokineticheskikh yavleniyakh. Chast' II. Akusticheskij aspekt // Nauchnoe priborostroenie. 2018. Т. 28. № 2. S. 36-44.
3. Sharfarets B.P. Primenenie sistemy uravnenij ehlektrogidrodinamiki dlya matematicheskogo modelirovaniya novogo sposoba ehlektroakusticheskogo preobrazovaniya // Nauchnoe priborostroenie. 2018. Т. 28. № 4. S. 127-134.
4. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyaev Yu.V. Teoreticheskoe obosnovanie novogo metoda elektroakusticheskogo preobrazovaniya. Lineynoe priblizhenie // Doklady Akademii Nauk. 2018. Т. 483. № 3. S. 260-264.
5. Sharfarets B.P. Sistema uravneniy elektrogidrodinamiki primenitel'no k elektroosmoticheskim protsessam // Nauchnoe priborostroenie. 2019. Т. 29. № 1. S. 135-142.
6. Sharfarets B.P., Lebedev G.A., Pykhov D. S., Sergeev V. A., Setin A. I. Akusticheskij preobrazovatel', postroennyy na ispol'zovanii elektrokineticheskikh yavleniy // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. 1 (43) Т. 1. S. 147-152.
7. Sharfarets B.P., Legusha F.F. About the dissipation of energy in the electroosmotic process, when the electric acoustic converter of a new type is working // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. Т. 1, № 2(44), S. 143-148.
8. Khimicheskaya entsiklopediya. Т. 4. М.: BRE. 1995. 639 s.
9. N'yumen Dzh. Elektrokhimicheskie sistemy. М.: Mir. 1977. 464 s.
10. Physical Encyclopedia. V. 1. М.: Soviet Encyclopedia. 1988. 704 p.
11. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
12. Electrohydrodynamics. Edited by Antonio Castellanos. Wien: Springer-Verlag. 1998. 362 p.

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**Иван Андреевич Николаев**

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры теоретической механики и сопротивление материалов,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3

Александр Исаакович Фрумен

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3
e-mail: grossfrum7@mail.ru

Аннотация

В статье искусственный интеллект (ИИ) рассмотрен как техническое устройство, содержащее программные составные части. Описана история развития ИИ начиная с появления первых цифровых ЭВМ. Отмечено, что, с развитием техники у ИИ, помимо способности проведения вычислений, проявились дополнительные функциональные возможности - вести контроль за состоянием окружающей обстановки и управлять периферийными устройствами. Прогресс в технике привел к появлению программируемых контроллеров, которые можно рассматривать как элементную базу для создания специализированных многопроцессорных систем (нейронных сетей) в обустройстве структуры ИИ. Такие (миниатюризированные) устройства ИИ включаются в состав различных технических систем и их сетей для контроля и управления. Это развитие нового направления в различных классах техники - технические устройства, наделённые ИИ. Появление программируемых контроллеров открыло также и возможность ускоренного формирования базы знаний в процессе создания и эксплуатации ИИ, включая в него и результаты имитационного моделирования, прежде всего для нелинейных труднодоступных и опасных для человека процессов при наличии вероятностных параметров и характеристик.

Ключевые слова: математическая модель, искусственный интеллект, техническое устройство, нейронные сети, база знаний, имитационное моделирование.

ENSURING THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**Ivan A. Nikolaev**

Associate Professor, Department of theoretical mechanics and strength of materials
St. Petersburg State Marine Technical University
190121 St. Petersburg, st. Lotsmanskaya 3

Aleksander I. Frumen

Professor, Department of structural mechanics ship,
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya 3

Abstract

In the article artificial intelligence (AI) is considered as a technical device that contains programmatic components. Describes the history of the development of AI since the emergence of the first digital computers. Noted that, with the development of technology, in addition to the ability to perform calculations, demonstrated, additional functionality to control the State of the environment and control the peripherals. Progress in technology has led to the emergence of programmable controllers, which can see as components, for creating specialized multiprocessor systems (neural networks) in the settling of the structure AI. Such (miniaturized) devices AI are included in various technical systems and networks for monitoring and control. This is a new direction in development of various classes of technology - technical devices are members assigned with AI. The emergence of programmable controllers has also opened and the ability to fast-track the formation of a knowledge base in the process of establishing and operating the S include and simulation results, especially for non-linear hard to man with a number of probabilistic processes parameters and characteristics.

Key words: mathematical model, artificial intelligence, technical device, neural networks, knowledge base, simulation.

В настоящее время, в качестве одного из устойчивых направлений технического прогресса происходит создание и развитие технических устройств с признаками искусственного интеллекта, ассоциирующегося с представлениями об интеллекте человека.

В понимании интеллекта человека будет руководствоваться определением, которое дано К. Ясперсом: «**Интеллект — это человек в целом, рассматриваемый со стороны его способностей**». Это достаточно обширное определение позволяет рассматривать во взаимной связи процессы развития способностей у

человека и их применение. При этом можно обнаружить наличие разного рода профессиональных предрасположенностей и разного уровня их развития. На ранних стадиях развития способностей у отдельного человека этот процесс осуществляется под контролем и управлением других людей, у которых уровень развития необходимых способностей уже получил соответствующее развитие.

Появление данного направления в развитии техники обусловлено её же собственным прогрессом. Так опираясь на появившиеся возможности производства простейших электронных устройств, люди с развитыми способностями к техническому творчеству сконструировали базовые электронные элементы, на основе которых удалось придумать технические устройства, получившие название электронные вычислительные машины (ЭВМ). Эти устройства воспроизводили способность человеческого мозга выполнять действия в соответствии с рекомендациями теории чисел и алгебры логики Буля. При этом обнаружилось неоспоримое достоинство ЭВМ: на фоне больших объёмов вычислений: более высокая скорость их исполнения по сравнению со скоростью исполнения вычислений, проводимых человеческом.

Учитывая определение интеллекта человека по К. Ясперсу, можно говорить о том, что уже у технических устройств, изначально создававшихся только для решения вычислительных задач, когда элементная база для его создания состояла из ламповой электроники, есть признаки интеллекта – искусственного (ИИ).

Новая качественная возможность для создания и развития ИИ появляется после изобретения триггера и последующего изобретения на его основе технического устройства, получившего название регистр. Функциональные возможности регистра позволили увидеть в состоянии регистра образ целого числа в двоичной системе исчисления, что, вместе с изобретением технических устройств, работающих в соответствии с правилами алгебры логики, позволило построить технические устройства, воспроизводящие образ действий при сложении и умножении в «столбик» электронных образов целых чисел. Это позволяет говорить о «навыках» ИИ, которыми он овладел по воле людей, имеющих сходство с последовательностью элементарных действий, прививаемых человеку при его обучении сложению и умножению чисел в «столбик» на этапе получения начального образования.

В устройстве ЭВМ, как первого представителя ИИ, выделим три составные части: - процессор, память данных и память программ. Регистры являются сборочными единицами каждого из перечисленных устройств. Обратим внимание на возможность разнообразного применения регистров в составе процессора, когда ЭВМ осуществляет действия, указанные к исполнению в пользовательской (прикладной) программе, размещённой в оперативной памяти, что позволяет говорить о работе ЭВМ под управлением прикладной (пользовательской) программы.

В памяти программ можно выделить постоянную составляющую, состоящую из технических устройств, воспроизводящих алгоритмы элементарных действий, на которые «способен» ИИ. В частности, в постоянной памяти программ содержатся устройства реализующие процессы сложения и умножения целых чисел в «столбик».

Одним из признаков ИИ можно считать наличие языка общения, позволяющего устанавливать, хоть и ограниченное, взаимопонимание между человеком и техническим устройством - ЭВМ. Языком общения, содержащим сведения об элементарных командах, которые может воспринимать и исполнять ИИ является «ассемблер».

В описании языка «ассемблер» содержится словарь с переводом команд с языка понятного человеку на язык двоичного кода, который «понятен» ИИ. Знание содержания этого словаря позволяет пользователям ЭВМ представлять алгоритмы решения прикладных задач на «языке», который ЭВМ «обучена» воспринимать для хранения прикладные программы, переводить прикладные программы на язык двоичного кода и размещать их в оперативной памяти, делая доступными для процессора.

Появление полупроводниковой электроники и на её основе технологий производства интегральных схем привело к миниатюризации ЭВМ. «Интеллектуальные способности» ЭВМ расширились с появлением в составе её устройства операционной системы. К ЭВМ подключили таких периферийных устройств как монитор, клавиатура и принтер, что позволило установить дополнительные каналы для общения человека с ЭВМ. Для удобства конечных пользователей были созданы языки программирования высокого уровня. Появилось программное обеспечение, позволяющее ЭВМ воспринимать символьные и графические языки общения с человеком. Функциональные возможности ЭВМ уже не ограничивались только вычислениями.

Обратим внимание на то, что «интеллектуальные способности» имеют вполне конкретное материальное представление в виде программы на электронном носителе. Когда программа на электронном носителе представлена в двоичном коде и доступна для процессора, то процессор выполняя последовательность команд, содержащихся в программе, управляет работой некоторого технического устройства. Можно считать, что процессор вместе с программой является интеллектуальной составной частью управляемого технического устройства.

Появление технологий производства больших интегральных схем способствовало продолжению процесса миниатюризации ЭВМ. Появились микропроцессоры уже как элементная база для конструирования вычислительной техники. Уменьшались размеры элементов технических устройств памяти данных и памяти программ. Появилась возможность, используя текущие достижения Техники, получить микро вычислительный комплекс и скомпоновать его с периферийными устройствами (монитором,

клавиатурой и принтером). На выходе получилось то, что назвали персональным компьютером, которому для размещения достаточно места на письменном столе. При этом технические характеристики по быстродействию, объёму оперативной и внешней памяти настольных персональных компьютеров быстро превосходили ЭВМ, изготавливаемых на прежней элементной базе – интегральных схемах, когда процессор ещё нельзя считать относящимся к элементной базе.

Технологии производства больших интегральных схем, позволили разместить все элементы процессора на одном кристалле полупроводника и получить такое его исполнение, которое позволяет считать процессор конструктивным (базовым) элементом компьютера.

Появление микропроцессоров в составе элементной базы для конструирования вычислительной техники открыло перспективу создания многопроцессорных вычислительных систем, позволяющих. К примеру, применяя методы вычислительной математики, получать приемлемые решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, которые утратили свою технико-экономическую привлекательность в исполнении однопроцессорных систем в связи с естественно возникающими у них ограничениями по объёмам используемой памяти и быстродействию. Тем самым обозначилось направление развития ИИ, в котором промышленно производят и совершенствуют суперкомпьютеры.

Появление микропроцессорной вычислительной техника, открыло возможность совмещать её работу с работой датчиков (сенсоров), осуществляющих преобразование непрерывно изменяющегося воздействия со стороны окружающей среды в непрерывный (аналоговый) электрический сигнал. Такое совмещение стало возможным после изобретения технического устройства, названного аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Потребовалось ещё и создание технических устройств, вместе с программами их действий, обеспечивающих правила (протокол) обмена данными между периферийными устройствами типа сенсор и компьютером. Именно такое программное обеспечение указывает на приобретение ИИ новой способности: - возможности непрерывного контроля над состоянием внешней среды по отношению к ИИ.

Появившаяся возможность у компьютеров снимать непрерывно показания датчиков, размещённых на периферийных устройствах, да к тому же проводить анализ этих показаний с последующим принятием решения, руководствуясь алгоритмами действий, содержащихся в прикладных программах, указывает на дальнейшее развитие способностей ИИ. Ведь многие виды работ под управлением человека выполняются с опорой на исполнение инструкций, которые можно рассматривать как алгоритмы действий.

В связи с прогрессом в Технике в развитии ИИ обозначилось ещё одно направление, связанное с появлением программируемых контроллеров в качестве элементной базы для конструирования ИИ. Программируемые контроллеры - это большие

интегральные схемы, у которых на одном полупроводниковом кристалле размещены микропроцессор, память данных, память программ, а ещё такие компоненты, ранее относимых к периферийным, как таймеры, аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), компараторы и другие, образуя целостное устройство с выводами для установления контактов с внешними устройствами. Основное (исходное) назначение контроллеров обнаруживается наличием аналоговых выводов для приёма сигналов от внешних датчиков и цифровые выводы для передачи команд управления внешним исполнительным устройствам.

Применение компьютеров и контроллеров для приёма аналоговых сигналов, характеризующих состояние некоторого технического устройства и условий его эксплуатации от датчиков, находящихся в составе этого устройства, последующего анализа сигналов и выработки команд управления исполнительными механизмами в составе этого же технического устройства позволяет говорить о появлении классов технических устройств, наделённых ИИ. В настоящее время примеры таких технических устройств в большом количестве можно обнаружить в робототехнических системах. Эти примеры позволяет чётко уловить следующие признаки, присущие ИИ по функциональному назначению:

- выполнение функций контроля за изменяющейся ситуацией и состоянием некоторого объекта Техники в этой ситуации;
- управление действиями объекта Техники с учётом анализа результатов наблюдений, полученных при выполнении функций контроля.

Контроль за ситуацией предусматривает текущий контроль параметров, характеризующих состояние объекта Техники и состояние окружающей его обстановки, позволяющий сформировать представление о развитии наблюдаемых событий.

В современных программируемых контроллерах заложена возможность программного прерывания при возникновении определённых событий в изменяющейся ситуации, что позволяет изменять режимы работы контроллера перейти к выполнению другой программы, находящейся в памяти контроллера и доступные его процессору. Здесь отметим то обстоятельство, что в любой новой программе можно переопределить функциональное назначение выводов контроллера или активизировать другие выводы, тем самым на некоторое время изменить функциональное назначение самого контроллера. Наличие такой программной возможности содержит потенциал для создания специализированных многопроцессорных систем, которые можно ожидать будут экономичнее промышленных многопроцессорных компьютеров.

Отметим, что на современном этапе развития ИИ в качестве базового элемента для конструирования ИИ уже занимают программируемые контроллеры, работающие под управлением прикладных программ. Наличие возможности перепрограммировать контроллер

позволяет перенастраивать его целевое назначение.

В 1980 году, когда термин «ИИ» ещё не имел общепринятого употребления, а ключевое место в элементной базе для конструирования микропроцессоров и микрокомпьютеров занимали электронные устройства воспроизводящие правила алгебры логики и регистры, появилась публикация вводного курса [1] по проектированию микропроцессоров и микрокомпьютеров, написанного американскими авторами Д. Гинове и Р. Россер. Отметим последовательность изложения содержания курса. Изложение курса начинается со сведений из математических теорий, давая направление творческой мысли в создании элементной базы технических устройств способных воспроизводить элементарные действия, рекомендуемые математическими теориями. Таким образом обозначается значимость фундаментальных математических теорий в создании элементной базы для конструирования микропроцессоров и микрокомпьютеров, включающей регистры и логические электронные устройства.

Появление программируемых контроллеров в качестве элементной базы для создания многопроцессорного устройства ИИ открывает

перспективу научить ИИ пользоваться рекомендациями математической теории случайных процессов, в частности, случайных механических колебаний. В многопроцессорном устройстве ИИ заложена возможность проведения параллельных вычисления и хранения функций, значения которых выражаются матрицами. Такие возможности у однопроцессорных устройств просто отсутствуют.

Многопроцессорное устройство на начальной стадии его формирования, предназначающееся для непрерывного приёма и первичной обработки данных, на пример, о колебательном процессе, схематически изображено на рисунке. О процессе предварительно известно то, что, находясь на детерминированных представлениях, интерпретировать результаты его экспериментальные наблюдения не представляется возможным. Поэтому формирование предлагаемого устройства проходило, опираясь на исходные и основные понятия теории вероятностей, теории непрерывных случайных процессов и математической статистики [2], а также опыт применения этих теорий при наблюдении механических колебаний, изложенный в работе [3].

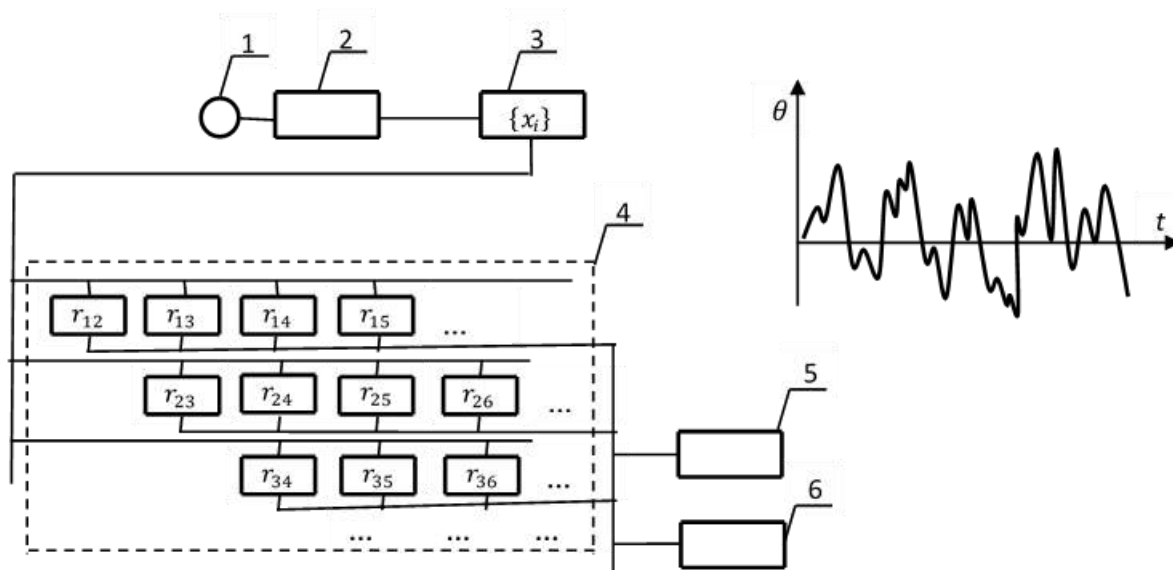


Рис. Схематическое изображение составной части устройства ИИ воспринимающего случайные механические колебания для получения информации о корреляционной функции, θ – измеряемое отклонение от положения равновесия; t – текущее время

Получилось устройство, состоящее из связанных между собой программируемых контроллеров, о работе которого можно рассказать следующее. Контроллер (2) получает данные о значении параметра - θ , характеризующего положение некоторого технического устройства, от датчика (1) постоянно через малый промежуток времени - Δt . В соответствии с рекомендациями математической статистики, а также ожидание стационарности и эргодичности в начальной стадии развития наблюдаемого случайного процесса, после поступления в контроллер (2) 8-го результата от датчика (1), появляется возможность

вычисления математического ожидания. Опираясь на результаты текущего и предыдущих измерений. Далее, проведя центрирование 8-ми результатов, вычисляем дисперсию, после чего 8-е измерение можно рассматривать как первую реализацию случайной величины - x_1 с известным математическим ожиданием и дисперсией, с которой начинается построение наблюдаемого случайного процесса - $X(t)$ в дискретной форме: - $\{x_i\}$. Естественно, что все упомянутые вычисления для определения любого - x_i , а также их сохранение в памяти контроллера (3) должно осуществляться за промежуток времени не

превышающий $-\Delta t$. Обратим внимание на то, что для каждого $-x_i$ вычисление математического ожидания и дисперсии предполагается осуществлять по результатам текущего и предыдущих 7-ми показаний датчика (1).

По мере накопления данных в упорядоченном массиве $\{-x_i\}$ появляется возможность приступить к получению данных о корреляционной функции наблюдаемого случайного процесса, представляемой в дискретном виде матрицей, элементы которой обозначим как $-r_{kj}$. Здесь индексы « k » и « j » обозначают номера прошедших моментов времени $\{-t_k\}$ и $\{-t_j\}$, и номера элементов упорядоченного массива $\{-x_i\}$ им соответствующие, с которых начинается образование двух выборок: используемых для вычисления значения корреляционной функции, руководствуясь следующим правилом: $r_{kj} = \sum_{k,j}^{k+n,j+n} x_k \cdot x_j$. Важно отметить наличие одинакового количества элементов « n » в выборках $\{x_k\}$ и $\{x_j\}$ при любом сочетании значений индексов « k » и « j ».

Увеличение массива данных $\{-x_i\}$ приводит к увеличению объёмов вычислений, связанных с определением и уточнением значения элементов матрицы, содержащей сведения о корреляционной функции. Чтобы не выходить за пределы промежутка времени $-\Delta t$, эту работу можно распределить между контроллерами, входящими в состав массива (4). Каждый из контроллеров этого массива, получая в качестве исходных данных массив $\{-x_i\}$ подготавливает данные для вычисления и уточнения значения корреляционной функции для одной комбинации значений индексов « k » и « j ».

Результаты работы контроллеров (4) поступают в контроллер (5) и контроллер (6). Контроллер (5), содержит программы для распознавания складывающейся ситуации: - признаки стационарности, наметившиеся признаки не стационарности, признаки значимой не стационарности. Контроллер (6) отслеживает возможное «переполнение» массива контроллеров (4).

В отношении массива (4) отметим, что он имеет фрактальную структуру, так как каждый из элементов массива не может вычислять автокорреляционную функцию, а у структуры (4) такая способность появилась.

В литературе [4] отмечается появления специализированных процессоров, основанных на математических теориях с признаками фундаментального знания. В частности, это касается процессора с многозначной (нечеткой) логикой. В связи с этим пример устройства, приведённый на рисунке и описание его работы, способствует появлению, например, технического устройства, которое может получить название *процессор корреляционного анализа*. Он позволит наблюдать реальную ситуацию, руководствуясь представлениями теории вероятностей и случайных процессов.

Заметим, что современный уровень развития техники предполагает построение модели изменяющейся ситуации, в которой присутствует описание устройства и его функционирование под контролем и управлением ИИ. Математические модели, в окончательном виде принимают форму алгоритмов действий и проявляются по мере развития представлений о ситуации, доходя до степени подробности, когда можно использовать языки соответствующих математических теорий.

В заключение отметим, что, по мнению авторов наиболее перспективное направление развития ИИ, базируется на развитии сети технических устройств с микропроцессорами и связано с созданием искусственных нейронных сетей [5, 6, 7, 8] адаптивных к ситуации. Этому прогрессу также будет способствовать включение в схему работы ИИ - имитационного моделирования, прежде всего для нелинейных процессов с вероятностными характеристиками и параметрами. Такой подход позволит создать дополнительную ситуационную базу сценариев и повысить скорость оценки и управления ситуацией, т.е. приема решения по результатам анализа на основе, например, нечеткой кластеризации. Это особенно важно для нелинейных процессов при наличии вероятностных параметров и характеристик в труднодоступных и опасных для человека местах.

Литература

1. *Гинове Д. и Россер Р.* Микропроцессоры и микрокомпьютеры. Вводный курс, М., Мир, 1983.
2. Вероятностные разделы математики. Учебник для бакалавров технических направлений. Под ред. *Максимова Ю.Д.* СПб: «Иван Фёдоров», 2001.
3. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. Мир, М., 1974.
4. *Нечаев Ю.И.* Искусственный интеллект: концепции и приложения. Учеб. Пособие. СПб: Изд. СПбГМТУ, 2002.
5. *Нечаев Ю.И.*, Новая рубрика: морские интеллектуальные технологии. Морской вестник, №1(1), 2002, с. 63.
6. *Нечаев Ю.И., Сук Ю.Л.* Нейросетевые модели в морских интеллектуальных системах. Морской вестник, №1(5), 2003. с. 87 - 93.
7. *Редько В.Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепция эволюционной кибернетики. М., Книжный дом «ЛОБРОКОМ», 2013, 274 с.
8. *Семенов Н.Н.* Методы искусственного интеллекта. Изд. СПбГМТУ, 2017, 115 с.

Literature

1. *Ginove D. and Rosser R.* Microprocessors and microcomputers. Introductory course, M., Mir, 1983.
2. Probabilistic mathematics topics. Tutorial for Bachelors technical thrusts. Ed. *Maksimov Y.D.*, SPb. «Ivan Fyodorov», 2001.
3. *Bendat J., Peirsol A.* Measurement and analysis of stochastic processes. Mir, M., 1974.
4. *Nechayev J.I* Artificial intelligence: Concepts and applications. Stud. Allowance. SPb: Izd SPbSMTU, 2002.

5. *Nechayev Y.I.* A new Rubric: marine technology. Marine Bulletin No. 1 (1), 2002, p. 63.
6. *Nechaev J.I. Siek Y.I.* Neural network model in marine intelligent systems. Marine Bulletin No. 1 (5), 2003. p. 87-93.
7. *Redko V.G.* The evolution of neural network intelligence: Concept and model of evolutionary cybernetics. M., Book House "LOBROKOM", 2013, 274 p.
8. *Semenov N.N.* Artificial intelligence methods. Ed. St. Petersburg, SPbSMTU, 2017, 115p.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 551.46

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ**Николай Николаевич Семёнов**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем и технологий Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
197046, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 5
e-mail: nsemenoff@mail.ru

Михаил Михайлович Шилин

старший преподаватель кафедры морских информационных систем и технологий,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
197046, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 5
e-mail: shilin_m_m@corp.smtu.ru

Аннотация

В статье приведено описание имитационной модели телеуправления несколькими подводными аппаратами. Модель учитывает процессы формирования и распространения в морской среде шумовых сигналов от объектов моделирования (подводных аппаратов, подводных целей, объектов слежения и др.), специфику различных алгоритмов обработки гидроакустической информации, а также кинематику движения всех объектов. Теленаведение подводных аппаратов может осуществляться как в одиночном варианте с формированием курса по одному из нескольких методов теленаведения, так и в групповом варианте, при котором предусмотрен алгоритм комплексирования нескольких методов теленаведения с учётом условий гидроакустической совместимости.

С помощью данной модели телеуправления можно проводить исследование эффективности алгоритмов теленаведения подводных аппаратов в различных тактических ситуациях, оценивать влияние различных параметров как алгоритмов теленаведения так и обработки сигналов на эффективность обнаружения цели и достижения её подводными аппаратами, а также выбирать оптимальные параметры управления.

Ключевые слова: имитационная модель, телеуправляемый подводный аппарат, теленаведение, разнесение, пеленгование, пеленгационный рельеф

SIMULATED MODEL OF REMOTELY OPERATED VEHICLES (ROV) CONTROL**Nikolay N. Semenov**

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Information Systems and Technologies St. Petersburg State Marine Technical University,
197046, St. Petersburg, Kronverskiy Prospect, 5
e-mail: nsemenoff@mail.ru

Mikhail M. Shilin

Senior Lecturer of the Department of Marine Information Systems and Technologies
St. Petersburg State Marine Technical University,
197046, St. Petersburg, Kronverskiy Prospect, 5
e-mail: shilin_m_m@corp.smtu.ru

Abstract

The article describes a simulation model of remote control of several ROV. The model takes into account the processes of generation and propagation in the marine environment of noise signals from modeling objects (ROV, underwater targets, tracking objects, etc.), the specifics of various algorithms for processing sonar information, as well as the kinematics of movement of all objects. Remote navigation of ROV can be carried out both in a single version with the formation of a course according to one of several remote navigation methods, and in a group version, in which an algorithm for combining several remote navigation methods taking into account sonar compatibility conditions is provided.

With the help of this remote control model, it is possible to study the effectiveness of the remote targeting algorithms of ROV in various tactical situations, evaluate the influence of various parameters of both remote targeting algorithms and signal processing on the efficiency of target detecting and reaching by ROV, and also select the optimal control parameters.

Key words: simulation model, ROV, remote targeting, diversity, direction-finding, direction-finding relief

Введение

Исследование сложных процессов теленавещения (ТН) подводных аппаратов (ПА) в интересах проектирования отдельных корабельных систем, входящих в контур телеуправления (ТУ), осуществляется на имитационных моделях и представляет собой сложную техническую и научно-практическую задачу. Учёт особенностей этих систем, характеристик ПА и среды, каждый раз производится на уровне, зависящем от степени влияния их параметров на процесс управления.

Изучение данных процессов в интересах научного обоснования эффективности разрабатываемых алгоритмов ТН и выбора алгоритмов обнаружения сигнала и подавления помех (от одного или даже нескольких ПА) в гидроакустическом комплексе (ГАК) носителя требуют более простой, но одновременно более оперативной модели, в которой можно было бы оценить значимость нововведений.

Поэтому целью настоящей статьи явилось описание созданной авторами оперативной имитационной модели телеуправления (рисунок 1), позволяющей изменять её ключевые параметры. Например, такие, как алгоритмы теленавещения, обнаружения, подавления и число объектов управления и сопровождения.

Разработанная модель включает в себя:

модель формирования и распространения сигналов от подводной цели (ПЦ), телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА) и объектов слежения (ОС);

модель системы ГАК носителя, выполняющую обнаружение и обработку информации;

модель автоматизированной информационно-управляющей системы (АИУС), занимающуюся определением координат и параметров движения цели (КПДЦ) и выработкой курса каждому ТПА;

модель системы телеуправления, определяющую метод теленавещения каждого ТПА и выполняющую условную передачу этого курса;

кинематическую модель движения всех объектов.

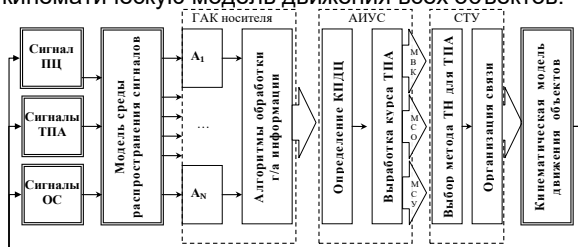


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели телеуправления

Рассмотрим более подробно каждую составляющую этой модели.

1. Модель формирования и распространения сигналов

Полезный сигнал на входе ГАК в режиме шумопеленгования (ШП) обусловлен первичным акустическим полем источника (ПЦ, ТПА, ОС), которое в общем случае может быть представлено в виде суммы широкополосного шума, имеющего

непрерывный спектр, и узкополосных дискретных составляющих, обусловленных работой конкретных механизмов [1].

Сущность процесса ШП состоит в обнаружении шумового сигнала и оценке его параметров на фоне шумовой помехи, которая в общем случае представлена суммой широкополосных и узкополосных компонент и импульсных процессов. Ввиду выполнения задачи обнаружения в сложной помехо-сигнальной обстановке, при отношении уровней сигнала и помехи в поле вблизи антенны много меньшем единицы, в основу процедуры обнаружения цели было положено выявление пространственной корреляции поля, имеющей место на участке фронта волны сигнала в пределах апертуры приёмной антенны [1].

После обнаружения производится процедура пеленгования цели в горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) плоскостях, а также вторичная обработка сигнала, направленная на измерение его параметров в интересах решения задач определения КПДЦ и классификации.

Первичное поле подводных объектов характеризуется функцией спектральной плотности среднего квадрата давления шума. Спектр суммарного акустического поля является суперпозицией нескольких видов шумов в зависимости от скорости движения объекта. Основной составляющей суммарного спектра является шум гребных винтов (кавитационный шум), характеризующийся сплошным спектром, имеющим максимум в звуковом диапазоне частот. Однако с увеличением скорости и уменьшением глубины хода максимум смещается в область более низких частот.

Спектр шума объекта можно разбить на три частотных диапазона, характеризующихся своим показателем спада спектра с возрастанием частоты:

$$n = \frac{\Delta G}{10 \lg \left(\frac{f_2}{f_1} \right)}, \quad (1)$$

где $\Delta G(f) = 10 \lg(f_2) - 10 \lg(f_1)$ – величина спада спектра, f_1 и f_2 – начальная и конечная частота рассматриваемого диапазона.

Шумовой сигнал излучается ненаправленным источником (ПЦ, ТПА, ОС) с равномерным в первом приближении спектром в рабочей полосе частот приёмной системы. Он достигает антенны ГАК по водному и отражённому от дна и поверхности лучам, состоящим из когерентной и рассеянной частей [2].

Зная закон спада спектра в частотном диапазоне $\Delta f = f_2 - f_1$, можно производить расчёт на некоторой эквивалентной частоте f_3 , значение которой зависит от расстояния r и наклона спектра n :

$$f_3 = a(r) \sqrt{f_1 f_2}, \quad (2)$$

где $a(r)$ – коэффициент, согласно [1], в пределах спада спектра 1...12 дБ/октава и расстояний до 500 км равный 0.98...0.92 в частотном диапазоне 0.5...1.0 кГц и 0.86...0.84 – для $\Delta f = 2...4$ кГц.

Давление шумового сигнала, пришедшего по водному лучу, действующее на центр антенны ГАК носителя, на эквивалентной частоте f_3 в полосе частот Δf , на расстоянии r от источника излучения описывается выражением:

$$p_w(t) = \frac{p_w(1,1,1)\sqrt{\Delta f}}{f_3^{n/2}} \frac{r_0}{r} 10^{-0,05\beta r}, \quad (3)$$

где $p_w(1,1,1)$ – приведённый уровень шума на частоте 1 кГц, в полосе 1 Гц, на расстоянии r_0 от акустического центра шумоизлучения; β – коэффициент пространственного затухания звука в воде на эквивалентной частоте, который, согласно [3], для низкочастотных приёмных антенн вычисляется в дБ/км по формуле:

$$\beta = (1.65 + 26.3 \cdot f^{1.45}) \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где частота f измеряется в кГц.

Напряжение на выходе i -го приёмного элемента антенной решётки ГАК носителя (рисунок 2) с чувствительностью γ [мкВ/Па] и задержкой сигнала на элементе относительно начала координат, обеспечивающей фазирование в направлении источника излучения (φ_{0u} , θ_{0u}), согласно [4], запишется как

$$u_i(t) = p_w(t - \tau_i) h_i R_s(\varphi_i, \Theta_i) \gamma, \quad (5)$$

где $\tau_i = \frac{1}{c} [y_i(\sin \varphi_{0u} \cdot \sin \Theta_{0u}) + z_i \cos \Theta_{0u}]$ – задержка сигнала на i -ом элементе; h_i – амплитудный весовой коэффициент элемента; $R_s(\varphi_i, \Theta_i)$ – амплитудная характеристика направленности элемента в направлении источника излучения.

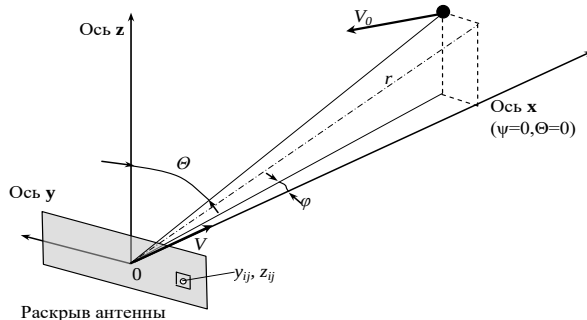


Рис. 3. Система координат антенны и объекта шумоизлучения

Когерентные зеркальные компоненты получают при подстановке в формулу (3) вместо r расстояния до зеркальных точек и добавлении в координату t задержки зеркальных лучей $(1/c) \cdot (y \sin \theta_{s,b} \sin \varphi_{s,b} + z \cos \theta_{s,b})$, где углы $\varphi_{s,b}$, $\theta_{s,b}$ направлены на зеркальные источники. Соотношение (3) должно быть умножено на расчётный модуль коэффициента отражения [5].

Сигнал на выходе сформированного пространственного канала из L_a элементов есть сумма сигналов с этих элементов:

$$U(t) = \frac{\sum_{i=1}^{L_a} u_i(t) \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{L_a} h_i}. \quad (6)$$

Рассеянная компонента может быть определена на основании решения задачи о рассеянии поверхностью излучения точечного источника [6]. Рассеянное поле двухмасштабной модели характеризуется коэффициентом рассеяния m_s на крупных неровностях, достигающим значения порядка 1.0, и на резонансных неровностях m_p , имеющим порядок $-40 \dots -30$ дБ, поэтому можно положить $m_p = 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$, не зависящим от углов.

Тогда коэффициент рассеяния звука крупными неровностями поверхности m_s определяется как [4]

$$m_s(\Theta_s, \varphi_s, \Theta_{0s}, \varphi_{0s}) = \frac{1.6 \times 10^2}{3 + 5.12V} \times \frac{[1 + \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} - \sin \Theta_s \sin \Theta_{0s} \cos(\varphi_s - \varphi_{0s})]^2}{(\cos \Theta_s + \cos \Theta_{0s})^4} \times (7) \times e^{\frac{5 \times 10^2}{3 + 5.12V} \frac{\sin^2 \Theta_s + \sin^2 \Theta_{0s} - 2 \sin \Theta_s \sin \Theta_{0s} \cos(\varphi_s - \varphi_{0s})}{(\cos \Theta_s + \cos \Theta_{0s})^2} + 10^{-3}}.$$

Коэффициент m_s сильно зависит от скорости ветра V и не зависит от частоты. Углы прихода лучей, используемые при расчёте, показаны на рисунке 3.

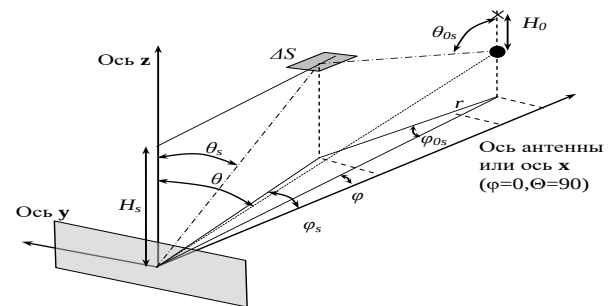


Рис. 4. Система координат для определения коэффициента m_s

Давление рассеянной компоненты шумового сигнала в центре антенны находится как сумма независимых шумов, рассеянных элементарными площадками ΔS :

$$p_0(t) = \sum_{k=1}^S p_w(t) \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} \frac{\sqrt{m_s \Delta S_k}}{H_s H_0}, \quad (8)$$

Напряжение на выходе i -го элемента антенны:

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^S p_w(t - \tau_i) h_i R_s(\varphi, \Theta) \gamma \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} \frac{\sqrt{m_s \Delta S_k}}{H_s H_0}. \quad (9)$$

Ввиду широкого и сплошного спектра излучения доплеровские искажения не учитываются, и напряжение на выходе канала антенны L равно:

$$U(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{L_a} h_i} \sum_{i=1}^{L_a} \sum_{k=1}^S p_w(t - \tau_i) h_i R_s(\varphi_s, \Theta_s) \gamma \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} \frac{\sqrt{m_s \Delta S_k}}{H_s H_0}. \quad (10)$$

2. Модель гидроакустического комплекса носителя

В качестве антенны ГАК носителя в модели принята полуволновая многоэлементная

сферическая антенная решётка (АР) с шириной рабочей полосы 50% от рабочей частоты f_p . [7].

Сигналы от ПЦ и нескольких ТПА и ОС, моделируемые в виде плоской волны, затухающей с расстоянием и рассеивающейся на неоднородностях среды, суммируются на приёмных элементах антенны. Затем через коэффициент акустико-электрической трансформации пьезоэлемента преобразуются в электрический сигнал и поступают на АЦП и алгоритмы обработки гидроакустической информации. Существующие и используемые на данный момент в ГАК алгоритмы обработки предполагают два подхода:

- **энергетический**, состоящий в обеспечении максимума энергии полезного сигнала на выходе АР, фильтрации и суммировании сигналов с элементов антенны для формирования предындикаторной функции обнаружителя, которую сравнивают с пороговым отношением сигнал/помеха (ОСП), превышение которого является фактом обнаружения полезного сигнала. После этого производится оценка пеленга [8], представляющая собой значение угла, отвечающее максимальному значению отклика указанной антенной системы.
- **статистический**, основанный на методах сверхразрешения, использующих обращение матрицы корреляции входных сигналов и помех на элементах АР и цифровое сканирование опорным вектором углового сектора, содержащего источники излучения, для формирования пеленгационного рельефа (аналог предындикаторной функции), являющегося угловым энергетическим спектром сигнала, по которому уже происходит обнаружение и оценка пеленга.

Статистический подход основан на оптимальном по ОСП на выходе пространственного фильтра алгоритме Кейпона, выходной эффект которого рассчитывается следующим образом:

где $\hat{R}$ – усреднённая по ансамблю реализаций корреляционная матрица смеси сигнала и помехи (является эрмитовой, при гауссовой статистике входных сигналов содержит всю имеющуюся в приёмной АР информацию о входных сигналах [9]); V_c – сканирующий вектор, изменяя который можно выделить направление прихода сигнала, $*$ – знак комплексного сопряжения и транспонирования; λ_m , λ , $\hat{U}_m$, $\hat{U}_i$ – собственные числа и вектора матрицы $\hat{R}$; L – число элементов АР; M_1 – число старших собственных чисел λ_m матрицы $\hat{R}$.

Сканирующий вектор зависит от геометрии АР, изменяется в направлении угла α от -90° до 90° в горизонтальной плоскости, и вычисляется как:

$$V_c^T = [e^{j2\pi f \tau_1} \dots e^{j2\pi f \tau_i} \dots e^{j2\pi f \tau_L}] \quad (11)$$

где f – частота сигнала; τ_i – временная задержка прихода сигнала на элемент антенны; $i = 1 \dots L$ – номер элемента АР; L – общее число элементов АР. Таким образом, сканирующий

вектор является набором фазовых задержек сигнала для каждого элемента антенны, подобранных для фазирования всей антенны в заданное пространственное направление.

При совпадении V_c с направлением сигнала (V_{sign}) значение на выходе обнаружителя будет максимальным.

Преимущество энергетического подхода состоит в том, что он функционирует одинаково хорошо при большом и малом ОСП. Недостатком же, по сравнению со статистическим подходом, является довольно широкий основной лепесток ХН, что вкупе с высоким уровнем бокового поля не позволяет обнаруживать ПЦ при её малом угловом разнесении с ТПА и ОС.

Отличием методов сверхразрешения является возможность значительно уменьшить угловое разнесение между ПЦ и ТПА, а также гораздо раньше возобновить и дольше поддерживать гидроакустический (г/а) контакт с ПЦ при приближении к ней ТПА. Однако имеется и недостаток, заключающийся в зависимости разрешающей способности алгоритма от ОСП. При малом ОСП разрешающая способность алгоритма оказывается сопоставимой с энергетическими алгоритмами.

В модели реализованы оба подхода. Таким образом, на выходе системы обнаружения и обработки информации строится пеленгационный рельеф (рисунок 4), на котором с направлений шумящих объектов (например, ПЦ и два ТПА) видны характерные всплески, соответствующие их пеленгам (ПЦ, T1 – ТПА1, T2 – ТПА2).

3. Модель автоматизированной информационно-управляющей системы носителя

АИУС является сложной многофункциональной системой, отвечающей за самые разнообразные операции и позволяющей решать большое количество задач. Функциональные возможности АИУС в модели ограничены задачами уточнения координат и параметров движения объектов, обнаруженных ГАК, и выработки курса для каждого ТПА на всех участках их движения.

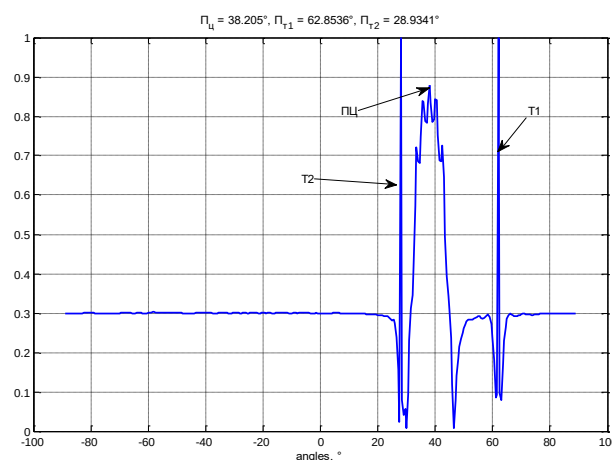


Рис. 5 Пеленгационный рельеф с тремя характерными всплесками с направлений ПЦ и ТПА

Для определения пеленга на обнаруженные объекты необходим анализ пеленгационного рельефа, являющегося выходом модели ГАК носителя. Поскольку пеленги на ТПА можно получить числением [10], то задача упрощается до определения пеленга лишь на ПЦ.

Решение этой задачи в модели выполнено специальными функциональными средствами MATLAB – фильтрацией БИХ-фильтром нижних частот 3 порядка и функцией нахождения локальных максимумов. На пеленгационном рельефе эти максимумы являются максимумами всплесков, а максимумы, превышающие некоторый динамически устанавливаемый порог μ – пеленгами обнаруженных ГАК объектов (рисунок 5). За счёт фильтрации производится и выделение малозумного объекта (цели) на фоне сильно шумящих (ТПА). Поэтому отклики от ТПА значительно уменьшились по сравнению с их уровнем до фильтрации.

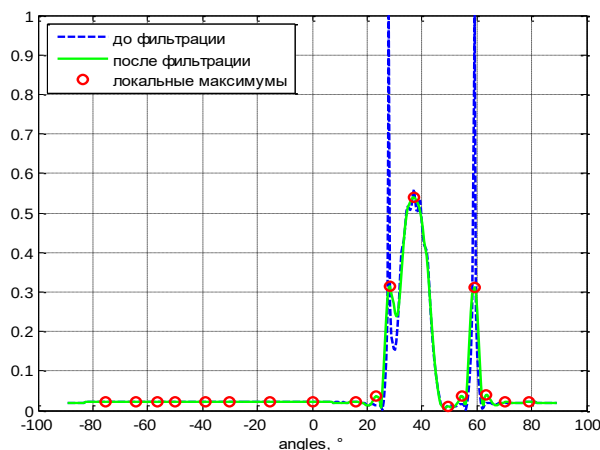


Рис. 6. Пеленгационный рельеф до и после фильтрации с найденными локальными максимумами

Результатом работы функции нахождения максимумов является массив Π , состоящий из $x_{\max}$ значений найденных локальных максимумов, превышающих порог μ . Из этого массива необходимо выделить значения пеленгов на каждый ТПА и на ПЦ по специальному алгоритму, представленному на рисунке 6.

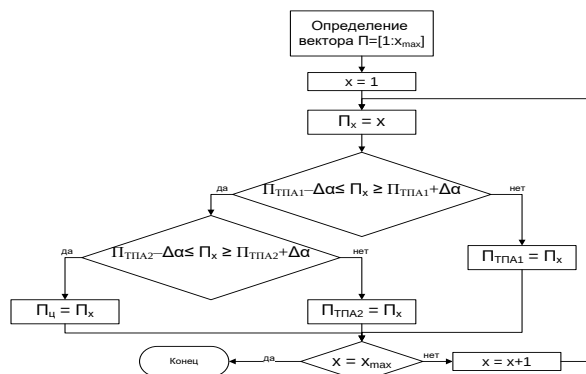


Рис. 7. Алгоритм определения пеленга ПЦ на пеленгационном рельефе

Согласно алгоритму из вектора локальных максимумов пеленгационного рельефа Π поочередно берутся значения x , которые сравниваются с интервалом, центром которого является текущий пеленг на каждый ТПА, а шириной – раствор ХН антенны ГАК носителя $\Delta\alpha$. В случае попадания значения x в этот интервал, оно принимается за пеленг ТПА ($\Pi_{ТПА1}$ и/или $\Pi_{ТПА2}$) и отбрасывается. В альтернативном случае значение x принимается за пеленг ПЦ ($\Pi_{ц}$). В случае не обнаружения пеленга цели в расчёт принимается пеленг ПЦ, обнаруженный на предыдущем цикле.

Различные методы ТН требуют знания разных исходных и текущих данных об объектах управления и слежения. Одним необходимо знать только пеленг на цель и на объект управления (ТПА), другим (например, для метода виртуальных координат (МВК) [11]), кроме пеленга, требуется знать текущую дистанцию до ПЦ. В модели её определение возможно двумя методами:

- в пассивном режиме с помощью графо-аналитических методов, в том числе методом триангуляции [12]. При этом ошибка определения дистанции до цели составит не менее 20% от реальной дистанции, изменяющейся в интервале от 10 до 15 км [13, 14];
- в активно-пассивном режиме с помощью модификации суммарно-дальномерно-пеленгационного способа. Ошибка определения дистанции в этом случае не будет превышать 5% на том же интервале дистанций до цели.

Модель выработки курса ТПА выполняет задачу расчёта начального и текущего курса движения ТПА в зависимости от применяемого метода теленавещения – метода совмещения с отведением (МСО) [15], метода совмещения с упреждением (МСУ) [16], метода виртуальных координат [11].

Начальный курс ТПА вырабатывается специальным алгоритмом и совпадает с углом отведения ТПА от пеленга ПЦ, что необходимо для минимизации времени восстановления контакта ГАК носителя с целью, потерянного после пуска ТПА ввиду экранирования сигнала от цели шумами движителей ТПА.

Текущий курс ТПА рассчитывается на основе определённых в блоке АИУС пеленгов на ПЦ и ТПА в соответствии с выбранными методами теленавещения [11, 15, 16] как для варианта одиночного применения ТПА, так и для группы ТПА.

5. Модель системы телеуправления

В модели системы телеуправления заложен алгоритм выбора ведущего ТПА, поскольку предполагается их действие в групповом варианте, например в формате стаи. Суть выбора заключается в величине углового разнесения ТПА с целью после восстановления г/а контакта ГАК носителя с целью. На выход блока СТУ выдаётся курс для каждого ТПА, рассчитанный АИУС в соответствии с выбранным методом ТН. Линия связи между носителем и ТПА моделируется в виде временной задержки, имитирующей прохождение сигнала с набором команд и заданным курсом на ТПА.

6. Модель движения объектов

После вычисления курсов для каждого ТПА они передаются в блок моделирования движения, где в соответствии с принятыми допущениями об отсутствии учёта динамики движения объектов (носителя, ТПА, ОС), производятся вычисления координат всех объектов и вывод на экран.

6.1. Модель движения носителя

В модели движение носителя представляется равномерным и прямолинейным, как до пуска ТПА, так и после него, ввиду наличия ограничений, связанных с целостностью линии связи между носителем и ТПА. Модель движения носителя описывается следующими выражениями:

$$\begin{cases} X_{H(i)} = X_{H(i-1)} + S_{H(i)} \cdot \sin(\psi_H) \\ Y_{H(i)} = Y_{H(i-1)} - S_{H(i)} \cdot \cos(\psi_H) \end{cases}, \quad (12)$$

где $S_{H(i)} = \begin{cases} t_{d1} \cdot V_H, & \text{если } i = 1 \\ \Delta t \cdot V_H, & \text{если } i > 1 \end{cases}$ – дистанция,

проходимая носителем за один шаг моделирования; V_H – скорость носителя; t_{d1} – период отсутствия г/а контакта ГАК носителя с ПЦ; Δt – шаг моделирования; ψ_H – курс носителя.

6.2. Модель движения цели

Движение ПЦ в модели может задаваться как равномерным прямолинейным, так и с учётом динамики маневрирования (т.е. с ускорением и циркуляциями). Начальное положение ПЦ определяется как

$$\begin{cases} X_{C(0)} = X_{H(0)} + D_{(0)} \cdot \sin(\psi_H + \Pi_{C(0)}) \\ Y_{C(0)} = Y_{H(0)} - D_{(0)} \cdot \cos(\psi_H + \Pi_{C(0)}) \end{cases}, \quad (13)$$

где $X_{H(0)}$; $X_{C(0)}$ и $Y_{H(0)}$; $Y_{C(0)}$ – начальные координаты носителя и цели в момент выстрела; $D_{(0)}$, $\Pi_{C(0)}$ – начальная дистанция и пеленг на ПЦ в момент её обнаружения; ψ_H – курс носителя.

Текущие координаты ПЦ можно определить как:

$$\begin{cases} X_{C(i)} = X_{C(i-1)} + S_C \cdot \sin(\psi_{C(i)}) \\ Y_{C(i)} = Y_{C(i-1)} + S_C \cdot \cos(\psi_{C(i)}) \end{cases}, \quad (14)$$

где $S_C = \begin{cases} V_{C_тек} \cdot dt + \frac{a \cdot dt^2}{2}, & \text{при ускорении } a \\ V_{C_тек} \cdot dt, & \text{при равномерном движении} \end{cases}$ –

путь, пройденный ПЦ за шаг dt ; $V_{C_тек}$ – текущая скорость движения ПЦ;

$\psi_{C(i)} = \begin{cases} \psi_{C(i-1)} + \varphi, & \text{на циркуляции} \\ \psi_{C(i-1)}, & \text{на прямом ходу} \end{cases}$ – текущий курс

ПЦ; $\varphi = S_C / R_{цирк}$ – угол поворота ПЦ за один шаг dt .

Кроме координат ПЦ зачастую необходимо знание и её параметров движения, которые определяются выражениями:

$$q_{C(i)} = |\psi_H + \Pi_{C(i)} - \pi - \psi_{C(i)}|, \quad (15)$$

$$q_{C_0(i)} = 2\pi - \psi_H - \Pi_{C(0)} + \arctan\left(\frac{X_{C(0)} - X_{C(i)}}{Y_{C(0)} - Y_{C(i)}}\right), \quad (17)$$

$$\Pi_{C_учм(i)} = 2\pi - \arctan\left(\frac{X_{C(i)} - X_{H(i)}}{Y_{C(i)} - Y_{H(i)}}\right), \quad (16)$$

$$\Pi_{C(i)} = \Pi_{C_учм(i)} - \psi_H, \quad (17)$$

$$D_{(i)} = \frac{|Y_{H(i)} - Y_{C(i)}|}{\cos(\Pi_{C_учм(i)})}, \quad (18)$$

где $q_{C(i)}$ и $q_{C_0(i)}$ – текущий и начальный курсовой угол цели; $\Pi_{C_учм(i)}$ – пеленг на цель в круговой системе; $\Pi_{C(i)}$ – пеленг на цель относительно носителя (за 0° принимается курс носителя ψ_H); $D_{(i)}$ – дистанция от носителя до цели.

6.3 Модель движения подводных аппаратов

Движение ТПА в модели принято равномерным прямолинейным, в соответствии с рассчитываемым на каждом шаге моделирования, курсом. Координаты ТПА записываются выражением:

$$\begin{cases} X_{ТПА(i)} = X_{ТПА(i-1)} + S_{ТПА(i)} \cdot \sin(\psi) \\ Y_{ТПА(i)} = Y_{ТПА(i-1)} + S_{ТПА(i)} \cdot \cos(\psi) \end{cases}, \quad (19)$$

где $X_{ТПА(0)} = 0$ и $Y_{ТПА(0)} = 0$ – координаты ТПА в момент пуска; $S_{ТПА(i)} = \begin{cases} t_{d1} \cdot V_{ТПА}, & \text{если } i = 1 \\ \Delta t \cdot V_{ТПА}, & \text{если } i > 1 \end{cases}$ – дистанция, проходимая ТПА за шаг dt ; $V_{ТПА}$ – скорость ТПА; ψ – курс ТПА, рассчитываемый в модели АИУС на каждом шаге моделирования dt .

6.4. Модель движения объекта слежения

Движение объекта слежения в модели принято равномерным прямолинейным, дрейфующим. Координаты ОС описываются выражением:

$$\begin{cases} X_{ОС(i)} = X_{C_е} + S_{ОС(i)} \cdot \sin(\psi_{ОС}) \\ Y_{ОС(i)} = Y_{C_е} + S_{ОС(i)} \cdot \cos(\psi_{ОС}) \end{cases}, \quad (20)$$

где $X_{C_е}$, $Y_{C_е}$ – координаты ПЦ в момент пуска ОС; $S_{ОС(i)} = \Delta t \cdot V_{ОС}$ – дистанция, проходимая ОС за один шаг моделирования Δt ; $V_{ОС}$ – скорость ОС; $\psi_{ОС}$ – курс дрейфа ОС.

7. Вывод результатов на экран

Результаты моделирования представляются в виде траекторий движения объектов (рисунок 7а), обновляющихся на каждом шаге моделирования пеленгационных рельефов (рисунок 7б) и трассового планшета (рисунок 8), являющегося представлением пеленгационных рельефов в зависимости от времени.

Достоверность модели определяется тем, что она основана на типовых общеизвестных принципах и характеристиках полей сигналов и

помех [6, 17], а также в ней используется общепринятый математический аппарат [1, 5, 8, 9, 14]. Кроме того, результаты моделирования на данной модели (рисунок 8) сходятся с результатами, полученными на имитаторе ГАК (рисунок 9) при выполнении исследования [18], проведённого специалистами АО «Концерн «Океанприбор» и АО «Концерн «МПО-Гидроприбор».

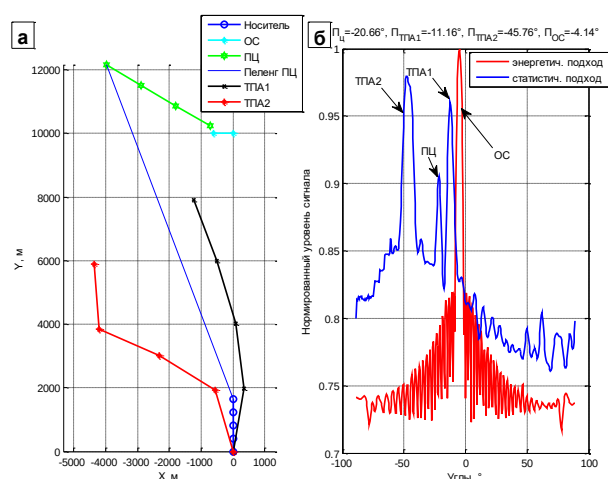


Рис. 8. Результаты моделирования:
а) Траектории движения объектов;
б) Пеленгационный рельеф

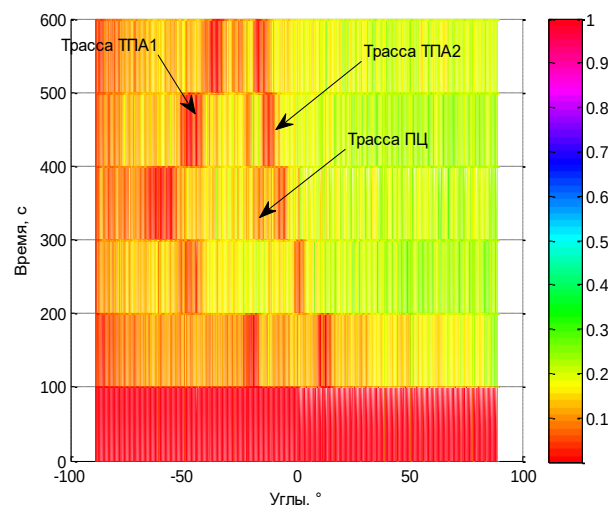


Рис. 9. Трассовый планшет с трассами ТПА1, ТПА2 и ПЦ

Заключение

В результате данной работы была создана и описана имитационная модель, позволяющая проводить оперативное имитационное моделирование процессов теленаведения одного и нескольких подводных аппаратов. Учёт структуры и особенностей стохастического формирования и распространения гидроакустических полей объектов и помех различной природы, их обработка различными алгоритмами, визуализация результатов моделирования в виде трассового планшета и пеленгационного рельефа является особенностью данной модели.

Кроме того, наличие обратной связи между моделью движения объектов и формирования сигналов от них, делает имитационную модель замкнутой. А использование в качестве опорной информации справочных параметров и соответствие результатов отдельных помеховых ситуаций с имитатором ГАК приближает результаты моделирования к натурному эксперименту.

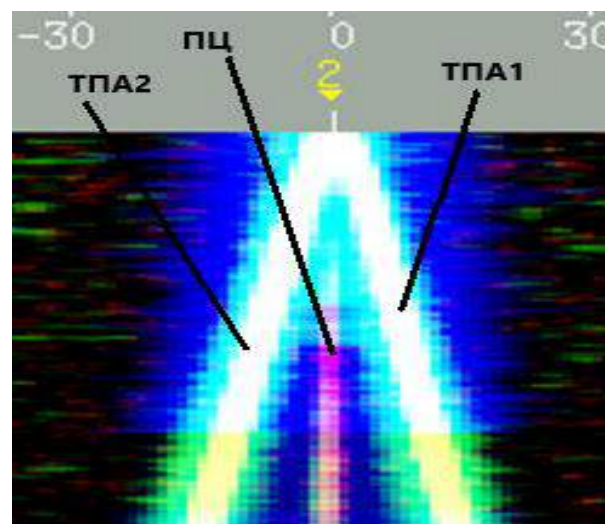


Рис. 10. Фрагмент рекордограммы имитатора ГАК

Литература

1. Борисенко К.П., Митько В.Б. Автоматические системы и технические средства корабельных комплексов. Гидроакустические комплексы надводных кораблей. СПб.: СПбГМТУ. 2012. 236 с.
2. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л., «Судостроение». 1976
3. Вадов Р.А. Затухание низкочастотного звука в океане // Проблемы акустики океана. М.: Наука. 1982. с. 31-34
4. Белов Б.П., Миронов И.В., Семёнов Н.Н. Цифровое формирование направленности гидроакустической антенны во временной области // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – №4(1) – с.32-47.
5. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 190 с.
6. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометиздат. 1982. 264 с.
7. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука. 2004. 410 с.
8. Куликов Е. И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Советское радио. 1978. 296 с.
9. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках М: Радио и связь, 2003. 200 с.
10. Отчёт о ОКР «Штурвал-2-ОКО-Т». ФГУП ЦНИИ «Гидроприбор». СПб., 2004. 150 с.
11. Способ телеуправляемого наведения подводного аппарата. Заявка на патент №2018139771 от 09.11.2018

12. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчёты в гидроакустике. Л.: Судостроение. 1988. 288 с.
13. Шафранюк Ю.В. Алгоритмы пассивного определения дистанции до целей, обнаруженных ГАС с ГПБА // Труды XVII Конференции молодых учёных «Навигация и управление движением». 2015. с.116-122
14. Соколов В.С., Шилин М.М. Пассивный акустический определитель дистанции // Труды XXXVI отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов «МПО-МС-2017». 2018. с. 125-130.
15. Любан И.Б., Черкас Я.А. Аналитический обзор методов телеуправления и рекомендации по их применению при наведении торпед // Подводное морское оружие. 2004. Вып. 3. с. 41-49
16. Патент RU2631227 Способ наведения торпеды, управляемой по проводам. Приоритет от 01.06.16.
17. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики / пер. с англ.—Л.: Судостроение. 1978. 448 с.
18. Отчёт о 3 этапе НИР «Ерш». ОАО «Концерн «МПО-Гидроприбор»; СПб., 2014. 82 с.

References

1. Borisenko K.P., Mit'ko V.B. Avtomaticheskie sistemy i tekhnicheskie sredstva korabel'nykh kompleksov. Gidroakusticheskie komplekсы nadvodnykh korabley. SPb.: SPbGMTU. 2012. 236 p.
2. Matvienko V.N., Tarasyuk Yu.F. Dal'nost' deystviya gidroakusticheskikh sredstv. L., «Sudostroenie». 1976
3. Vadov R.A. Zatkhanie nizkочастотного звука v okeane. *Problemy akustiki okeana*. M.: Nauka. 1982. p. 31-34
4. Belov B.P., Mironov I.V., Semenov N.N. Tsifrovое formirovaniye napravlenosti gidroakusticheskoy anteny vo vremennoy oblasti. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2011. №4(1) p.32-47.
5. Andreeva I.B. Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane. L.: Gidrometeoizdat. 1975. 190 p.
6. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P., Teoreticheskie osnovy akustiki okeana. L.: Gidrometizdat. 1982. 264 p.
7. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika: sostoyaniye i aktual'nye problemy. SPb.: Nauka. 2004. 410 p.
8. Kulikov E. I., Trifonov A.P. Otsenka parametrov signalov na fone pomekh. M.: Sovetskoe radio. 1978. 296 p.
9. Ratynskiy M.V. Adaptatsiya i sverkhrazresheniye v antennoykh reshetkakh M: Radio i svyaz', 2003. 200 p.
10. Otchet o OKR «Shturval-2-OKO-T». FGUP TsNII «Gidropribor». SPb., 2004. 150 p.
11. Sposob teleupravlyаемого navedeniya podvodnogo apparata. Zayavka na patent №2018139771 ot 09.11.2018
12. Evtyutov A.P., Mit'ko V.B. Inzhenernye raschety v gidroakustike. L.: Sudostroenie. 1988. 288 p.
13. Shafranyuk Yu.V. Algoritmy passivnogo opredeleniya distantsii do tseley, obnaruzhennykh GAS s GPBA. *Trudy XVII Konferentsii molodykh uchenykh «Navigatsiya i upravleniye dvizheniem»*. 2015. p.116-122
14. Sokolov V.S., Shilin M.M. Passivnyy akusticheskiy opredelitel' distantsii. *Trudy XXXVI otraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov «MPO-MS-2017»*. 2018. p. 125-130.
15. Lyuban I.B., Cherkas Ya.A. Analiticheskiy obzor metodov teleupravleniya i rekomendatsii po ikh primeneniyu pri navedenii torped. *Podvodnoye morskoye oruzhie*. 2004. Vyp. 3. p. 41-49
16. Patent RU2631227 Sposob navedeniya torpedy, upravlyаемoy po provodam. Prioritet ot 01.06.16.
17. Urik R.Dzh. Osnovy gidroakustiki / per. s angl.—L.: Sudostroenie. 1978. 448 p.
18. Otchet o 3 etape NIR «Ersh». ОАО «Kontsern «MPO-Gidropribor»; SPb., 2014. 82 p.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 338.242

ЧЕМ ВЫМОЩЕН ПУТЬ К КРИЗИСУ?**Волостных Вадим Викторович**

доктор экономических наук, профессор кафедры управления судостроительным производством
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

Иванкович Анна Вадимовна

кандидат экономических наук, заместитель начальника финансового отдела АО «Адмиралтейские верфи»
190121, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 203
e-mail: annaviv@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена выявлению и анализу некоторых особенностей развития системы управления промышленным производством в СССР/РФ, порожденных факторами противостояния двух различных социально-экономических систем. Основное внимание уделяется периоду перехода его в фазу обострения гибридной информационно-методологической войны в области экономики, организации и управления промышленностью в СССР. В этот период глобальная наднациональная финансово-экономическая власть провела две генеральных операции по ослаблению и разрушению СССР с целью интеграции его в систему периферийного капитализма в статусе сырьевого придатка.

Первая операция – «хозяйственная реформа» проходила в 1965-1980 гг., имея целью скрытого уничтожения экономического строя великой державы незаметно для ее населения под видом заурядной корректуры плановых процедур. При этом сохранялся организаторский каркас планового управления. Бенефициаром реформы выступал верхний слой управленческой элиты. Эта операция, не разрушив формальной структуры управления, существенно замедлила темп развития страны и создала предпосылки для старта второй операции – «перестройки» 1985-2000 гг., имевшей целью переход к либерально-рыночной модели управления. Прослеживается и анализируется путь формирования и освоения трех базовых постулатов - разгосударствления экономики, формирования идеологической оболочки и понятийного аппарата для процесса деструкции промышленности и заимствование (имитация) либерально-рыночных институциональных норм. Результатом второй операции стал распад государства, деиндустриализация, ослабление экономического суверенитета.

Анализируются последствия внедрения расхожих либеральных догм – эффективный собственник, рынок, конкуренция. На основе оценки результатов операций делается вывод о полезности государственного управления реальным сектором экономики как предпосылки успехов в будущем.

Ключевые слова: инструментарий, отрасль, результат производства, рефлексия, сопоставление результатов, стратегический анализ, судостроение.

BY WHAT MEANS WAY TO CRISIS IS PAVED?**Vadim V. Volostnykh**

Dr.Sci.(Economics), Professor of the Department of Shipbuilding Management
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

Anna V. Ivankovich

PhD in Economic Sciences, Deputy Head of Finance Department of the Admiralty Shipyards JSC
190121, St. Petersburg, nab. Fontanka River, 203
e-mail: annaviv@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to identification and analysis of some features of development of the industrial production management system in the USSR / RF, generated by the confrontation factors of two different socio-economic systems. The main attention is paid to the period of its transition to a phase of exacerbation of hybrid information and methodological war in a field of economics, organization and management of industry in the USSR. During this period, the global supranational financial and economic power carried out two general operations to weaken and destroy the USSR in order to integrate it into the system of peripheral capitalism in the status of a raw materials appendage.

The first operation, "economic reform," took place in 1965-1980, with the goal of latent destroying the economic system of a great power unnoticed by its population under the guise of an ordinary correction of planned procedures. At the same time, the organizational framework of planned management was preserved. The beneficiary of the reform was the upper level of the managerial elite. This operation,

without destroying the formal management structure, significantly slowed down the pace of development of the country and created the prerequisites for the start of the second operation - the "perestroika" of 1985-2000, which aimed at the transition to a liberal-market management model. The path of formation and development of three basic postulates is tracked and analyzed - denationalization of the economy, the formation of an ideological environment and conceptual apparatus for the process of industrial destruction and adoption (imitation) of liberal market institutional norms. The result of the second operation was the collapse of the state, de-industrialization, weakening of economic sovereignty.

The consequences of introduction of conventional liberal dogmas are analyzed - the effective owner, market, competition. Based on the assessment of operation results, a conclusion is drawn on the usefulness of public administration of the real sector of economy as a prerequisite for future success.

Key words: instrument, industry, production result, self-reflection, comparison of results, strategic analysis, shipbuilding.

Введение

Выполненный в предыдущей статье рефлексивный анализ динамики отечественного судостроения доказывает чрезвычайную успешность уникального проекта - формирования и развития промышленности СССР на базе новаторской концепции «физической экономики». Это свершение не могло не вызвать активной конфронтации со стороны геополитических противников СССР. Борьба принимала различные формы - вооруженные столкновения, экономические санкции, политическое, дипломатическое и экономическое давление, однако централизованная, плановая и, что немаловажно, автаркическая экономика СССР успешно преодолела и трудности индустриализации, и Великую Отечественную войну, и восстановительный период, и гонку ядерных вооружений. На надежно прикрытом мощью государства судостроении внешнее давление сказывалось лишь косвенно, через ряд потребностей, которые требовалось удовлетворять. Отрасль успешно справлялась с этим благодаря своему мобилизационному потенциалу, демонстрируя вплоть до 1970-х годов постоянный повышательный тренд. Постепенно нарастающие внутренние негативные факторы (преимущественно организационно-управленческого характера) не тормозили положительной динамики. С достижением военного паритета обозначилась бесперспективность попыток сокрушить мощь советской индустрии принятыми ранее методами, и тогда противники внесли радикальные изменения в доктрину гибридной войны.

К руководству ею вместо национальных государств (которые возможно либо победить, либо прийти к соглашению с ними) пришла неуловимая, неструктурированная, не имеющая видимой иерархии и являющаяся, по сути, нейросетью надгосударственная мировая (глобальная) власть, цели и задачи которой не согласуются с нашими.

Фронт столкновения чрезвычайно расширился. На одном его фланге - традиционные военные угрозы, экономические санкции, дипломатические интриги, направленные против государства.

В целом, чтобы добиться от него каких-либо уступок, на противоположном - «молекулярное» преобразование национального менталитета и сознания отдельно взятого человека на базе информатизации, социальных технологий и

психотехники, подавление воли и внушение каждой группе людей специально разработанной матрицы.

Наиболее опасными для отраслевого уровня управления и отраслевой науки в частности считаем действия, преследующие цель разрушения базовой концепции управления, в данном случае - «физической экономики».

Этот подход характеризуется «принципом Бжезинского» - инициация действий «против России, на руинах России, за счёт России».

Самыми важными и, увы, успешными мегаоперациями противников на экономическом фронте гибридной войны стали хозяйственная реформа 1965-1980 гг. и перестройка конца 1985-1991 гг. Целями их было разрушить систему управления, основанную на принципах «физической экономики», предотвратить ее возможную регенерацию в будущем, а заодно нанести максимальный ущерб текущему производству.

Подготовка операций гибридной войны выполнена безупречно в части адекватного восприятия действительности и корректности философии, использованной для ее оценки. Приходится признать глубину и тщательность исследования ситуаций и оптимальный выбор даты начала и продолжительности проведения каждой из них, метода и объекта воздействия.

Замысел хозяйственной реформы основан на том, что к середине 1960-х гг. в стандартном для русской модели управления колебательном процессе созрели объективные тенденции и условия для фазового перехода от нестабильного мобилизационного периода к стабильности. Организаторы операции выбрали оптимальный формат замкнутого «кабинетного путча», который предстояло провести, не беспокоя широкие массы населения. Общеизвестно, что любая реформа, проводимая сверху, всегда имеет целью укрепление власти и влияния самих реформаторов. Традиционно приняв публичный контекст провозглашаемых деклараций — развитие экономики, рост благосостояния трудящихся, укрепление социализма и т.д., реальные авторы и бенефициары операции не огласили подлинной цели даже в узком кругу заинтересованных лиц. Этот слой еще предстояло сформировать посредством второго уровня дезинформации, усложнив реформу до трёхходовой схемы.

Предстояло создать у руководящего слоя управленческого аппарата (экономический блок, промышленные отрасли и т.д.), классифицировавшегося тогда как

«номенклатура», устойчивое представление о том, что реформа затевается исключительно ради их кастовых и ведомственных интересов. Поэтому заинтересованная в успехе операции движущая сила была ограничена верхним уровнем руководства экономического блока.

Так называемая номенклатура больше всего претерпела от мобилизационных авральных перегрузок, бремени ответственности и страха наказания, сильнее всех стремилась к стабильности и безопасности застоя. Что касается главы правительства А. Н. Косыгина, то лично у него сквозило ощущение, что в случае реинкарнации отраслевого управления после десятилетнего разрыва традиции попросту не удастся воссоздать достаточно компетентный аппарат управления усложнившимся хозяйством. Следовательно, прикрывающая версия операции (содержащая искаженное восприятие действительности и использующая ошибочную философию) должна ориентироваться именно на номенклатуру и отвечать следующим требованиям:

- представлять прикрываемую операцию, как реформу, то есть "преобразования в интересах властвующей элиты для укрепления её положения";
- не затрагивать основ существующего строя, декларируя его развития и совершенствования;
- табуировать любые изменения структуры и функций управления, сохранять ритуалы, обычаи, идеологию мобилизационного управления;
- подчёркивать значимость политэкономии социализма как теоретической и методологической базы развития;
- отрицают любые альтернативные подходы к развитию системы управления промышленности.

Под таким прикрытием реформаторам удалось с минимальной гласностью проделать первое действие: подменить принцип максимального удовлетворения потребностей общества понятиями и мерками другого экономического организма: объём продукции в действующих ценах, прибыль, рентабельность... Экономический строй великой державы был уничтожен незаметно для её населения под видом заурядной корректуры планово – учётной процедуры.

По Бжезинскому инициаторами благих намерений, ведущих к кризисам и катастрофам должны выступать российские структуры управления, научные центры и отдельные «корифеи науки», служить эталонами – "цивилизованные страны", быть критериями – "общечеловеческие ценности" (преимущественно финансового характера) и т.д.

На роль пророка реформы был избран скромный профессор статистики харьковского университета

Е. Г. Либерман, а на значимость священного писания претендовали две его газетные и две журнальные статьи, которыми, в сущности, и ограничивается творческое наследие этого ученого. Для пропаганды реформы Е. Г. Либерман сформировал "популярную" версию доктрины,

предсказывающей желанные результаты. В качестве таковой декларируются:

- повышение научного уровня руководства экономикой, основанного на законах политэкономии социализма;
- расширение хозяйственной самостоятельности предприятий, получивших право самим определять номенклатуру и ассортимент продукции, формировать фонды развития материального поощрения и др.;
- объективность и достоверность показателей объёма продукции в действующих ценах, прибыли и рентабельности;
- решающая роль материальных стимулов как движущей силы социально – экономического развития;
- и, пожалуй, самое привлекательное, – когда предприятия от производства кораблей перейдут к производству показателей, аппарат управления легко преодолеет проблемы усложнения и разнообразия продукции, будет работать в спокойном ненапряженном режиме.

Все новации предполагалось осуществить, не затрагивая организационно методического каркаса планового управления. Сам примитивизм изложения и отсутствие аргументации были рассчитаны на убеждение некомпетентного читателя документа.

Основным лоббистом реформы выступал политэконом академик А.М. Румянцев. Поскольку марксистская политэкономия - наука сугубо описательная, исходящая из того, что предприятие производит некий продукт, не имеющий вкуса, цвета и запаха, свойства которого полностью описываются малым числом экономических показателей, он игнорировал категории кооперации, балансов, двухконтурную систему внутреннего денежного обращения, превалирование натуральных показателей над стоимостными и т.д. Реформаторами даже не затрагивался вопрос: кто и как будет определять и устанавливать оптовые цены на продукцию.

Естественно, концепция "реформы" встретила одобрение в США [3]. Восторженная статья в журнале Time, создавшая Е.Г. Либерману мировую известность, появилась за полгода до заявления А.М. Косыгина о реформе на пленуме ЦК КПСС. Одновременно премьер подавил попытку группы ученых ЦЭМИ (В.М. Глушкова, Н.П. Федоренко, С.С. Шаталина, Г.А. Арбатова) предложить в качестве альтернативы реформе конструктивную экономическую модель "физической экономики", систему СОФЭ – оптимального функционирования экономики, долженствовавшую полностью вытеснить товарное производство. Оппонировали этому предложению все основные заинтересованные реформы: Совет Министров, Госплан, Институт экономики академии наук СССР.

Расчёты американских кураторов Е. Г. Либермана полностью оправдались. В период реформы сложилась антисистемное начало триады: заказчик (ВМФ) – производитель (Минсудпром) и планирующий орган (Госплан), вызвавшее неудержимый рост цен. Например, в судостроении цена последнего корабля проекта 1134А (1994г.) по сравнению с первым кораблём проекта 58 (1962г.)

в 9,1 раз, при близких конструктивных особенностях кораблей (корпуса, силовой установки, завода-строителя). Даже в стоимостных (виртуализированных) измерениях в целом по промышленности наблюдается устойчивый понижающий тренд как результат реформы.

Таблица 1

Среднегодовые темпы прироста факторов экономического роста, %.

Наименование	1961-1965 гг.	1966-1970 гг.	1971-1975 гг.	1976-1980 гг.
Национальный доход, %	6,5	7,7	5,7	4,4
Производительность общественного труда, %	5,6	6,8	4,6	3,3
Фондоотдача	0,86	0,98	0,87	0,89
Валовый общественный продукт	6,5	7,4	6,4	4,4

Ещё более впечатляющим был непосредственный ущерб, нанесённый реформой судостроители промышленности – отрасли, накопивший наиболее весомый научный задел по системе СОФЭ.

Характерно, что именно в судостроительной промышленности, где в идеологии СОФЭ был разработан эффективный механизм управления трудоёмкостью продукции и накоплена достоверная нормативная база, этот инструментарий получил противоестественное применение: при утверждении проектов кораблей их трудоёмкость сильно занижалась, чтобы провести через ограниченные производственные мощности максимум затрат на транзитные ресурсы. В результате, в 1966 – 1970 гг. объём производства вырос (даже в натуральном выражении) в 1,005 раз при росте национального дохода по стране в 1,45 раза). В дальнейшем рост стоимостных измерителей происходил уже при снижении реального выпуска продукции (635 тыс. cgt/ecgt в 1980 г. против 1100 тыс. cgt/ecgt в 1965г.

Дегradировал экономический блок государственного управления, прошедший точку невозврата и неспособный вернуться к полноценной плановой модели. Убедительно продемонстрировала научную неадекватность официальная политэкономия социализма, никак не связанная с индустриальными реалиями и сводящаяся к манипуляциям марксистскими догмами в некоей вымышленной среде. Именно из политэкономов сложилось ядро радикально сменивших свою ориентацию либералов, генерировавших уже мифологию чудотворного капитализма образца 1850 г. Реальным же специалистам отраслевого уровня в 1970-х гг. была навязана бессмысленная дискуссия о показателях – валовая, чистая, нормативно чистая продукция, блокировавшая их доступ к поиску реальных путей реализации физической экономики.

Итак, благое намерение поправить дело путём нехитрой хозяйственной реформы потерпело закономерное фиаско, нанеся хотя и серьёзный, но пока ещё не катастрофический ущерб. Уже в 1970 г. Е.Г. Либерман исчез из поля зрения научной

общественности, а в 1980 г. А.Н. Косыгин покинул пост премьера. Но роковые последствия реформы сработали позже. Казалось бы, сама действительность убедительно опровергла уродливые новации, навязанные до этого удовлетворительно действующей системе управления:

- была практически доказана невозможность строить рыночные отношения внутри плановой страны на базе принудительного централизованного ценообразования;
- обозначилась некомпетентность пореформенного правительства в управлении промышленным производством;
- проявилась несовместимость категорий прибыли и хозрасчета в целом с двухфазным денежным обращением;
- представилась нереальная перспектива инвестиций в промышленность помимо частной собственности.

Означало ли это, что первая из операций гибридной войны закончилась крахом? Отнюдь: именно выявление слабых мест реформы стало важнейшим результатом операции. Беззащитность массового сознания против изощрённых методов манипуляции позволило применить один из таких методов, реверсировать оценку, приписав дефекты, внесённые реформаторами, к имманентным свойствам исходной системы управления. Этот срыв рационального сознания послужил отправной точкой возникновения и роста центров либеральной идеологии, исповедующих буквально религиозную веру в волшебные преимущества капиталистической модели, и усматривающие главное препятствие к её торжеству в наличии всё ещё небезуспешно функционирующих элементов советской системы.

Основные усилия либералов на этом этапе были направлены на ослабление, а затем и отмену табу на критику государственного аппарата. Важным фактором пореформенной ситуации стало также разочарование номенклатуры во вынужденном ей представлении о своём будущем статусе. Руководителям ведомств и предприятий захотелось превратиться из номенклатуры в элиту, в западной трактовке этого термина – с личными наследуемыми состояниями, с независимостью от государственных структур и т.д.; постепенно рассматривалась возможность вхождения в состав мировой управляющей элиты, возможность этого воспринималась как реальная только на фоне утраты СССР статуса великой державы. В обществе постепенно складывался консенсус импортируемых представлений о воображаемой неэффективности плановой экономики и социалистического строя в целом. Их развитию способствовал крупный кризис западных экономик конца 1980-х гг. и падение цен на нефть на мировом рынке (со \$104 за баррель в 1979 г. до \$30 за баррель в 1986 г.).

Были предприняты слабые попытки затормозить деграцию экономики путём имитации некоторых элементов рынка и исправление отдельных дефектов управления в общегосударственном масштабе:

- ликвидация двухконтурности внутреннего денежного обращения;

- законодательство о кооперации;
- закон об индивидуальной трудовой деятельности;
- закон о государственном предприятии и т.д.

Однако они не принесли заметного эффекта. Управление экономикой быстро утрачивалось. Созрели условия для старта второй мегаоперации гибридной войны – перестройки (март 1985 г.), то есть перехода от ослабления СССР к уничтожению. В качестве целей перестройки уже в публичном контексте провозглашались демократизация и введение элементов рыночных отношений, а в действительности – уничтожение России силами и средствами самого государства.

Принято подразделять перестройку на этапы:

1. Ускорение (1985-1987 гг.), не оказавшие заметного влияния на темпы развития экономики;
2. Гласность (1987 г.) - решающее оружие разрушения страны - силами правительства, правящей партии и их мощнейшего идеологического аппарата народу внушалась необходимость уничтожения государства;
3. Децентрализация (1988 г.) – сепаратизм, приоритет местного законодательства над общегосударственным;
4. Распад СССР (1989 – 1991 гг.). История советской экономики завершилась.

Далее последовало разгосударствление экономики, то есть массовая приватизация (1992-1993 гг.), юридически закрепившее распыление промышленности. Уровень промышленного производства катастрофически упал. В частности, объём судостроения с 1965 г. до 1990 г. сократился в 7,24 раза; на этом уровне он удерживается и до сих пор.

Таблица 2

Результаты хозяйственной реформы и перестройки как генеральных операций гибридной войны против СССР/РФ (на примере судостроительной промышленности)

1	Операция	Хозяйственная реформа 1985-1990 гг.			Перестройка 1991-1999 гг.			Итого (результат) (3+7)
2	Классификация	Объём судостроительного производства тыс. единиц		Сопоставление объёма производства, раз	Объём судостроительного производства тыс. единиц		Сопоставление объёма производства, раз	
		Дифференциальный максимум 1965-1972 гг.	Дифференциальный минимум 1980 гг.		Дифференциальный максимум 1972-1990 гг.	Дифференциальный минимум 1991-1999 гг.		
3	2	3	4	5	6	7	8	9
4	Начальное время	242	224	1,05	224	15	15,60	161,1
5	Конечное время	310	302	1,53	405	30	12,50	100,3
6	Транспортные суда	282	269	1,05	490	100	4,85	2,8
7	Итого (4+5+6)	834	795	1,18	1129	146	7,73	5,7

С этого времени противникам более не нужно работать над изощрёнными планами подрыва или деградации стратегического уровня российской промышленности. Инициатива с формирования благих намерений, теперь исходит из трёх источников:

- свободные независимые фирмы, действующей на рынке;
- мезоэкономические органы, наследники упраздненных органов отраслевого управления;

- научные организации, преимущественно либерального толка, выступающие агентами влияния западных мозговых трестов, некогда готовивших реформу и перестройку.

С разрушением плановой системы управления СССР и перестроечным крахом промышленного производства основные цели описанных выше мегаопераций гибридной войны можно считать достигнутыми. Отпала необходимость разрабатывать новые широкомасштабные реформы, программы, стратегии, якобы преследующие цели развития экономики, благоденствия населения, но зато с неизбежным риском ответственности за их недостижение либо иные негативные последствия.

Позиция нового руководства постперестроечной России, рекрутированного из деятелей чуждых проблемам удовлетворения потребности общества, основалась на 3 базовых постулатах:

1. Разгосударствление экономики (упразднение структур и функций органов государственного управления реальным сектором, прекращение директивного макроэкономического планирования, полная децентрализация принятия как оперативных, так и стратегических решений на микроуровне);

2. Формирование либеральной идеологической оболочки процесса деструкции промышленности, понятийного аппарата, представлений и оценок, лежащих в основе целеполагания и критериев достижения целей;

3. Построение, заимствование, имитация либерально-рыночных институциональных норм права, регулирующих общественные отношения.

На базе этих постулатов быстро сформировались догматы – бездоказательные положения, признаваемые непреложными истинами.

Полномочия по трактовке догматов и, главное, надзору за их исполнением, делегированы ответственному центром либеральной идеологии. Из числа догматов ближе всего к сфере промышленного производства относятся три: эффективный собственник, рынок и конкуренция. Предполагалось, что следование им является оптимальным путем к выживанию промышленности и даже её «устойчивому развитию». В отсутствие отраслевого начала каждая из 50 верфей Российской Федерации пробовала с большим или меньшим успехом самостоятельно определить свою стратегию в рамках догматики. Рассмотрим судьбу некоторых попыток.

Первый из введённых в деловой оборот постперестроечных постулатов – разгосударствление экономики – был предварен идеологической кампанией, проводимой именно государственной машиной пропаганды на протяжении десятилетия 1980-1990 гг. Её задача - отметив и раскритиковав все негативное, привнесённое хозяйственной реформой в ранее успешно функционировавшую плановую модель, объявить это имманентно присущими ей дефектами. Решающий удар был нанесён законом о приватизации. Нобелевский лауреат Дж. Стиглиц отметил: «Россия обрела самые худшие из всех

возможных состояний общества – колоссальный упадок, сопровождаемый столь же огромным ростом неравенства...». Проведение приватизации любой ценой создало условия для деградации, вело не к созданию богатства, а к присвоению активов. Производная догма поясняет идеи сторонников приватизации: «Везде в мире частный собственник более эффективен, чем государственный» (В.В. Путин, 18 декабря 2003г.). С мнением В.В. Путина можно согласиться, приняв за критерий эффективности меру достижения перечисленных выше целей: неравенство, нажива, передел собственности, но государственный собственник, по определению, преследует иные цели – удовлетворение потребностей общества, жизнеспособность страны... Ещё одна производная догма – частный собственник способен привлечь к управлению промышленностью эффективных менеджеров – имеет слабое место: инверсия компетенции. К управлению промышленностью пришёл слой людей, не знакомых ни с объектом управления, ни с методами; новые собственники привлекали к управлению знатоков приватизационных документов и процедур, не умея выбрать настоящих командиров производства. В целом, уровень динамических организационных компетенций обнаружил устойчивый регресс, при этом квалификационный уровень явно уступил уровню наличного среднего управленческого звена, воспитанного в отрасли. Сами приватизационные процедуры, а затем операции с активами, пересмотр организационно-правовых форм, ренационализация и т.д. на несколько лет приковали управленческий потенциал предприятия и отрасли в целом. Потери результата не компенсируются даже такими инновационными вариантами как схема приватизации АО «Северная верфь», судостроительной фирмы «Алмаз», завода «Пелла». В то же время важно отметить, что судостроение России прошло сложный период постперестроечной трансформации с меньшими потерями по сравнению с другими высокотехнологичными отраслями оборонного комплекса, что объясняется рациональным использованием некоторых факторов отраслевой специфики и, в частности, растянутым во времени наследием минувшего централизованного государственного управления.

Во-первых, бытовала отрицательная оценка такой традиции отечественного судостроения, как растянутый производственный цикл и практически параллельная закладка многочисленных серий как средство борьбы с неравномерностью загрузки производственных мощностей, что приводило к замораживанию массы оборотных средств в незавершенном производстве, особенно в формате реализованного товарного выпуска. Это позволило в 1991-1995 гг. ценой небольших затрат на достройку кораблей с высокой степенью технической готовности сдать такие боевые корабли, как

- эсминцы пр. 956 «Беспокойный» (1991 г.), «Настойчивый» (1992 г.), «Адмирал Ушаков» (1993 г.);

- подводные лодки пр. 949А «Орел» (1992 г.), «Тверь» (1993 г.), «Омск» (1993 г.), «Псков» (1993 г.), «Самара» (1995 г.), «Томск» (1996 г.);
- подводные лодки пр. 971 «Волк» (1991 г.), «Кузбасс» (1992 г.), «Леопард» (1992 г.), «Тигр» (1993 г.), «Вепрь» (1995 г.);
- подводные лодки пр. 971 РТМК «Тамбов» (1992 г.);
- подводные лодки пр. 877 «Краснознаменск» (1992 г.), «Комсомольск-на-Амуре» (1991 г.), «Липецк» (1991 г.).

Реализация перечисленного задела советского периода смягчила самый болезненный удар перестроечного шока, обеспечив объём выпуска 68% из общего объёма за этот период 843 тыс. т, что оказалось решающим условием выживания. Более того, задел доперестроечного периода был успешно использован для строительства кораблей пр. 955, сданных в 2012-2013 гг. Во-вторых, в период 1991-2005 гг. секвестр государственного оборонного заказа выдвинул на основную позицию в портфеле заказов отрасли экспорт, в основном боевых кораблей, 21,9% объёма производства. Такой ассортиментный сдвиг был неосуществимым для частных владельцев разрозненных верфей. Он был достигнут благодаря работе государственных органов военно-технического сотрудничества, научно-техническому заделам, накопленному государственными НИИ и КБ, государственным гарантиям, кредитам и т.д. Таким образом, именно государственное начало во второй раз спасло отечественное судостроение. В-третьих, сработала недостаточность организационно-технологического обособления гражданского судостроения от военного. Хотя российские универсальные верфи далеко отставали от передовых зарубежных предприятий по ресурсной эффективности, у них не возникало технологических препятствий диверсификации, погубивших многие отрасли отечественной индустрии, а сохранившийся с советских времён мобилизационный потенциал позволил работать неэффективно, но результативно и удерживать годовой объём гражданской продукции на перестроечном уровне порядка 130-150 тыс. cgt/ecgt.

Таким образом, догмат «ухода государства из экономики», а с ним и миф об эффективных собственниках в условиях судостроения был убедительно дезавуирован практическим опытом. К рубежу XXI века в отрасли сформировалось представление о полезности государственного участия в управлении промышленным производством. Более того, получил признание и развитие мезоэкономический тезис: отрасль должна быть не только объектом, но и субъектом государственного управления. В реалиях 2018г. на долю контролируемых государством верфей приходится 90,1% выручки отрасли, причём 72,0% из них приходится на долю 7 крупных верфей.

Следующий из догматов – о «невидимой руке рынка», который приписывается по опыту функционирования англо-саксонской модели свободного рынка. На западе рыночные механизмы строились столетиями, на фоне роста самого масштаба и сложности экономики. В российском

судостроении переход к рынку обернулся коллапсом всего системоценоза, разрушением взаимосвязей и зависимостей участников производственных процессов. Следует напомнить, что ещё в предперестроечный период нашими исследованиями было установлено, что из числа хозяйственных связей, определяемых межотраслевыми балансами и правительственными решениями, не менее 30% не восстановимы помимо централизованной директивной власти, как по причине своей избыточности для поставщика, так и в силу противоречия трендов развития его специализации. С особой силой это оправдалось в судостроении как завершающей сборочной отрасли (коэффициент мультипликации – до 6-7, доля транзитных ресурсов в себестоимости – 72 – 79 %). Зачастую прекращение поставок какого-либо комплектующего изделия решает судьбу важного проекта и стимулирует рост импортозависимости, преодолеть которую пока не удаётся. С ликвидацией дорыночных ценозов утрачиваются многие логистические цепочки, сложившиеся естественные микрокластеры и т.д. С развитием государственного заказа принятая методика ценообразования утрачивает функцию измерителя стоимости. Налицо даже утрата такого далёкого от организационно-экономических проблем фактора, как многие технологии и классы продукции. Тем более инструменты рынка не обеспечивают надлежащей пропорциональности развития промышленности даже в стабильном состоянии, не говоря уже о качественной трансформации объекта управления.

Некоторые позитивные качества рыночные институты обнаруживают лишь в узком секторе судостроения – производстве отдельных классов гражданских (почти исключительно транспортных судов), однако лишь в режиме стагнации, т.к. с 1991 года по 2000 годовой объём транспортного судостроения колебался с 22,2 тыс. cgt/ecgt по 94,9 тыс. cgt/ecgt при среднем уровне 57,3 тыс. cgt/ecgt, обнаруживая явную понижательную тенденцию. Наиболее корректную оценку качества свободного рынка можно получить, анализируя динамику транспортного судостроения за период безраздельного господства соответствующих догматов в практике данной подотрасли. В целом, результаты рыночного эксперимента сводятся к снижению доли российской промышленности в мировом судостроении с 8,3% до 0,3% в настоящее время.

Идея, будто продукция российского хозяйства должна быть конкурентоспособной на мировом рынке даже ранее других постулатов либеральной идеологии приобрела в РФ характер религиозной догмы. Вера в магическую силу конкуренции в конце 1990х была иррациональной. В Послании Федеральному Собранию 2003г. В. В. Путин провозгласил: «Быстрый и устойчивый рост может быть только тогда, когда производится конкурентоспособная продукция. Конкурентоспособными должны быть все – товары и услуги, бизнес и само государство <...> студенты, профессора, наука и культура...». Попытки придать конкуренции статус высшей ценности зачастую ведут к утрате предмета обсуждения. Вначале о

сущности конкуренции. Конкурируют не продукты на прилавке, а их производители. Невозможно представить себе неконкурентоспособный танкер либо балкер, если он имеет класс солидного общества; естественно, судно российской постройки по определению ничем не уступает продукции ЮВА. А вот наша верфь проигрывает конкурентам по цене, срокам, условиям платежа. Причём проигрывает отнюдь не по наукоемким, а по простейшим транспортным судам, которые, как ни парадоксально, строятся самими передовыми методами (речь идёт об организационно-экономических компетенциях, а вовсе не о таинственных волшебных технологиях). Само понятие о сущности и значимости этих компетенций глубоко чуждо современным эффективным собственникам. Именно здесь предстоит искать фактор конкурентоспособности, а не в инвестициях в железо... Далее, какова должна быть стратегия в отношении верфей, которым грозит (в русле мирового судостроения) утрата жизнеспособности ранее приобретение конкурентоспособности? Очевидно, к ним пора применить критерий удовлетворения общественных потребностей.

Если страна строит 0, 3 % мирового судостроения, а покупает 4, 0 %, то стоит ли желать, чтобы, продав продукцию своей верфи на мировом рынке, там же покупались суда для своих судовладельцев? Если учесть цену, условия платежа, налоги в чужой бюджет, зарплату и социальные выплаты, субсидии – субвенций и т.д., то с использованием внутриэкономических и административных ресурсов вариант конкуренции в режиме импортозамещения представляется предпочтительным, если критерием выбора выбрать удовлетворение потребностей собственной страны в целом.

Таким образом, фундаментальные догматы не выдержали испытания реальностью.

Итак, к 2000 г. завершились две крупнейшие мегаоперации гибридной войны глобальных противников СССР/РФ, направленных на нанесение неприемлемого ущерба экономике нашей страны и разрушение системы управления народным хозяйством (конкретно – промышленностью).

Это «хозяйственная реформа» 1965-1980 гг. и «перестройка» 1985-2000 гг., нанешие тяжелейший удар по отечественному судостроению. В результате поражения России на фронте этих операций объём судостроительной продукции снизился с 1965 г. по 2000 г. с 942 тыс. cgt/ecgt до 142 тыс. cgt/ecgt – в 6,6 раза, доля Российской Федерации в мировом судостроении упала с 8,3% до 0,87%, а главное – была разрушена базовая концепция управления промышленным производством.

Выводы

Уже к 2000 г. основные постулаты реформы подверглись испытанию практикой и обнаружили свою несостоятельность, а благие пожелания, прикрывающие истинные цели операций, обещавшие народной массе процветание и благоденствие, никак не осуществлялись. Похоже, заметное снижение активности противников на

этом фронте можно объяснить их удовлетворенностью полученными результатами и уверенностью в способности навязанной России модели управления самостоятельно, без участия внешних кураторов, собственными силами удержать страну на курсе регресса, в статусе сырьевого анклава периферийного капитализма.

Сегодня «благие намерения» регенерации государственного управления, многочисленные программы, стратегии, проекты исходят от сугубо внутренних авторов, их направленность обусловлена объективно существующими интересами государства, однако вероятность и степень их выполнения внушают тревогу.

Литература

1. Алехин М.Ю., Колобкова И.Е. О подходе к формированию долгосрочных судостроительных программ. - Научный журнал «Вестник современных исследований» №8-2 (23), научный центр «Орка», г. Омск, 2018.
2. Волостных В. В., Иванкович Т. С., Иванкович А. В. Инструментарий рефлексивного анализа динамики отечественного судостроения. – Морские интеллектуальные технологии № 4 (34) т.1, 2016.
3. Волостных В. В., Иванкович А. В. Когда начинается будущее. - Морские интеллектуальные технологии № 2 (44) т.1, 2019.
4. Волостных В. В., Иванкович А. В. Размышления на остановке по пути в будущее. - Морские интеллектуальные технологии № 2 (44) т.1, 2019.
5. Иванкович А.В. Стратегии прошлые и будущие – Морской вестник № 3 (63), 2017.
6. Иванкович А.В. Развитие системы управления промышленным предприятием. - Морской вестник № 4 (68), 2018.
7. История отечественного судостроения. Под ред. И.Д. Спасского, т. IV,V. СПб.:Судостроение,1996.
8. Ларуш Линдон. Физическая экономика. М.: Научная книга, 1997.
9. Логачев С.И., Чугунов В.В., Горин Е.А. Мировое судостроение, современное состояние и перспективы развития. СПб.: МорВест, 2009.

References

1. Alekhin M.U., Kolobkova I.E. O podhode k formirovaniu dolgorochnyh sudostroitelnyh program. – Nauchniy zhurnal "Vestnik sovremennih issledovaniy" № 8-2 (23), nauchnij tsentr "Orka", g. Omsk, 2018.
2. Volostnykh V. V., Ivankovich T. S., Ivankovich A. V. Instrumentariy refleksivnogo analiza dinamiki otechestvennogo sudostroyeniya. – Morskie intellektualnie tehnologii № 4(34) t1, 2016.
3. Volostnykh V. V., Ivankovich A. V. Kogda nachinaetsya budushee. – Morskie intellektualnie tehnologii № 2 (44) t1, 2019.
4. Volostnykh V. V., Ivankovich A. V. Razmishleniya na ostanovke po puti v budushee. – Morskie intellektualnie tehnologii № 2 (44) t1, 2019.
5. Ivankovich A.V. Strategii proshlie i buduschie, Morskoy vestnik № 3 (63), 2017.
6. Ivankovich A.V. Razvitie sistemy upravleniya promishlennim predpriyatiem. - Morskoy vestnik № 4 (68), 2018.
7. Istorija otechestvennogo sudostroeniya . Pod red. I.D. Spasskogo, t. IV,V. SPb.: Sudostrojenie, 1996.
8. Larush Lindon. Phisicheskaja ekonomika. M.:Nauchnaja kniga, 1997.
9. Logachev S.I., Chugunov V.V., Gorin E.A. Mirovoe sudostroenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitia. – SPb., Morvest, 2009.

УДК 614.8.084.

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ СУДОВЫХ СВАРЩИКОВ

Антон Юрьевич Бокатов,

старший преподаватель кафедры эргономики, экологии и трудового права
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3
e-mail: kww@smtu.ru

Сергей Владимирович Ефремов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эргономики, экологии и трудового права
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3
e-mail: kww@smtu.ru

Евгений Васильевич Плехов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эргономики, экологии и трудового права
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3
e-mail: kww@smtu.ru

Аннотация

В работе представлен разработанный авторами статьи метод экспертных оценок профессиональных рисков судовых сварщиков. Проанализированы основные факторы, способствующие развитию профессиональных заболеваний у рабочих, занятых в производственном процессе в сборочно-сварочных цехах судостроительного производства. Приведены данные, полученные сотрудниками кафедры эргономики, экологии и трудового права СПбГМТУ, по распределению вредных веществ сварочного аэрозоля и пыли в объеме сборочно-сварочных цехов в зависимости от высоты над уровнем пола, времени от начала рабочей смены до её окончания и сезона года.

На основе системной оценки всех факторов разработана опросная таблица для экспертов, оценивающих профессиональные риски судовых сварщиков. В статье также представлен математический аппарат по обработке полученных данных и результаты экспертного анализа по оценке профессиональных рисков судовых сварщиков, выполненного сотрудниками кафедры.

Ключевые слова: профессиональные риски, судовые сварщики, запыленность и загазованность воздуха, средства защиты.

ASSESSMENT OF PROFESSIONAL RISKS SHIP WELDERS

Anton Y. Bokatov

senior lecturer in ergonomics, ecology and labor law of St.-Petersburg State Marine Technical University: 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kww@smtu.ru

Sergey V. Efremov

Ph.d., Associate Professor of ergonomics, ecology and labor law of St.-Petersburg State Marine Technical University:
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kww@smtu.ru

Evgeny V. Plekhov

Ph.d., Associate Professor of ergonomics, ecology and labor law of St.-Petersburg State Marine Technical University:
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kww@smtu.ru

Abstract

In work the method of expert evaluations of professional risks of ship welders developed by authors of article is presented. The major factors contributing to the development of occupational diseases in the workers occupied in production in assembly and welding shops of ship-building production are analysed. The data obtained by the staff of department of ergonomics, ecology and the labor law of St. Petersburg State Marine Technical University on distribution of harmful substances of welding aerosol and dust in volume of assembly and welding shops depending on height over the level of a floor, time from the beginning of a shift before its termination and a season of year are provided.

On the basis of system assessment of all factors the polling table is developed for the experts estimating professional risks of ship welders. The mathematical apparatus on processing of the obtained data and results of the expert analysis according to professional risks of ship welders made by the staff of department is also presented in article.

Key words: professional risks, ship welders, dust content and gas contamination of air, security measure.

По статистическим данным уровень профессиональной заболеваемости в последние годы в целом по стране значительно сократился [8]. В 2017 году зарегистрировано около 4,8 тысяч случаев развития профессиональных заболеваний, что почти на 30% меньше по сравнению с 2012 годом (~7,1 тыс. случаев). Положительная динамика связана в первую очередь с модернизацией производства, с внедрением новых технологий, автоматизированных комплексов, которые исключают ручной труд. Но, по условиям технологического процесса, при постройке судов необходимо сваривать элементы конструкции корпуса очень больших размеров, и чаще всего эти работы приходится производить в замкнутых пространствах, поэтому для сварочных работ всё еще часто используется ручной труд.

Сборочно-сварочные цехи судостроительных заводов представляют собой многопролетные здания высотой до 30 метров, в которых производятся технологические процессы с использованием различных видов сварки. При этом в **атмосферу** цеха постоянно поступают продукты сгорания, возникающие в процессе газо- и электросварки, а также мелкодисперсная пыль,

возникающая как в процессе сварки, так и при зачистных операциях. На работников сборочно-сварочного цеха воздействует множество различных опасных и вредных факторов, но, на наш взгляд, запыленность и загазованность помещения - это один из самых вредных факторов, отрицательно воздействующих на здоровье и продолжительность жизни работников.

По данным статистики [9,10], именно у сварщиков в первую очередь у сварщиков развиваются такие опасные заболевания, как интоксикация марганцем, хронический бронхит, пневмокониоз, функциональные нарушения нервной системы и др. При проведении сварочных работ в замкнутых пространствах время развития профзаболеваний сокращается из-за более высоких концентраций вредных веществ.

Состав пыли неоднороден и по фракционному составу, и по химическим веществам. Различается он в зависимости от материала сварных конструкций, **сварочных** электродов, методов сварки. В таблице 1 приведены данные о вредных веществах, содержащихся в пыли, образующейся при сварочных работах [3,4].

Таблица 1

Вредные вещества, содержащиеся в пыли, образующейся при сварочных работах

Наименование сварочного процесса	Наименование вредных веществ
Ручная сварка фтористо-кальциевыми электродами	Оксиды железа, марганца, хрома. Соли фтора. Оксиды азота, фтористый водород, окись углерода (газы).
Ручная сварка типовыми электродами	Оксиды железа, титана, алюминия, хрома, марганца, двуокись кремния. Оксиды азота, окись углерода (газы).
Сварка алюминиево-магниевого сплава в защитных газах: а) неплавящимся электродом б) плавящимися электродами	Оксиды алюминия, магния, вольфрама. Оксиды азота, окись углерода, озон (газы). Оксиды алюминия, магния, марганца. Оксиды азота, окись углерода, озон (газы).
Сварка титана в среде защитных газов: а) неплавящимся электродом б) плавящимися электродами	Оксид титана, вольфрама. Оксиды азота, окись углерода, озон (газы). Оксиды титана. Оксиды азота, окись углерода, озон (газы).
Сварка цветных металлов в среде защитных газов	Оксиды меди, цинка, марганца, никеля, свинца, кадмия. Оксиды азота, окись углерода, озон, фтористый водород (газы).
Сварка под слоем флюса: а) при сборке флюса и засыпке в бункер б) при сварке	Пыль флюса, состоящая из железа, марганца, кремния, фтора. Оксиды железа, марганца, кремния, соли фтора. Оксиды азота, окись углерода, фтористый водород (газы).

За счет выделения тепла при сварке над электрической дугой образуется конвективный поток загрязненного пылью и газами воздуха. Конвективный поток крайне неустойчив и под влиянием подвижности воздуха может отклоняться. Это приводит к тому, что вредными аэрозолями, газами и пылью загрязняется все воздушное пространство цеха.

Результаты обследования воздушного пространства сборочно-сварочных цехов, проведенного сотрудниками кафедры эргономики, экологии и трудового права СПбГМУ на нескольких судостроительных заводах, показало схожую картину распределения сварочного аэрозоля и пыли в пространстве цеха. При исследованиях было выявлено три основных

фактора, влияющих на распределение запыленности и загазованности: сезон года; время от начала рабочей смены до её окончания; высота точки наибольшей концентрации пыли в производственном помещении.

На рис.1 приведены результаты измерений запыленности и загазованности в холодный период года - декабрь (верхние две графика) и теплый период - май (нижние две ломаные линии). В холодный период года превышение запыленности воздуха над ПДК в отдельных точках доходило до 2,5 раз, а по окислам марганца - до 2,3 раза. В теплый период года не было зафиксировано превышение ПДК, т.к. в это время хорошая естественная вентиляция за счет широко открытых ворот цеха.

На рис.2 представлены графики изменения запыленности и загазованности воздуха в холодный период года с 8 до 17 часов. Четко видны пиковые значения запыленности и загазованности воздуха в течение рабочего дня в 11-12 часов и в 15-16 часов.

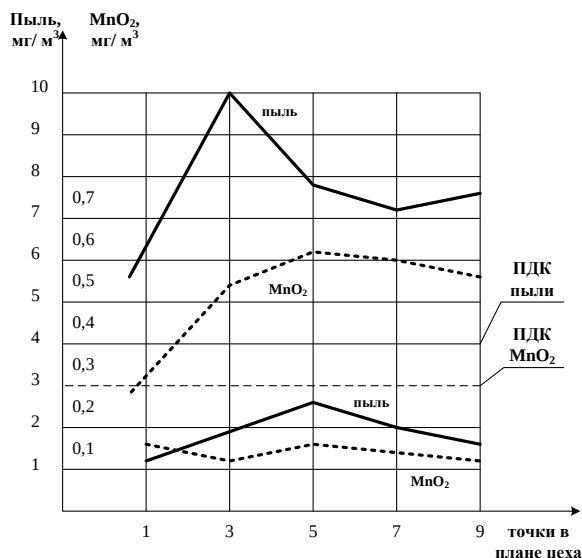


Рис.1. Изменение концентрации вредных веществ по длине IV пролета цеха на высоте 1,5 м

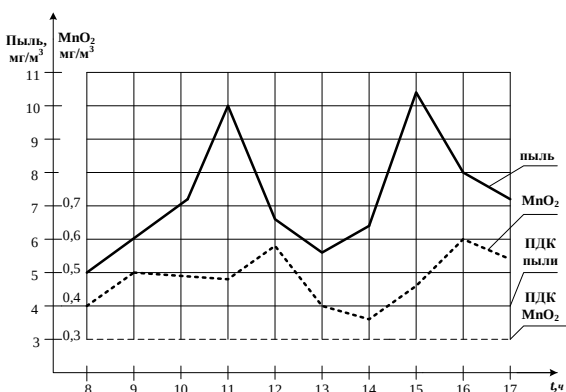


Рис.2. Изменение концентрации вредных веществ во времени на высоте 1,5 м в IV пролете цеха

Исследования распределения запыленности и загазованности по высоте сборочно-сварочного цеха выявили максимальные концентрации на уровне 3-7 метров от пола при общей высоте цеха 25±30 метров.

В соответствии с вышеприведенными результатами исследований, при проектировании систем вентиляции сборочно-сварочных цехов рекомендуется учитывать влияние таких факторов, как вид и концентрация вредных веществ, уровень нахождения указанных веществ относительно пола, направление тепловых потоков воздуха внутри помещения.

Процесс проектирования, схема размещения приточного и вытяжного оборудования общеобменной вентиляции, местной вентиляции, а также способы подачи чистого воздуха и удаления

грязного определяются целым рядом нормативных требований [2,6,7]. Кроме того, при производстве сварочных работ сварщикам в обязательном порядке необходимо использовать средства индивидуальной защиты, способные защитить работника на любом рабочем месте и в любых производственных условиях [1,3,5,12].

Каждый сварщик должен осознавать, что защита органов дыхания является необходимым элементом для предотвращения действия опасных производственных факторов. а работодатель в свою очередь, не должен допускать работника к выполнению производственных обязанностей без средств индивидуальной защиты. Также необходимо четкое понимание того, что в процессе сварочных работ в должной защите нуждаются не только органы зрения, но и органы дыхания. Во время работы сварщик должен быть защищен сварочной маской (щитком), это правило, которое выполняют все без исключения. Между тем не допускается и работа без наличия респираторной защиты. И в силу неудобства одновременного надевания щитка и респиратора, а также годами выработанной привычки сварщика работать без респиратора, выясняется, что работник адаптируется и перестает обращать внимание на облако пыли и дыма в рабочей зоне. Чтобы не допускать такого грубого нарушения безопасности труда, работодателям необходимо проверять наличие респираторной защиты у работников в процессе выполнения сварочных работ.

При выборе респиратора необходимо учитывать ряд особенностей. Во первых, материал, из которого он выполнен, не должен поддерживать горение, так как лицо сварщика, а соответственно и респиратор, будут находиться в непосредственной близости к искрам и зоне действия высокой температуры. Также необходимо наличие клапана (желательно, чтобы выдыхаемый воздух направлялся вниз) для уменьшения запотевания линз щитка. Наполнение респиратора должно защищать от озона, который образуется при взаимодействии сварочной дуги и кислорода воздуха. Поэтому наполнение простым активированным углем, как в обычных респираторах, недостаточно, и уровень защиты от озона обязательно должен регламентироваться и указываться в сопроводительной документации к респиратору. Наиболее современным и эффективным индивидуальным средством защиты является маска сварщика с принудительной подачей чистого воздуха в зону дыхания рабочего. Однако, в связи с ее относительно высокой стоимостью (от 30 до 70 тыс. руб.) она не нашла широкого применения на производстве.

Также средством предупреждения профессиональных заболеваний органов дыхания сварщиков может быть организованный на производстве ингаляторий и, соответственно, должны быть предусмотрены дополнительные оплачиваемые перерывы в работе для его посещения.

В целях оценки степени влияния неблагоприятных факторов на уровень профессионального риска сварщиков судостроительных предприятий, авторами было организовано проведение экспертной оценки. Для

чего пяти экспертам были представлены 10 нижеприведенных факторов, влияющих на вероятность развития профзаболеваний у рабочих сварочной специальности.

1. Стаж работы по специальности (рекомендуется $\leq 12,5$ лет).

2. Рабочее место:

- стационарный сварочный пост;
- открытые нестационарные рабочие места;
- сварочные работы в замкнутом пространстве.

3. Вид сварки, свариваемый материал и тип сварки.

4. Наличие эффективной общеобменной вентиляции. Рациональное размещение приточных и вытяжных отверстий общеобменной вентиляции.

5. Наличие местной вытяжной вентиляции.

6. Возможность использования средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) необходимого типоразмера.

7. Готовность сварщика использовать СИЗОД.

8. Эффективность работы органов общественного контроля (профсоюзы, трудовой коллектив) за условиями труда на предприятии.

9. Своевременное проведение предварительных и периодических медицинских осмотров.

10. Регулярное посещение лечебно-профилактических заведений. Отказ от курения.

Факторы представлены экспертам, которые независимо друг от друга должны были расположить их в порядке убывания по влиянию на вероятность развития профзаболеваний у сварщиков. Фактору, наиболее влияющему на развитие профзаболеваемости, присваивался максимальный балл 10, далее - по убыванию до 1 балла.

По результатам экспертной оценки составлена таблица 2.

На рис.3 представлена гистограмма полученных результатов.

Таблица 2

Результаты экспертного анализа профессиональных рисков сварщиков

№ п/п	Факторы	Номер эксперта					Сумма баллов
		1	2	3	4	5	
1	Стаж работы	8	6	10	10	8	42
2	Расположение рабочего места	10	7	9	9	6	41
3	Вид сварки	4	1	8	8	4	25
4	Эффективная общеобменная вентиляция	9	8	7	5	3	32
5	Наличие местной вытяжной вентиляции	7	10	5	2	5	29
6	Наличие СИЗОД необходимого типоразмера	6	9	2	7	10	34
7	Готовность сварщика использовать СИЗОД	3	5	3	6	9	26
8	Слабый общественный контроль за условиями труда	1	4	4	1	2	12
9	Своевременное проведение медицинских осмотров	5	3	6	4	7	25
10	Проведение профилактических мероприятий	2	2	1	3	1	9

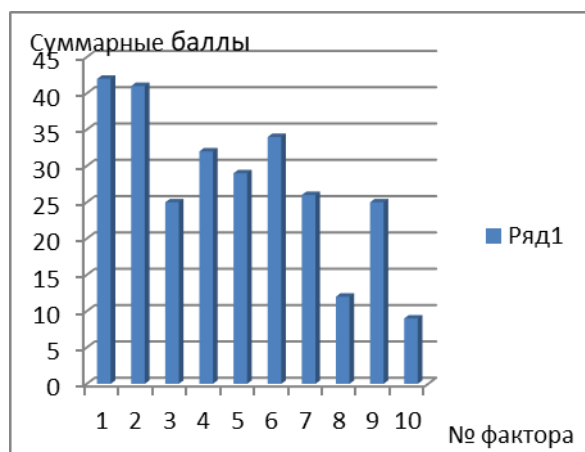


Рис. 3. Гистограмма профессиональных рисков судовых сварщиков

Выводы

1. В судостроении для сварщиков сварочный аэрозоль и газы, выделяющиеся при сварке, остаются основной причиной развития профзаболеваний.

2. Доля ручного труда в сборочно-сварочных цехах остаётся высокой из-за специфики постройки

судна. Около половины (40-45%) всех сварочных работ ведётся в замкнутых пространствах.

3. Наиболее эффективным средством защиты сварщиков при работе в замкнутых пространствах является маска сварщика с принудительной подачей чистого воздуха в зону дыхания рабочего.

4. После обработки результатов экспертного анализа профессиональных рисков судовых сварщиков выявлено, что основными причинами развития профзаболеваний у сварщиков являются следующие (по мере убывания):

- большой стаж работы по специальности;
- расположение рабочего места в замкнутом пространстве;
- отсутствие СИЗОД необходимого типоразмера;
- низкая эффективность общеобменной вентиляции;
- отсутствие местной вытяжной вентиляции;
- неготовность сварщика постоянно использовать СИЗОД;
- несвоевременное проведение медицинских осмотров.

Литература

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).
2. Гримитлин М.И., Тимофеева О.Н., Эльтерман Е.М., Эльянов Л.С. Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов. – Л. : Судостроение, 1978. - 239 с.
3. Е.Г. Бурмистров Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте. Редактор: Макаров С.В. Издательство: Лань, 2017.
4. Забавский А.Н., Козлов В.А. Улучшение условий труда при сварке. Тезисы докладов. Всесоюзная конференция «Охрана труда при сварке». Вильнюс, 1980.
5. С. Б. Андреев, В. С. Головченко, В. Д. Горбач, В. Л. Руссо Основы сварки судовых конструкций. Изд-во Судостроение, 2006.- 279 с.
6. "Вентиляция помещений строящихся, модернизируемых и ремонтируемых судов. Основные положения» (Введены в действие 01.09.1971 г.)
7. Строительные нормы и правила РФ СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» (приняты постановлением Госстроя РФ от 26 июня 2003 г. N 115).
8. https://iz.ru/771250/hetaguova-daria-evseeva/uroven_profzabolevaemosti-rekordno-snizilsia-za-piat-let. (Дата обращения: 25.06.2019).
9. <https://nanolif.info> (Дата обращения: 20.06.2019).
10. <https://tortaid.ucoz.ru>. (Дата обращения: 20.06.2019).
11. <https://www.svarbi.ru/cat/maski-ochki-dlja-svarwika/27408>. (Дата обращения: 24.06.2019)
12. www.kiout.ru Охрана труда при выполнении сварочных работ. Профпатология и выбор СИЗ. Клинский институт охраны и условий труда. 25.05.2018. (Дата обращения: 24.06.2019).

References

1. "The labor code of the Russian Federation" of 30.12.2001 N 197-FZ (edition of 01.04.2019).
2. Grimitlin M.I., Timofeev O.N., Elterman E.M., Elyanov Hp. Ventilation and heating of shops of shipbuilding plants. – L.: Shipbuilding, 1978. - 239 p.
3. E.G. Burmistrov of the Basis of welding and gas-thermal processes in shipbuilding and ship repair. Editor: Makarov S. V. Publishing house: Fallow deer, 2017.
4. Zabavsky A.N., Kozlov V. A. Improvement of working conditions when welding. Theses of reports. All-Union conference "Labor Protection when Welding". Vilnius, 1980.
5. S.B. Andreyev, V.S. Golovchenko, V.D. Gorbach, V.L. Russo of the Basis of welding of ship designs. Shipbuilding publishing house, 2006, 279 p.
6. "Ventilation of the premises of ships under construction, modernization and repair. General provisions" (Effective 01.09.1971)
7. Construction norms and rules of the Russian Federation SNiP 41-01-2003 "Heating, ventilation and conditioning» (adopted by the resolution of Gosstroy of the Russian Federation of 26 June 2003 N 115).
8. https://iz.ru/771250/hetaguova-daria-evseeva/uroven_profzabolevaemosti-rekordno-snizilsia-za-piat-let. (Date of the address 25.06.2019).
9. <https://nanolif.info> (Date of the address: 20.06.2019).
10. <https://tortaid.ucoz.ru>. (Date of the address: 20.06.2019).
11. <https://www.svarbi.ru/cat/maski-ochki-dlja-svarwika/27408>. (Date of the address: 24.06.2019).
12. www.kiout.ru Labor protection when performing welding works. Professional pathology and choice of SIZ. Klin institute of protection and working conditions. 25.05.2018.(Date of the address: 24.06.2019).

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.942:004.031.043

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ АКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КУРСА ЛЕКЦИЙ ГМТУ «КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА – ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ»**Юрий Иванович Нечаев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3

e-mail: petr_oleg@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются проблемы повышения активности обучения при разработке нового курса лекций «Компьютерная математика», который не читается в университетах России. Структура курса отражает основные тенденции развития концептуальных решений на основе творческого подхода к интеграции интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений. Особенности построения курса связаны с развитием новых подходов к моделированию динамики сложных систем в эволюционирующей среде. Это открывает перспективы создания интеграционных теорий и концептуальных решений при интерпретации динамических ситуаций в режиме экстренных вычислений. Такая интеграция осуществляется в рамках динамических моделей современной теории катастроф (СТК), ориентированной на преобразование информации в виде цепочки «моделирование – прогнозирование – принятие решений». Вычислительная среда КМ представлена как активная обучающая система на основе совокупности взаимодействующих объектов обучения, обеспечивающих информационные и управляющие связи взаимодействия в процессе приобретения и усвоения знаний. В качестве методов повышения активности обучения рассматривается подход на основе когнитивной парадигмы, методы Делфи и «Мозгового штурма». Приведены примеры реализации этих технологий в процессе выработки технических решений в области создания новой техники и технологий.

Ключевые слова: компьютерная математика, повышение активности обучения, интеллектуальные технологии, высокопроизводительные вычисления, эволюционная динамика.

PROBLEMS OF INCREASING THE ACTIVITY OF TRAINING WHEN CREATING A COURSE OF LECTURES «COMPUTER MATHEMATICS - APPLIED ASPECTS» IN SMTU**Yuri I. Nechaev**

the professor, Dr.Sci.Tech, the professor of department of computer science

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

Abstract

The problems of increasing the activity of learning when creating a new course of lectures "Computer Mathematics", which is not read at universities in Russia, are considered. The structure of the course reflects the main trends in the development of conceptual solutions based on a creative approach to the integration of intelligent technologies and high-performance computing. Features of the creating of the course are associated with the development of new approaches to modeling the dynamics of complex systems in an evolving environment. This opens up the prospects of creating integration theories and conceptual solutions for the interpretation of dynamic situations in emergency computing mode. Such integration is carried out in the framework of dynamic models of the modern catastrophe theory (MCT), focused on the transformation of information in the form of a chain "modeling - forecasting - decision making". Computing environment of CM is presented as an active learning system based on a set of interacting learning objects that provide information and control communication interaction in the process of acquiring and assimilating knowledge. As methods to increase learning activity, an approach based on a cognitive paradigm, the methods of Delphi and Brainstorming are considered. Examples of the implementation of these technologies in the process of developing technical solutions in the field of creating new equipment and technologies are given.

Key words: computer mathematics, increase of training activity, intellectual technologies, high-performance computing, evolutionary dynamics.

Введение

Развитие новых подходов к моделированию динамики сложных систем в эволюционирующей среде открывает перспективы создания интеграционных теорий и концептуальных решений при интерпретации динамических ситуаций в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [15]. Сложность и комплексность проблемы интеграции достижений искусственного интеллекта (ИИ) и высокопроизводительных вычислений потребовали разработки формализованной системы математической интерпретации знаний на основе методов компьютерной математики (КМ). Такая интеграция осуществляется в рамках концептуальных решений СТК, интегрирующей интеллектуальные технологии и высокопроизводительные вычисления. Истоки формального аппарата КМ в приложении к рассматриваемой проблеме можно проследить на основе представлений математической системы в курсе лекций «Компьютерная математика», который изучается в университете Лафборо США с 1982 года и изложен в работе Д.Кук, Г.Бейз [3].

Исследования и разработки в области эволюционной динамики сложных систем, особенно нелинейных нестационарных систем (NN-систем) позволяют перестроить этот курс на основе достижений интеллектуальных технологий XXI века и СТК. Рассмотрение КМ как эффективного инструмента интерпретации сложного взаимодействия позволяющий более гибко и адекватно описывать феномен поведения в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Формирование теоретических моделей КМ в различных приложениях связано с построением функций интерпретации эволюционной динамики диссипативных систем – исходного теоретического базиса проблемы. Поддержка процедур интерпретации сформулирована в виде принципов и концептуальных решений, позволяющих эффективно применять методы КМ в сложных динамических средах. Основные модели эволюционной динамики содержательно охватывают решение проблем реконструкции пространств поведения, управления и бифуркационного множества в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды.

1. Функциональное пространство интегрированной вычислительной среды КМ

Теоретические принципы, определяющие концептуальное пространство вычислительной среды КМ, реализуются в рамках эволюционной парадигмы интерпретации методов и средств обработки в условиях неопределенности среды взаимодействия. Интегрированная модель этой среды предоставляет единый математический аппарат интерпретации моделей ИИ.

Практическая реализация теоретических решений КМ рассмотрена на примерах формального аппарата исследований [5] – [8], связанных с обработкой информации при

функционировании морского динамического объекта (МДО) в режиме UC [14].

Концептуальная модель обработки информации в вычислительной среде КМ представлена в виде преобразования:

$$U(F) = \langle F(R^n, R^r); \{M(\tau) \times V(S) \times D(W)\} \rightarrow Y(R) \rangle \quad (1)$$

где $U(F)$ – пространство вычислительной среды КМ; $F(R^n, R^r)$ – функционал, определяющий процедуры интерпретации МДО в пространствах поведения и управления СТК; $M(\tau)$ – мультимодельный комплекс алгоритмов интерпретации эволюционной динамики; $V(S)$ – множество элементов системы моделирования динамических ситуаций; $D(W)$ – множество, содержащее процедуры генерации решений и выработку управляющих воздействий; $Y(R)$ – множество, формирующее логические правила нечеткой формальной системы (НФС); $\tau \in [t_0, t_k]$ – интервал времени реализации.

На основе модели (1) вычислительную среду КМ можно представить как активную обучающую систему (АОС) на основе [9].

Определение 1. АОС – совокупность взаимодействующих объектов обучения, обеспечивающих информационные и управляющие связи взаимодействия в процессе приобретения и усвоения знаний, включая отношения подчиненности и распределение процедур интеллектуальной поддержки (ИП) в эволюционирующей образовательной среде.

Определение 2. АОС состоит из *управляющего центра ИП* на верхнем уровне и *активных элементов – обучаемый и преподаватель*, поддерживающих процедуры обработки информации при реализации стратегии обучения в заданном интервале времени – на нижнем уровне.

Определение 3. *Стратегии функционирования* АОС реализуются с учетом предпочтений активных элементов в зависимости от состояния среды обучения на данном этапе эволюции и управляющих воздействий. *Допустимые множества состояний* АОС формируются в зависимости от среды взаимодействия активных элементов и используемых интеллектуальных и вычислительных технологий.

Утверждение 1. При формировании стратегий ИП используется *механизм информирования* и интеллектуального обеспечения активных элементов о результатах анализа альтернативных решений и выбора предпочтительной технологии обработки данных в рамках принципа конкуренции.

Утверждение 2. *Механизм функционирования* АОС определяется целевой функцией, допустимыми множествами решений, интервалом реализации, периодами функционирования в зависимости от стратегий интерпретации и управления в процессе эволюции обучения.

Утверждение 3. *Механизм управления* АОС формируется в виде совокупности стратегий ИП при заданной структуре активных элементов, информационном и алгоритмическом обеспечении процесса обучения в заданной среде и особенностях исследуемой задачи (ситуации).

Реализация АОС при моделировании прикладных задач интерпретации поведения МДО поддерживается системой ИП (рис. 1).



Рис. 1. Модель процесса обучения: E1, E2, E3 – эксперты: методист, психолог и предметник

В этой системе используется модель обучения, которая осуществляет определенную последовательность операций в соответствии с текущим состоянием обучаемого и методикой обучения: генерируется исходная информация (задача интерпретации), требующая ответных действий обучаемого; производится сравнение полученного ответа с эталонным решением на основе концепции оптимального инструктора [8] и диагностика возникающих ошибок; корректируются текущие характеристики обучаемого по результатам диагностики. Эта модель позволяет представить АОС в виде трех взаимодействующих интеллектуальных модулей (ИМ), обозначенных символом E1: ИМ по решению задач в заданной предметной области, ИМ по диагностике ошибок обучаемого и ИМ по планированию управления обучением.

В процессе функционирования модели обучения широко используются средства моделирования МДО и визуализация полученных результатов. При реализации виртуального моделирования отражаются все существенные детали динамической сцены для повышения адекватности модели реальному физическому процессу. Управляющий комплекс АОС посылает в систему визуализации информацию, содержащую данные об изменениях положений, ориентаций и других параметров динамической сцены.

Результатом использования в учебном процессе вычислительной среды КМ, реализующей достижения в области интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений, является повышение эффективности обучения и уровня подготовки специалиста, развитие его творческого подхода к обучению, снижение субъективных факторов при контроле и использовании знаний. Этот результат достигается за счет реализации адаптивной системы программного комплекса АОС. В случае отсутствия единого подхода к базовым понятиям обучающийся имеет возможность дать аргументированный и обоснованный ответ, который будет обработан с помощью НФС при активном участии обучаемого.

2. Феноменология КМ

Исследование сложного взаимодействия при построении процедур интерпретации поведения МДО в эволюционирующей среде (ЭС) позволяет строить из простых компонент взаимодействия модель исследуемой ситуации, которая ведет себя аналогично реальной системе. В ЭС множество объектов взаимодействуют между собой так, что возникают ширококомасштабные феномены поведения, не присущие отдельным объектам. Объекты среды взаимодействия, выявленные на основе концепции Data Mining [8] в виде «скрытых» знаний, подчиняются довольно простым законам и в совокупности демонстрируют коллективное поведение. Интерпретация такого поведения на основе методов КМ в ЭС свидетельствует о разнообразии феноменов и сложности взаимодействующих структур.

Только отдельные свойства интерпретируемых систем могут проявляться на все более крупных множествах взаимодействия вплоть до макроскопического уровня – изучение фазовых переходов при достижении некоторыми параметрами критических значений. Феноменология коллективных явлений при исследовании сложного поведения МДО чрезвычайно разнообразна и требует построения моделей КМ для различных приложений. Параметры ЭС взаимодействуя, образуют критические наборы значений, вблизи которых плавное изменение влечет резкое изменение структуры адаптивного поведения.

В соответствии с приведенными особенностями процедур интерпретации выделим три большие класса ЭС при функционировании вычислительного комплекса КМ на основе следующих определений (рис. 2).



Рис. 2. Формализации процесса моделирования и интерпретации решений в среде КМ

Определение 4. Замкнутые среды в моделях КМ допускают конечное исчерпывающее описание поведения исследуемых феноменов. Это поведение может быть детерминированным или вероятностным в зависимости от принятого описания интерпретируемой среды. При этом управляющий модуль системы ИП использует полные знания о среде взаимодействия и ее свойствах. Исходной информацией при формировании процедур КМ являются данные измерений и моделирования в виде динамических характеристик взаимодействия. Таким образом, замкнутые среды моделей КМ позволяют получить исчерпывающие знания о динамике взаимодействия (в детерминистском или

статистическом смысле) для практического использования в процессе обучения.

Определение 5. *Открытые среды* не представляют возможности исчерпывающего математического описания в процедурах КМ. Знания об их «скрытых» свойствах и динамических характеристиках в таких средах могут накапливаться в процессе функционирования системы ИП, однако при этом не достигается полный уровень описания. Открытый мир, характеризуемый подобной средой взаимодействия в приложениях КМ, может быть как детерминированным так и не детерминированным. Но в любом случае полное знание о процессах взаимодействия не может быть представлено в виде неизменного окончательного математического описания.

Определение 6. *Трансформируемые среды*, в отличие от предыдущих сред в задачах КМ, могут менять свое поведение. Динамические характеристики и реакции на управляющие воздействия системы ИП определяются в зависимости от тех действий, которые отдельные «скрытые» объекты совершают при интерпретации на основе процедур КМ. Знания о динамике взаимодействия и математическом описании трансформируемой среды в моделях КМ несут временной «исторический» характер.

Если ввести понятие состояния интерпретирующей среды КМ, характеризуя его как исчерпывающий набор «скрытых» знаний о ее свойствах и особенностях поведения МДО, то замкнутые среды, используемые в пространствах поведения и управления СТК, могут задаваться одним состоянием взаимодействия. Состояния моделей КМ при интерпретации в открытых средах будут фиксироваться на некоторых «временных» интервалах. Открытая среда может рассматриваться как замкнутая, а смена состояний в процессе эволюции будет происходить за счет появления новых «скрытых» знаний о среде взаимодействия и способах управления, которые изменяют прежние закономерности поведения МДО, верные для ранее фиксированного состояния. В трансформируемых средах процедуры интерпретации на основе моделей КМ выполняются с учетом смены состояний, которые могут планироваться и инициироваться в зависимости от особенностей эволюционной динамики системы взаимодействия.

Формирование структуры данных вычислительной среды КМ при моделировании динамических ситуаций в процессе обучения реализуется в направлении перестройки организации информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Процесс перестройки в условиях эволюции сопровождается *фазовым переходом*, в результате которого отмечается качественный скачок в изменении элементов интерпретируемой системы, причем последовательность перестройки осуществляется в виде цепочки преобразования информации [7]:

$$F(SA) \rightarrow Fluct \rightarrow Bifurc \rightarrow Reorg \rightarrow F(NSA), (2)$$

где $F(SA)$ – функционирование системы в области притяжения исходной структуры-аттрактора; *Fluct* – отклонения (флуктуации); *Bifurc* – бифуркация;

Reorg – реорганизация (фазовый переход); $F(NSA)$ – функционирование в области новой структуры-аттрактора.

Интерпретация динамики взаимодействия в вычислительной среде КМ осуществляется в рамках структуры, представленной фрактальным графом [8]:

$$G(F_R) = (V(E, U), A(E, C)), (3)$$

формализующим *события* $V(E, U)$, описывающие действия в среде КМ, и *условия* $A(E, C)$ – в виде логического описания ее состояния (рис. 3).

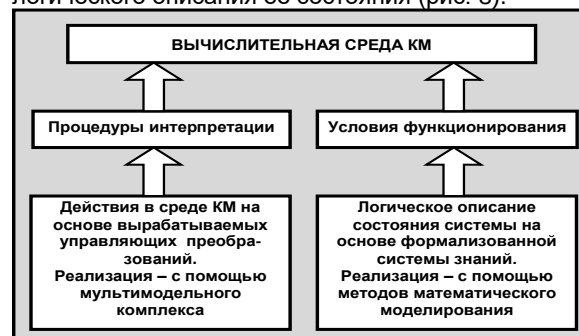


Рис. 3. Структурный синтез вычислительной среды КМ

Как следует из этого представления, управляющий модуль ИП процесса обучения на базе вычислительного комплекса КМ обеспечивает обработку потока информации, связанного с состояниями среды взаимодействия и условиями ее описания в процессе интерактивного диалога.

Преимущества предлагаемого подхода к построению формального аппарата ИП в вычислительной среде КМ заключаются в возможности геометрической и аналитической интерпретации динамики эволюционирующих систем в рамках СТК [5], позволяющей представить исследуемый процесс в виде простых геометрических образов фрактального отображения динамических ситуаций.

3. Особенности структуры ИОС

В рамках представленной концептуальной модели обучения формализуются процессы структурной и функциональной конфигурации вычислительной среды КМ на основе аппарата знаний НФС, организованной на базе синергетической теории управления [7],[8], и когнитивной парадигмы [1].

Студент, как будущий оператор системы поддержки принятия решений (ППР) по созданию новой техники и технологий – специалист необычного профиля, профессиональная деятельность которого отличается тем, что принимать решения ему придется в сложных ситуациях в условиях неопределенности, а часто и дефицита времени. Именно поэтому курс КМ призван обеспечить процедуры ППР необходимым аппаратом знаний, определяющим содержание лекционного курса. Структура проблемной лекции при чтении курса «Компьютерная математика: прикладные аспекты» представлена на рис. 4, где дается содержательная интерпретация

последовательности приобретения знаний при интерактивном взаимодействии с аудиторией.



Рис. 4. Концептуальная модель, определяющая структуру проблемной лекции

В процессе диалога с аудиторией сначала представляется теоретический базис изучаемой проблемы, на основе которого ведется постановка и обсуждение предлагаемых решений с использованием ИП программного комплекса моделирования и визуализации динамических ситуаций. Для обеспечения современного уровня интерактивного взаимодействия используются принципы человеко-машинного обучения на базе аппарата знаний, построенного в рамках современных интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений [5] – [8].

Следует отметить, что «искусству задавать вопросы» в процессе диалога с аудиторией научиться труднее, чем «искусству получать ответы». Как говорят специалисты по машинному обучению, исходный текст вопросно-ответной парадигмы содержит только 10% информации, а 90% определяется контекстом, который мы привносим, воспринимая сообщение.

Междисциплинарность подхода существенно обогащает контекст, в котором реализуется механизм взаимодействия с аудиторией. Во все времена междисциплинарность опиралась на прочный естественнонаучный фундамент, на использование достижений математики как основы процесса обучения. Среди фундаментальных результатов, используемых при построении курса КМ, следует выделить концепцию минимальной длины описания А.Н.Колмогорова [2], принцип нелинейной диссипации Н.Н.Моисеева [4] и методы решения некорректных (обратных) задач А.Н.Тихонова [11].

Одним из важных направлений в программном комплексе ИП является моделирование процесса оптимизации последовательных программ вычислительного комплекса КМ при организации структурированного диалога в процессе изучения курса. Рассматриваемая модель состоит из двух частей.

Первая часть модели содержит термины для описания объекта структуризации и оптимизации. К ним относятся термины для описания вычислительной среды КМ (термины ситуации) и термины для описания языка (термины знаний).

Вторая часть определяет термины, позволяющие описать процесс оптимизации

программной среды обучения. Эти термины разбиваются на следующие группы:

- термины, определяющие настройку модели процесса взаимодействия на модель объекта оптимизации, при помощи которых описываются отношения между фрагментами программы;
- термины для описания результатов выполнения преобразований на каждом шаге оптимизации (термины для описания ситуаций предметной области и свойств оптимизируемых преобразований);
- термины для описания параметров процесса оптимизации (описание порядка и стратегии применения оптимизирующих преобразований при исследовании результатов их применения к программам разных классов).

Алгоритмы решения задачи моделирования процесса оптимизации реализуются при формализации знаний оптимизации вычислительной среды КМ. Функционирование системы обеспечивается с помощью транслятора, преобразующего структурированную программу на языке высокого уровня в модель структурной программы, которая является внутренней формой реляционного представления программ. На базе модели структурной программы осуществляется логический вывод и строится протокол использования системы оптимизации. Протокол поступает в подсистему оценки и визуализации, обеспечивающей анализ оптимальности программы при помощи заданной оценочной функции.

Таким образом, используемый подход при построении диалога с аудиторией является удобным и эффективным инструментом познания методов и средств КМ, особенно в плохо формализуемых средах. Современные системы ИП, использующие указанные выше принципы организации учебного процесса для моделирования и визуализации структуры предметной области – это реальная альтернатива системам «черного ящика». При этом наиболее важной характеристикой является процесс объяснения неявных знаний и превращение их в наглядные познавательные структуры.

Архитектурно-структурная организация программного комплекса КМ сочетает в себе достоинства интеллектуальных систем (ИС) новых поколений, в совокупности обеспечивая наиболее существенные признаки взаимодействия:

- адаптивность под уровень знаний (профессиональная квалификация обучаемых),
- возможность получения аргументированной аналитической информации для обоснованного решения поставленных задач.

Такая организация программного комплекса КМ позволяет обеспечить качественно новые возможности развития информационных технологий в рассматриваемой наукоемкой отрасли практической деятельности, и прежде всего при принятии управленческих решений в сложных предметных областях, связанных с подготовкой специалистов по созданию инновационных решений по проектированию новых типов МДО – судов и плавучих технических средств освоения океана.

4. Особенности теоретической базы КМ

Цель создания теоретической базы КМ заключается в разработке научно-методического аппарата, обеспечивающего компьютерную интерпретацию современных методов и средств ИП. Для достижения указанной цели в предлагаемом курсе лекций рассматриваются следующие задачи (рис. 5):

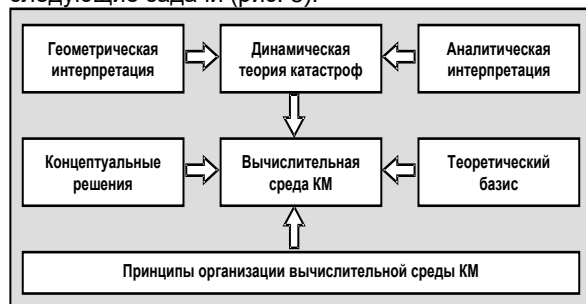


Рис. 5. Информационная среда КМ

- синтез моделей КМ на основе интеллектуальных технологий;
- методология агрегирования моделей КМ в рамках динамической теории катастроф;
- функциональное представление эволюционной динамики интерпретируемых систем.

Концептуальная модель информационной среды КМ рассматривается как совокупность взаимосвязанных компонент:

- развивающееся множество интерпретирующих задач дискретной математики;
- геометрические отображения и формальные структуры, описывающие распределение задач в динамической ЭС;
- область функциональной корректности на множестве состояний интерпретирующей системы в виде упорядоченной последовательности решения;
- множество маршрутов, по которым перемещаются исходные данные и результаты расчета вычислительных элементов КМ.

Главной задачей этих взаимосвязанных компонент вычислительной среды КМ является обеспечение управления распределенными вычислениями в режиме УС.

Таким образом, построение курса КМ определяется как задача ИП распределенных вычислений, обеспечивающей на интервале реализации предоставление требуемого вычислительного ресурса с необходимым уровнем корректности алгоритмического обеспечения.

Определение 7. Функциональный анализ информационной среды моделирования обеспечивает ИП в пространстве знаний КМ (рис. 6).

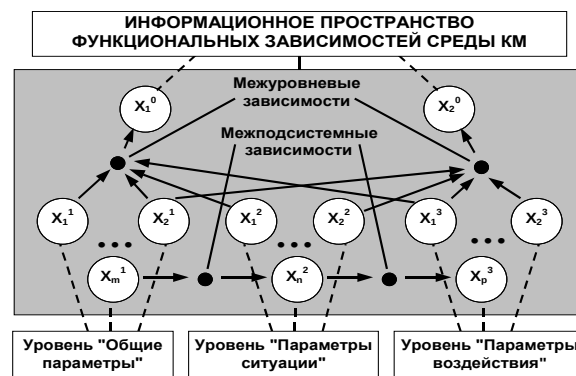


Рис. 6. Информационное пространство среды КМ

В системе ИП для исходного момента времени t_0 выделяется множество необходимых задач $p(t_0)$ и множество их функций $Cet(t_0)$:

$$Cet(t_0) = \bigcup_{P(t_0)} C_i, \quad (4)$$

т.е. полное множество задач $Cet(t_0)$ разбивается на классы C_i в соответствии с их назначением и особенностями интерпретирующей системы.

При построении логических моделей знаний в вычислительном комплексе КМ определяется структура множеств из объектов информационной среды, отображающей эти множества.

5. Методы повышения эффективности процесса обучения в среде КМ

Создание процедур и различных подходов к выбору предпочтительного варианта решения из множества альтернатив в среде КМ реализуется на основе методов поиска решений. Анализ показал, что наиболее предпочтительным вариантом построения системы ППР является использование методов повышения эффективности процесса обучения на основе когнитивной парадигмы, метода Делфи и мозгового штурма [8].

Использование когнитивной парадигмы. Одной из эффективных стратегий повышения эффективности процедур обучения является использование методов когнитивной компьютерной графики (ККГ) [1],[8]. ККГ-система основана на визуализации всех этапов осмысления предлагаемой информации в процессе генерации и анализа решений, ее количественного системного анализа и порождения нового, как правило, нестандартного знания. В результате использования ККГ-системы:

- существенно активизируется процесс взаимодействия, который превращается в увлекательное соревнование индивидуальных интеллектов и профессионального опыта;
- визуализируются в максимально наглядной форме количественные оценки субъективных мнений обучаемого;
- повышается обоснованность суждений с помощью методов математического моделирования и вычислительного эксперимента;
- делается явным и доступным коллективному обозрению и обсуждению те закономерности, которые особенно важны для успешного решения

проблемы, но обычно остаются «за кадром» традиционных процедур экспертного оценивания;

- осуществляется обучение и обострение интуиции обучаемых и преподавателя как лица, принимающего решение (ЛПР), в процессе совместной работы с визуализированным смыслом данной проблемы с целью конструирования новых решений.

Эвристические правила обработки, анализа и интерпретации ККГ-визуализированной информации выявляются и формулируются в процессе работы коллектива студентов. Эти правила являются важным результатом функционирования ККГ-системы и составляют основу для разработки подсистемы обучения и обострения интуиции обучаемых и ЛПР.

Таким образом, ККГ-система помогает обучаемому структурировать проблему, построить оптимальное описание объектов, уточнить формулировку цели и ее содержательное понимание, уточнить реализацию предлагаемых решений.

Метод Делфи. В задачах анализа предлагаемых решений, особенно в сложных ситуациях, когда имеющихся данных оказывается недостаточно для принятия обоснованного выбора, может оказаться полезным метод Делфи (Delphi Technique) [8]. Этот метод особенно эффективен при агрегировании знаний в случае большого разброса исходных оценок. При практической реализации в среде КМ метод Делфи дополняется различными статистическими процедурами и критериями, позволяющими улучшать окончательную оценку решения с учетом трудности решаемой задачи, уровня знаний обучаемых и степени согласованности их мнений.

В методе Делфи полученные субъективные вероятности доводятся до сведения всех участников, проанализировав которые, обучаемые вновь сообщают свои откорректированные оценки. Используемая итеративная процедура позволяет в конечном счете сбить оценки обучаемых и получить некоторую общую оценку, принимаемую за агрегированную. Как показывает практика, метод Делфи эффективен при большой неопределенности исследуемой ситуации.

Метод мозгового штурма. «Мозговой штурм» или «мозговая атака» - один из распространенных методов активизации творческого мышления, особенно при генерации новых технических решений, не имеющих аналогов в практике судостроения [8]. Основная идея штурма – это отделение процедуры генерирования идей в группе обучаемых от процесса анализа и оценки высказанных идей.

Процедура штурма осуществляется преподавателем, при этом обучаемым предлагается высказывать любые даже самые фантастические идеи по разрабатываемому техническому решению. Самый интересный момент штурма – это наступление «пика», когда происходит непроизвольная генерация гипотез и предлагаемых решений. Оценка результатов «штурма» выполняется преподавателем с привлечением независимого эксперта.

Одной из основных трудностей применения рассмотренных моделей повышений эффективности обучения на основе методов Делфи и мозгового штурма является представление суждений в виде числовых значений на некоторой шкале. Важное требование при разработке таких моделей состоит в том, чтобы предлагаемая модель давала близкие результаты при небольших отклонениях в числовом представлении суждений.

Заключение

Таким образом, реализация нового подхода к построению курса КМ открывает возможности формирования АОС и процедур ИП процесса обучения на основе обработки информации в режиме УС на базе интегрированных моделей. Эти модели сочетают достижения интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений применительно к рассматриваемой области знаний.

Разработанный подход к построению курса КМ позволяет активизировать процесс обучения с использованием эффективных процедур ИП и средств интерактивного взаимодействия – когнитивной парадигмы и методов Делфи и мозгового штурма.

Литература

1. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. – М.: Наука, 1991. – 192 с.
2. Колмогоров А.Н. Избранные труды в 6-ти томах. – М.: Наука, 2005. – 304 с.
3. Кук Д., Бейс Г. Компьютерная математика. – М.: Наука. 1990. – 384 с.
4. 4. Моисеев Н.Н. Избранные труды, М. Тайрекс Ко, 2003. – 264 с.
5. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011.– 392 с.
6. Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Непотопляемость судов: Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2013. – 368 с.
7. Нечаев Ю.И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015.6 -315 с.
8. Нечаев Ю.И. Интеллектуальные технологии в системе исследовательского проектирования. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. – 320 с.
9. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. – М.: СИНЕГ, 1999. – 104 с.
10. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. — М.: Наука, 1990. – 341 с.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.– 285 с.
12. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // eprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>

13. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. [Электронный ресурс]: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
14. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
15. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. №3, p.p.77–84.

References

1. Zenkin A.A. Kognitivnaya computernaya graphika [Cognitive computer graphic]. - M: Science, 1991. - 192 p.
2. Kolmogorov A.N. Isbrannye trudy v 6 tomax [The selected works in 6 volumes]. - M: Science, 2005. - 304 p.
3. Cook D, Bez H. Kompjuternaja of the mathematician [Computer mathematics]. - M: Science. 1990. - 384 p.
4. Moiseyev N.N. Isbrannye trudy [The selected works], M. Tajreks Co, 2003. - 264 p.
5. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2011.
6. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2014.
7. Nechaev Yu. I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya: monografiya [Topology of nonlinear non-stationary system: theory and application]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2015.
8. Nechaev Yu.I. Intellectual of technology in system of research designing. - St.-Petersburg: Art Xpress train, 2017. - 320 p.
9. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs theory aktivnykh system [Course of the theory of active systems]. - M: SINEG, 1999. - 104 p.
10. Solodovnikov V.V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proektirovanie upravlyauschich system [The theory of complexity and designing of control systems]. - M: Science, 1990. - 341p.
11. Tikhonov A.N., Arsenin V. J. Metody reshenia nekorrektnykh sadach [Methods of the decision of incorrect problems]. M: Science, 1986. -285 p.
12. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // eprint arXiv:0901.0131, 2008. URL: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>
13. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
14. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
15. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. №3, p.p.77–84.

УДК 004.942:004.031.043

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ – ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

Юрий Иванович Нечаев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3**Олег Николаевич Петров**кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3,
e-mail: petr_oleg@mail.ru

Аннотация

Обсуждается проблема возникновения и развития нестандартной аварийной ситуации, когда затопление отсеков происходит в условиях неповрежденного корпуса судна на сильном волнении. В качестве объекта исследования рассмотрена гибель рыболовного морозильного траулера РТМ «Тукан» – аварии, анализ которой привел к появлению термина «Динамическая непотопляемость». РТМ «Тукан» типа «Тропик» постройки ГДР имел длину 71 м, мощность главного двигателя 2940 л.с., скорость 11,7 уз.; район плавания – неограниченный. Физическими особенностями, вызвавшими причины гибели судна, являются потеря остойчивости и плавучести вследствие заливания кормовой части палубы после срыва закрытия слипа. Поступление воды происходило через отверстие, образовавшееся в результате нарушения герметичности одного из люковых закрытий – затопление арматурного отделения и помещения рыбомучной установки. Неправильные действия по борьбе за живучесть судна и спасению экипажа привели к тяжелой катастрофе [1]. Как следует из описания [1], авария развивалась при необычных обстоятельствах в условиях значительной неопределенности. Анализ этой нестандартной аварии, происходившей в условиях усиливающегося шторма при неповрежденном корпусе в периодической печати с учетом сложных динамических явлений до настоящего времени не был выполнен. Тяжелый, но поучительный опыт этой аварии привел к необходимости более детального рассмотрения эволюционной динамики сложных физических процессов в рамках современной теории катастроф [2] – [10].

Ключевые слова: динамическая непотопляемость, моделирование, визуализация, современная теория катастроф, динамика взаимодействия.

MODELING OF DYNAMIC UNSINKABILITY – OCCURRENCE AND DEVELOPMENT OF AN EMERGENCY SITUATION IN STORM CONDITIONS

Yuri I. Nechaevthe professor, Dr.Sci.Tech, the of department of computer science
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation**Oleg N. Petrov**the associate professor, Ph.D., the associate professor of department of computer science
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: petr_oleg@mail.ru

Abstract

The problem of the occurrence and development of a non-standard emergency situation is discussed, when the flooding of the compartments occurs in the conditions of the intact hull of the vessel at high waves. As an object of research is taken the shipwreck of the “Tukan” fishing freezer trawler, an accident, the analysis of which led to the appearance of the term “Dynamic unsinkability”. “Tukan” had a length of 71 m, the power of the main engine 2940 hp, speed 11.7 knots.; navigation area - unlimited. The physical features that caused the shipwreck of the vessel are the loss of stability and buoyancy due to flooding of the aft part of the deck after the slip of the slip is broken. Water flowed through the hole formed as a result of a leak in one of the hatch covers - flooding of the reinforcement compartment and the premises of the fish-boring installation. Incorrect actions to fight for the survivability of the ship and rescue the crew led to a serious disaster [1]. As follows from the description [1], the accident developed under unusual circumstances in conditions of significant uncertainty. An analysis of this non-standard accident that occurred in the conditions of an increasing storm with an undamaged case in periodicals, taking into account complex dynamic phenomena, has not yet been performed.

Keywords: dynamic unsinkability, modeling, visualization, modern catastrophe theory, dynamics interaction.

Введение

В основу моделирования динамической непотопляемости приняты данные аварии РТМ «Тукан» [1] – исходное состояние нагрузки, особенности остойчивости, плавучести и посадки судна по данным информации об остойчивости и непотопляемости. В связи со значительной неопределенностью аварийной ситуации условия моделирования сформулированы на основе гипотез и упрощающих предположений. Формальный аппарат концептуальных решений сформулирован на основе исследований [2], [3], современной теории катастроф (СТК) и изобретений авторов (рис. 1) [4] – [10].



Рис. 1. Программный комплекс моделирования и визуализации аварийной ситуации

Пространство поведения аварийного судна определяется множеством состояний в виде совокупности структур динамики взаимодействия, образуемых интерпретирующими алгоритмами в процессе эволюции в нестационарной среде:

$$W(t_0) \rightarrow W^*(t) \xrightarrow{\alpha^*} W(t_1) \dots \xrightarrow{\beta^*} \dots W(t_n) \quad (1)$$

где $W(t_0)$ – исходное состояние судна; $W^*(t)$ – система, реализующая динамику взаимодействия; $W(t_i)$ и $W(t_n)$ – системы, построенные в результате использования интерпретирующих алгоритмов; α^* – преобразование (гомеоморфизм), определяющее переход системы $W^*(t)$ в $W(t_i)$; β^* – система канонических преобразований (гомоморфизмов), представленных в виде отображения преобразования информации на интервале развития аварии $[t_0, t_n]$.

Построение среды моделирования, включающей различные сочетания исследуемых сценариев взаимодействия, осуществляется в виде ситуационной модели игры с динамически меняющимся классом стратегий и управляемым сценарием. Для решения этой задачи предварительно формулируется сценарий, описываемый конечным графом [4]:

$$G = (S_s, W_s). \quad (2)$$

Здесь структура S_s представляет собой объединение рассматриваемых ситуаций с учетом контролируемых моментов времени, а структура W_s описывает переходы между ситуациями. Генерация сценариев взаимодействия аварийного

судна с внешней средой осуществляется на основе модели типа «сущность – связь» [2],[10]. В соответствии с этой структурой осуществляется формирование альтернативных вариантов (сценариев) в заданной динамической среде.

Критериальная функция формируется в зависимости от задачи интерпретации и определяет оценку ситуации в зависимости от множества решений:

$$[F(CR)] = \langle \Phi_1(I), \Phi_2(A), \Phi_3(F) \rangle, \quad (3)$$

где Φ_1 реализует выбор решения при идентификации текущей ситуации, связанной с оценкой внешнего возмущения и динамики судна, Φ_2 – выбор решения в задачах аппроксимации (оценка динамических характеристик аварийного судна), а Φ_3 – адаптивный прогноз при контроле эволюции судна в соответствии с концептуальной моделью СТК [4], адаптируемой применительно к рассматриваемой проблеме.

1. Физические особенности ситуации в рамках теории динамической непотопляемости

Рассмотрим некоторые физические закономерности эволюционной динамики аварийного судна на волнении, открывающие пути исследования гармонии и хаоса. Основное внимание сосредоточим на проблемах интерпретации колебательного движения аварийного судна в процессе развития аварийной ситуации.

Динамический образ аварийной ситуации. С позиций компьютерной математики исследуемую систему взаимодействия можно характеризовать структурой – динамическим образом [5] (рис. 2) в виде модели эволюционной динамики аварийной ситуации на основе СТК, определяющей пространства поведения и управления на интервале реализации (t_0, t_k) .



Рис. 2. Динамический образ процесса эволюции

Между исходной системой взаимодействия и ее динамическим образом существуют следующие соотношения:

- траекториям системы соответствуют различные фазы эволюционной динамики аварийного судна;
- динамический образ характеризует особенности системы взаимодействия в процессе развития аварии;

– динамический образ является отображением аварийной ситуации в условиях априорной неопределенности.

Динамический образ преобразования информации $M(i,j)$ на интервале (t_0, t_k) рассматривается как многозначное соответствие между вершинами графа-интерпретации. Такой граф определяется матрицей переходов $\Pi = \{\pi_{ij}\}$ размерностью $n \times n$. Элемент матрицы $\pi_{ij} = 1$ указывает на существование ориентируемого ребра $i \rightarrow j$, $\pi_{ij} = 0$ в противном случае. Матрица переходов при отображении поведения аварийного судна на волнении строится на основе выполнения следующих условий:

$$\pi_{ij} = 1, \text{ если } (M(i)) \cap f(M(j)) \neq \emptyset; \quad (4)$$

$$\pi_{ij} = 0, \text{ если } (M(i)) \cap f(M(j)) = \emptyset. \quad (5)$$

Граф-интерпретация аварийной ситуации (рис. 3) определяет возможные типы затопления в процессе развития эволюционной динамики. Каждая из ситуаций в процессе развития аварии характеризуется двумя факторами: наличием угла крена θ_0 и знаком начальной метacentрической высоты h_0 . При этом S_1 – состояние, при котором судно сохраняет прямое положение ($\theta = 0$) в условиях непрерывного ухудшения остойчивости и сохранении положительной начальной метacentрической высоты $h_0 > 0$ в процессе развития аварийной ситуации; S_2 – состояние, при котором происходит потеря начальной остойчивости, в результате чего аварийное судно не может находиться в прямом положении и будет плавать с креном; S_3 – состояние, соответствующее возникновению крена на правый или левый борт при отрицательной начальной остойчивости (бистабильная система); S_4 и S_5 – состояния, соответствующие потере начальной остойчивости и непрерывному изменению крена при возникновении положительного (S_4) или отрицательного (S_5) кренящего момента в процессе развития аварии; W, V – векторы, характеризующие данные о внешних силах (волнение и ветер).

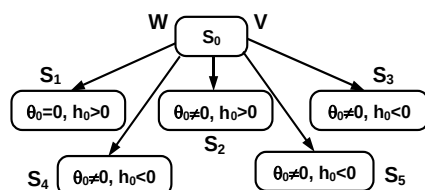


Рис. 3. Случаи затопления, реализуемые на основе динамической модели катастроф

Формирование динамического образа исследуемой ситуации реализуется на основе анализа физических картин взаимодействия, определяющих колебательные режимы при бортовой и килевой качке на волнении (рис. 4).



Рис. 4. Динамический образ эволюции системы

Аттракторные множества и хаотическая динамика аварийного судна. Модель килевой качки около нарастающего угла дифферента описана с помощью дифференциального уравнения Дуффинга [5]:

$$x'' + kx' - x + \mu x^3 = f_0 \cos(\omega t). \quad (6)$$

Если в этом уравнении для внешней периодической силы ввести третью координату (для независимой переменной), то получается система третьего порядка типа с векторным полем

$$f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -x_1^3 - kx_2 + B \cos x_3 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Эта система определяется двумя положительными параметрами: коэффициентом вязкого трения k и амплитудой возмущения B . Дивергенция отрицательная и определяется величиной трения (диссипации)

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} + \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = -k < 0. \quad (8)$$

Для системы (6) – (8) имеем следующую матрицу

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -3x_1^2 & -k & -B \sin x_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 5. При указанных значениях параметров в системе возникает хаотическое движение, что подтверждается приведенными осциллограммами (где B обозначено как β).

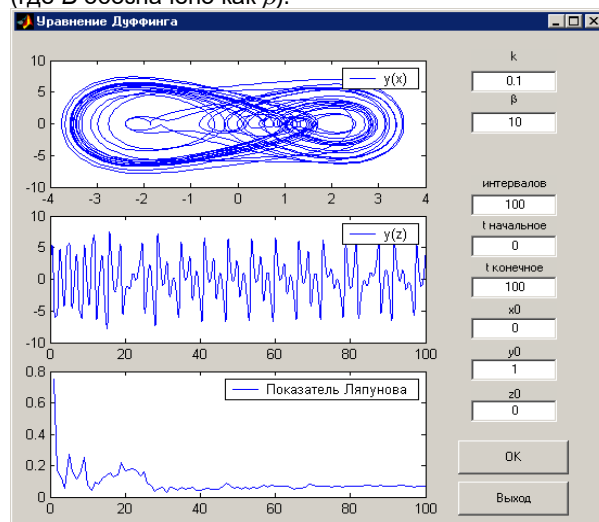


Рис. 5. Хаотический аттрактор для системы Дуффинга

На рис. 6 приведены картины формирования динамического хаоса на основе уравнения Дуффинга [5]. Здесь *а* – предельный цикл, порожденный субгармоническим каскадом бифуркаций устойчивых решений; *б* – хаотический аттрактор, порожденный каскадом бифуркаций устойчивых циклов.

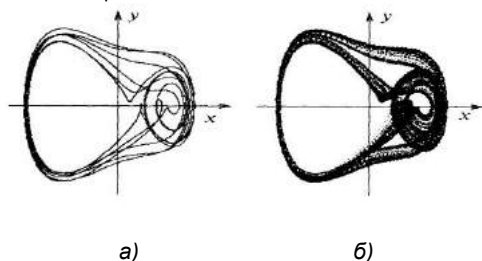


Рис. 6. Динамический хаос в нелинейной диссипативной системе, описываемой уравнением Дуффинга

Поверхность сепаратрис при интерпретации эволюционной динамики. Для характеристики аварийной ситуации, определяющей эволюционную динамику, используется метод фазовой плоскости. С помощью такого представления проанализированы траектории системы, а также одномерные отображения исследуемых аттракторных множеств [4] – [6].

Исследования поведения аварийного судна показывают, что в фазовом пространстве формируемые бифуркационные границы, по разные стороны которых система имеет качественно различный характер поведения в виде поверхности сепаратрис (рис. 7). На этом рисунке, в отличие от исследования [4], рассматриваемого совместные бортовые и поперечно-горизонтальные колебания, показана *поверхность сепаратрис*, характеризующая границы устойчивых бортовых колебаний в процессе развития дифферента.

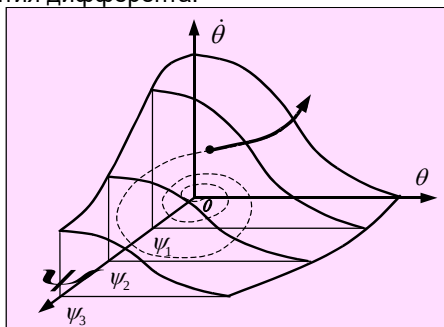


Рис. 7. Фазовая траектория и поверхность сепаратрис в трехмерном пространстве (черной точкой отмечен момент пересечения фазовой траекторией поверхности сепаратрис)

Фазовая траектория «пересекает» поверхность сепаратрис с устойчивыми колебаниями и оказывается в области неустойчивости (возникновение катастрофы), кардинально меняя свое поведение.

2. Эволюционная динамика аварийной ситуации

Стратегия моделирования предусматривала исследование поведения аварийного судна начиная с момента поступления воды в затопляемые отсеки: отсека №1 арматурного отделения и помещения рыбомучной установки, расположенного на платформе между 5 и 21 шпангоутами, и отсека №2 помещения рыбцеха на платформе 21 – 46 шпангоутов. Обработка данных моделирования позволила представить динамические картины изменения крена и дифферента на заданном интервале реализации (рис. 8 и 9).

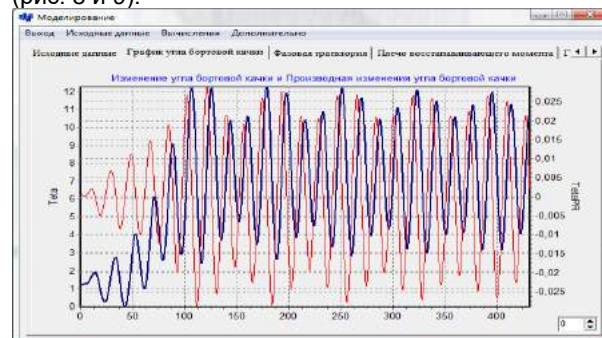


Рис. 8. Динамическая картина, характеризующая бортовую качку судна около угла крена, образовавшегося вследствие асимметричного затопления

Здесь на первом рисунке показан фрагмент начальной фазы развития аварии в процессе затопления отсека №1. Временные кривые $\theta(t)$ свидетельствуют о формировании картины смены аттрактора, когда система переходит из исходного в новое состояние, вызванное резким ухудшением метacentрической высоты в результате поступления воды в затопляемые отсеки и возникновения начального крена. Светлой кривой показаны значения ускорений при формировании аттрактора системы.

На рис. 9 отображены динамические картины увеличения крена и дифферента в условиях непрерывного изменения динамики судна и внешней среды. Кривые $\theta(t)$ и $\psi(t)$ соответствуют катастрофическому увеличению крена и дифферента при потере плавучести и устойчивости.

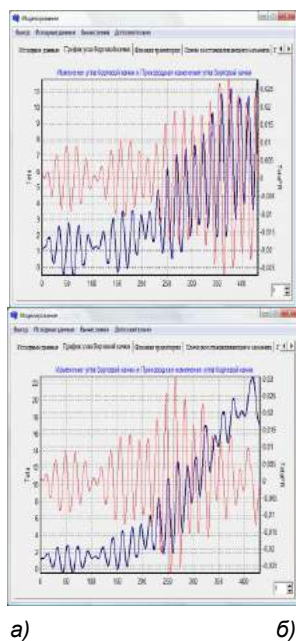


Рис. 9. Непрерывное нарастание крена (а) и дифферента (б) в процессе катастрофического затопления в условиях непрерывного изменения динамики судна и внешней среды

Таким образом, рассмотренные на рис. 8 и 9 нештатные ситуации развития аварии – типичные случаи динамики нестационарной системы, представляющей собой сложное нелинейное взаимодействие судна в аварийной ситуации. Закономерности поведения фазовых траекторий в условиях неустойчивости положены в основу формирования базы знаний динамической непотопляемости, позволяющей осуществлять анализ и прогноз экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах (ИС) новых поколений [2], [10].

3. Геометрическая интерпретация развития аварии

Интерпретация развития аварийной ситуации в рамках сценарного подхода [6] рассмотрена на основе динамической теории катастроф (рис. 10 – 12). Здесь приведены картины самоорганизации на основе геометрической интерпретации СТК – фазовый переход и развитие эволюционной динамики в условиях сильного волнения и затопления отсеков.

Геометрические образы на этих рисунках определяют бифуркационное множество $B(\theta)$, множество $GZ(\theta)$, интегрирующее восстанавливающую и возмущающую компоненты в процессе развития аварийной ситуации, и множество $C(\theta)$ изменения центра величины вследствие влияния волнения и непрерывного затопления отсеков. Светлым овалом обозначены исходные состояния множества $GZ_0(\theta)$, а темными – множества $GZ_1(\theta)$, установленные в результате затопления.

Вверху справа в светлой рамке указана исходная диаграмма остойчивости $M(\theta)$ и аварийные диаграммы, соответствующие начальной стадии развития аварии и смене

состояний $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$ для указанных случаев затопления.

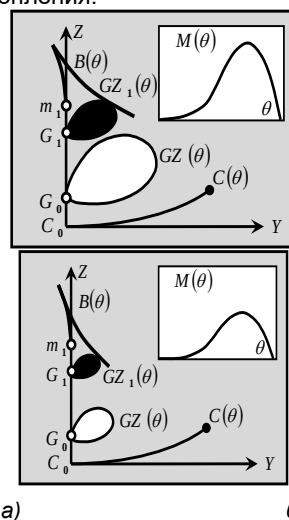


Рис. 10. Динамические модели катастрофы (а,б) в начальной стадии развития аварии

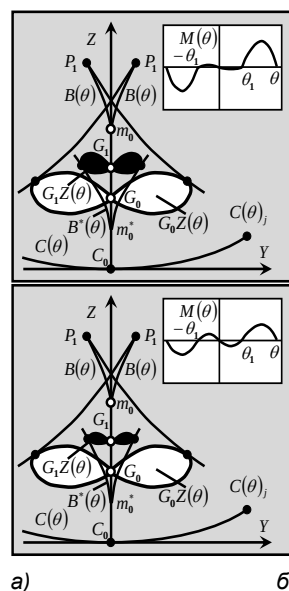


Рис. 11. Динамические модели катастрофы (а,б) при развитии аварийной ситуации в условиях фазового перехода (бистабильная система)

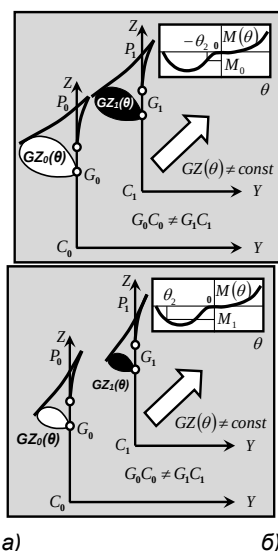


Рис. 12. Динамические модели катастрофы при возникновении (а) и развитии крена (б)

4. Когнитивный образ развития аварии

Приведенные выше случаи перестройки динамических картин взаимодействия рассмотрены на основе когнитивного моделирования [6], позволяющего представить эволюционную динамику аварийного судна в виде когнитивной карты (рис. 13).

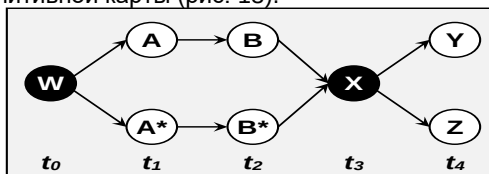


Рис. 13. Динамические картины интерпретации эволюционной динамики развития ситуаций $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$

Когнитивная карта отображает случаи взаимодействия $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$, рассмотренные на рис. 10 – 12. Интерпретация динамических картин на этом рисунке имеет следующий вид: в процессе развития аварийной ситуации на основе внешнего возмущения W (среда взаимодействия) формируются альтернативы A и A*, порождающие ситуации B ($S_0 \rightarrow S_3$) и B* ($S_2 \rightarrow S_4$). В момент времени t₃ (символ X) вследствие структурной самоорганизации происходит последовательная смена состояний, и аварийное судно оказывается в ситуации S₃ (символ Y) и S₄ (символ Z) в зависимости от цепочек, характеризующих модели эволюции $S_0 \rightarrow S_3$ или $S_2 \rightarrow S_4$.

5. Фрактальный образ развития аварии

Преобразование фрактального образа динамической непотопляемости реализуется в непрерывно изменяющейся среде [4]. Пространство поведения, определяющее движение аварийного судна на интервале реализации [t₀, t_N] с помощью фрактальной структуры отображается в виде некоторой универсальной конфигурации эволюционной динамики при заданном уровне внешних

возмущений. В качестве исходной информации для построения фрактальной структуры использованы данные развития аварии, обработанные на основе вычислительной среды поддержки принятия решений (ППР). Задача исследования фрактальной структуры рассмотрена в виде эллипса, движущегося по заданной траектории (рис. 14).

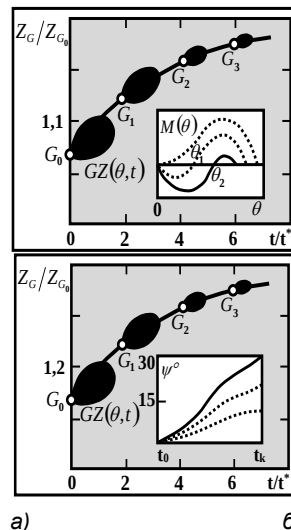


Рис. 14. Фрактальные множества, определяющие среду динамической непотопляемости на интервале реализации: а и б развитие крена и дифферента на нерегулярном волнении

Область Ω формирования фрактальной структуры Φ определяется как ограниченная конфигурация множества состояний системы в процессе ее эволюции в нестационарной среде:

$$\Omega: \Phi_0 \rightarrow \Phi_N \in [t_0, t_N] \quad (10)$$

где Φ_0 и Φ_N – начальное и конечное состояние фрактальной структуры, определяющее следующие условия:

$$\Phi_N = Attr(S_0 \rightarrow S_3), \Phi_N = Attr(S_2 \rightarrow S_4), \quad (11)$$

где $Attr(S_0 \rightarrow S_3)$, $Attr(S_2 \rightarrow S_4)$ – области притяжения аттрактора в рассматриваемых случаях взаимодействия $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$.

Отображение φ , действующее на Φ , определяет операцию сдвига (сжимающее или растягивающее отображение) фрактальной структуры в процессе эволюции в динамической среде:

$$\Phi \rightarrow \Phi, F_0 \downarrow \dots \downarrow F_N, G(F_R)_0 \rightarrow G(F_R)_M, \quad (12)$$

$$\varphi: \Phi_0 \dots \Phi_N \in [t_0, t_N], F_0 \dots F_N, G_0 \rightarrow G_M, \quad (13)$$

где $(\rightarrow, \downarrow \dots \downarrow)$ – операции сдвига, реализующие преобразование $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$; $G(F_R)_0$, $G(F_R)_M$ – области изменения элементов фрактальной структуры в зависимости от уровня действующих возмущений; $\Phi_0 \dots \Phi_N$ – отображение движения фрактальной структуры, $F_0 \dots F_N$ – модификация фрактальной структуры при эволюции на интервале реализации [t₀, t_N].

Операция сдвига определяет конфигурацию фрактального отображения при развитии эволюционной динамики в процессе самоорганизации:

$$Self(Org) \in \{P_H(Inc), P_H(Com)\}, \quad (14)$$

где $\{P_H(Inc), P_H(Com)\}$ – область, характеризующая фазы эволюции в случаях взаимодействия $S_0 \rightarrow S_3$ и $S_2 \rightarrow S_4$ (фазы расширения и сжатия фрактальной структуры).

Рассмотренная на рис. 14 фрактальная структура реализует принцип непрерывности [4] – [6], определяющий формальную модель аттракторных и фрактальных множеств эволюционной динамики системы взаимодействия:

$$\Omega(Beh) = \langle \Omega(F_R), \Omega(Attr) \rangle, \quad (15)$$

где $\Omega(F_R)$, $\Omega(Attr)$ – фрактальное и аттракторное множества, формирующее движение интерпретирующей системы при потере устойчивости и плавучести (возникновение катастрофы).

В основу интерпретации (15) положен фундаментальный принцип, состоящий в преобразовании текущей информации в пространстве поведения [4].

6. Обсуждение результатов моделирования и картин визуализации

Результаты моделирования и визуализации динамики взаимодействия позволили представить общую картину развития аварийной ситуации для использования в бортовых ИС контроля динамической непотопляемости (табл. 1).

Таблица 1

Результаты моделирования ситуации и практические рекомендации

№	Параметры			Характеристика ситуации и оценка ее опасности
	θ , град	ψ , град	h , м	
1	0	– 5	0	Ситуация аварийная средняя. Асимметричное затопление рыбцеха.
2а	– 15	– 10	– 0,3	Ситуация аварийная тяжелая. Асимметричное затопление рыбцеха и помещения рыбомучной установки
2б	– 20	– 15	– 0,5	Ситуация аварийная очень тяжелая. Продолжение асимметричного затопления указанных помещений. Надеть спасательные нагрудники и выйти на верхнюю палубу
3а	– 25	– 20	– 0,8	Ситуация критическая. Продолжение асимметричного затопления. Всему экипажу в шлюпку левого борта
3б	– 35	– 25	– 1,0	Ситуация катастрофическая. Продолжение асимметричного затопления. Потеря плавучести и устойчивости

Здесь показана общая схема исследуемого судна, аварийная ватерлиния которого непрерывно изменяется в процессе эволюции. Результаты взаимодействия отображены в виде процессов колебательного движения аварийного судна при

бортовой и килевой качке для заданного состояния затопления и интенсивности волнения. Рассмотрены следующие ситуации: исходная ситуация 1 ($\theta=0$, $h \geq 0$, $\psi=0^\circ$); ситуации 2 и 3 – после фазового перехода (2а) и резкого изменения углов крена и дифферента: (2б) : $\theta = -(15 - 20)^\circ$, $h = 0.3 - 0.5$ м, $\psi = (10 - 15)^\circ$ и критическая ситуация: $\theta = -(25 - 35)^\circ$, $h = 0.8 - 1.0$ м, $\psi = (20 - 25)^\circ$.

Отображение результатов моделирования производится в виде схемы продольного разреза судна (рис. 15), на которой высвечиваются затопленные отсеки и выводятся на экран основные динамические характеристики: значения углов крена и дифферента, а также интервала времени τ_{CR} , характеризующего эволюцию развития аварии.

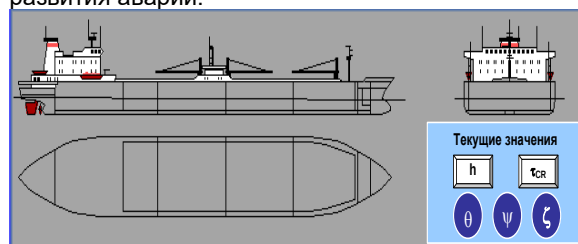


Рис. 15. Схема отсеков (продольный разрез)

При достижении каждой из характеристик критического значения) на экране появляется соответствующее значение на красном фоне.

Заключение

Таким образом, проведенное моделирование эволюционной динамики аварийного судна на волнении позволило исследовать чрезвычайную ситуацию с помощью функциональных структур, реализующих адаптивное управление и процедуры ППР в критических режимах.

Формализации процесса поиска решений при переходе состояний из возникшего критического режима позволяет исследовать следующие особенности эволюционной динамики:

- исследовать и адекватно отображать причинно-следственные отношения в области динамической непотопляемости;

- реализовать концептуальные решения при реализации системы моделирования поведения аварийного судна в нестационарной динамической среде;

- выполнить имитационное моделирование на основе реальных данных развития аварии, определяющей динамическую непотопляемость в условиях гидроаэродинамического воздействия при неповрежденном корпусе.

Проведенное в рамках разработанных концептуальных решений исследование позволило представить сложную модель взаимодействия в условиях неопределенности. Принципиальное отличие вычислительной среды динамической непотопляемости от стандартных подходов в рамках классической теории непотопляемости состоит в формализации аварийной ситуации на основе СТК и интеллектуальных технологий.

Литература

13. Бондарев, В. А. Реквием по судам Калининградского района / В. А. Бондарев, В. М. Букатый, В. А. Серенков, В. И. Тарушин // РТМ-7002 «Тукан», с.72 – 78.
14. Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 2. Корабельные системы. — М.: Радиотехника, 2006. — 80 с.
15. Нечаев, Ю. И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю. И. Нечаев // Труды 5-й всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2003». — М.: МИФИ, 2003. Лекции по нейроинформатике. Ч. 2, с.119–179.
16. Нечаев, Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография / Ю. И. Нечаев. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. — 392 с.
17. Нечаев, Ю. И., Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография / Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. — 368 с.
18. Нечаев, Ю. И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения: монография / Ю. И. Нечаев. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. — 332 с.
19. Способ контроля непотопляемости судов / Патент РФ №2518374 от 09.04. 2014 / Нечаев Ю.И.
20. Способ контроля экстремальных ситуаций в условиях неопределенности среды / Патент РФ № 2580367 от 08.06.2016 / Нечаев Ю.И., Петров О.Н.
21. Способ оперативного контроля остойчивости судна / Патент РФ № 2631127 от 19.09.2017 / Нечаев Ю.И., Петров О.Н.
22. Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. — 376 с.

References

1. Bondarev V. A. Bukatyy V. M., Serenkov V. A., Tarushin V. I. Rekviyem po sudam Kaliningradskogo rayona [Requiem on vessels of the Kaliningrad area] RTM-7002 «Tukan», pp. 72 – 78.
2. Bortovyye intellektual'nyye sistemy. CH. 2. Korabel'nyye sistemy [Onboard intellectual systems. Part 2. Ship systems] Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006.
3. Nechaev Yu. I. Matematicheskoye modelirovaniye v bortovykh intellektual'nykh sistemakh real'nogo vremeni [Mathematical modeling in real time onboard intelligence systems]. Works of 5th All-Russia scientific and technical conference «Neuroinformatic-2003». Moscow, MIFI Publ., 2003.
4. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2011.
5. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
6. Nechaev Yu. I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya: monografiya [Topology of nonlinear non-stationary system: theory and application]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2015.
7. Sposob kontrolya nepotoplyayemosti sudov [Method of the control of ships unsinkability]. The patent of Russian Federation #2518374, 09.04.2014. Nechaev Yu. I.
8. Sposob kontrolya ekstremal'nykh situatsiy v usloviyakh neopredelennosti sredy [Method of the control of extreme situations in the conditions of uncertainty of environment]. The Patent of Russian Federation #2580367, 06.08.2016. Nechaev Yu. I., Petrov O. N.
9. Sposob operativnogo kontrolya ostroychivosti sudna [Method of the operative control of ships stability]. The patent of Russian Federation #2631127, 09.19.2017. Nechaev Yu. I., Petrov O. N.
10. Sistemy iskusstvennogo intellekta v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka [Systems of an artificial intellect with intellectual technologies of the XXI century]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2011.

УДК 004.942:004.031.043

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ДИНАМИКА СУДНА АКТИВНОГО ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Юрий Иванович Нечаев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, Лощманская, 3**Александр Андреевич Турчак**

магистрант кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лощманская, 3,

e-mail: petr_oleg@mail.ru

Аннотация

Обсуждаются вопросы применения динамической искусственной нейронной сети (ИНС) глубокого обучения при маневрировании судна активного ледового плавания (АЛП) в нестационарном ледовом поле. Задача контроля эволюционной динамики судна рассмотрена применительно к ситуациям, которые характеризуются нестационарностью и хаотичностью. Эволюционная динамика судна АЛП определяется движением в сплошном ледовом поле, битых льдах и в торосах. Измерения представляют собой дискретные последовательности сигналов, полученных с помощью аналого-цифрового преобразования. Управление процессом маневрирования осуществляется на основе динамической нейронной сети глубокого обучения. Сформулированы постулаты разработки методов интерпретации искусственной нейронной сети глубокого обучения. Рассмотрены особенности модифицированного алгоритма глубокого обучения. Формальный аппарат концептуальных решений, определяющий формирование скрытых слоев в процессе маневрирования реализуется на основе достижения интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений. Представлены результаты моделирования взаимодействия судна с ледовым полем различной конфигурации.

Ключевые слова: судно активного ледового плавания, нестационарная динамическая среда, динамическая нейронная сеть, глубокое обучение.

THE EVOLUTIONARY DYNAMICS OF AN ICE CLASSED VESSEL IN A NON-STATIONARY ENVIRONMENT UNDER THE CONTROL OF A DEEP LEARNING NEURAL NETWORK

Yuri I. Nechaev

the professor, Dr.Sci.Tech, the professor of department of computer science

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

Aleksandr A. Turchak

student of department of computer science

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

e-mail: petr_oleg@mail.ru

Abstract

The issues of using a dynamic artificial neural network of deep learning when maneuvering an active ice navigation vessel in an unsteady ice field are discussed. The task of controlling the evolutionary dynamics of the vessel is considered in relation to situations that are characterized by unsteadiness and randomness. The evolutionary dynamics of a vessel of active ice navigation is determined by movement in a continuous ice field, broken ice and in hummocks. Measurements are discrete sequences of signals obtained using analog-to-digital conversion. Managing the process is carried out on the basis of a dynamic neural network of deep learning. The postulates of the development of methods for interpreting an artificial neural network of deep learning are formulated. The features of the modified deep learning algorithm are considered. The formal apparatus of conceptual decisions, which determines the formation of hidden layers in the process of maneuvering, is implemented based on the achievement of intellectual technologies and high-performance computing. The results of modeling the interaction of a vessel with an ice field of various configurations are presented.

Keywords: ice classed vessels, non-stationary dynamic environment, dynamic neural network, deep learning.

Введение

В задачах управления движением судна активного ледового плавания (АЛП) в нестационарном поле рассматривается процесс маневрирования судна под управлением динамической ИНС глубокого обучения. Модель управления, реализующая концептуальные решения Data Mining и Soft Computing, функционирует на основе данных измерений, полученных от датчиков, установленных в зоне контакта, а также системы визуализации набегающего ледового поля на верхней палубе. Стратегия управления обеспечивает решение задач идентификации, аппроксимации и прогноза в процессе маневрирования судна АЛП в сложной пространственно-временной конфигурации внешней среды (рис. 1) [1] – [5].



Рис. 1. Поток информации при контроле маневрирования судна АЛП в нестационарной среде

Обеспечение безопасности расхождения судов АЛП в заданной акватории представляется в следующем виде:

$$S(R) = \{S, M, V, E, D, X, G\}, \quad (1)$$

где $S(R)$ – ситуация в результате принятия управленческих решений; S – исходная ситуация; M – модели системы безопасности судовождения; V – альтернативы развития ситуации; E – критерии оценки эффективности управленческих решений; D – генерируемые решения; X – множество состояний судна АЛП; G – цель управления при расхождении судов.

1. Измерительная технология

Разработанная измерительная технология помимо датчиков деформации корпуса и датчика расстояния на верхней палубе судна АЛП, использует видеокамеру, установленную совместно с этим датчиком. Такая интеграция позволяет реализовать трехмерную сегментацию ледовых образований на сложной динамической сцене взаимодействия с использованием трехмерного видео-сенсора окружающего пространства, установленного на судне при движении в ледовом поле со сложным рельефом (рис. 2).

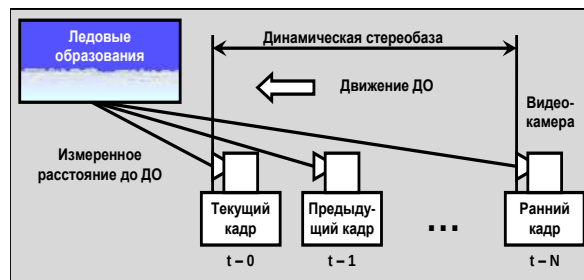


Рис. 2. Трехмерный сенсор, обеспечивающий сканирование набегающего ледового образования на основе обработки данных с видеокамеры

Совмещение объектов на соседних кадрах позволяет для движущегося судна оценить расстояния до набегающего ледового поля и построить рельеф окружающего пространства. В этом случае стереобазой служит пройденное судном расстояние. Таким образом, стереобаза является динамической и может изменяться путем коррекции скорости движения на основе данных прогноза.

Измерения представляют собой дискретные последовательности сигналов, полученных с помощью аналого-цифрового преобразования (АЦП). На выходе АЦП формируется матрица наблюдений. С помощью системы селекции из указанной матрицы выделяется субматрица наблюдений таким образом, чтобы основные сигналы, определяющие динамику взаимодействия, занимали ее центральную часть. Временной ряд, характеризующий универсальную модель взаимодействия с «быстрой» и «медленной» динамикой, представлен на рис.3.

Как следует из этого рисунка, динамический ряд представляет собой универсальную структуру, позволяющую моделировать процессы взаимодействия судна АЛП с ледовыми образованиями, характеризующимися «быстрой» и «медленной» динамикой. «Быстрая» динамика определяет режимы взаимодействия со стационарным и движущимся ледовым полем, а «медленная» динамика – режимы взаимодействия с торосами и сложными ледовыми образованиями. Временной интервал, фиксируемый на оси абсцисс, может изменяться в зависимости от ледовых образований и условий взаимодействия судна с ледовым полем.

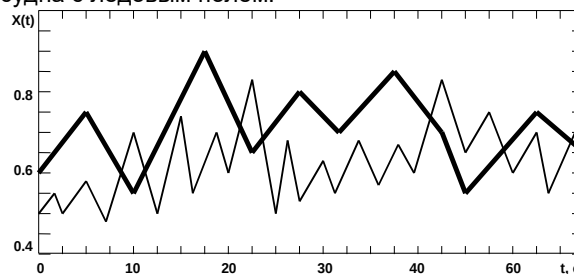


Рис. 3. Временной ряд, описывающий модель взаимодействия судна с ледовыми образованиями при различном характере внешних возмущений

2. Нестационарная среда моделирования

Моделирование эволюционной динамики ИНС глубокого обучения определяется сложной структурой взаимодействующих объектов в нестационарной среде. Развитие подходов к моделированию динамики ИНС связана с тем, что используемые в данной области модели взаимодействия обладают сложной структурой и описываются в виде различных формализмов. Исследование поведения судна АЛП в моделях интерпретации требует применения современных информационных технологий: сложность моделей интерпретации и большое число взаимодействующих компонент, особенности развития ситуаций в сложной динамической среде. Учет этих особенностей связан с необходимостью разработки методов интерпретации ИНС глубокого обучения в рамках следующих постулатов:

Постулат 1. Математическое описание динамики ИНС представляет собой сильно связанную структуру с динамически изменяющимися связями, что затрудняет реализацию процедур интерпретации и распараллеливания вычислений.

Постулат 2. Процессы взаимодействия в нестационарной среде зависят как от внешних, так и от внутренних факторов, связанных с адаптацией и самоорганизацией. Это приводит к различиям в количестве операций над элементами эволюционирующей системы и существенной неоднородности вычислений с использованием методов балансировки вычислительной загрузки.

Постулат 3. Симптомы и причины возникновения критических явлений в нестационарной среде требуют привлечения современного аппарата анализа закономерностей и феноменов взаимодействия, многообразия внешних и внутренних факторов. Интеграция общего поведения МДО в сложных условиях требует использования технологий Data Mining и Soft Computing [1].

Постулат 4. Критические явления в процессе эволюции судна АЛП относятся к редким событиям, что затрудняет использование вероятностных оценок и соответствующего риска при выполнении требований модельного воспроизведения всего ансамбля поведения судна АЛП и возможных состояний среды взаимодействия. В результате увеличиваются общие требования к вычислительным ресурсам и эффективности их использования в критических режимах.

Постулат 5. Взаимодействующие структуры в нестационарной среде содержат большие объемы данных, хранение и обработка которых ведется с использованием технологии Big Data [1].

Реализация ИНС глубокого обучения потребовала организации программного комплекса ППР с использованием интеллектуальной поддержки в рамках сервисно-ориентированной архитектуры интерфейса (COA) [1].

3. Парадигма ИНС глубокого обучения в нестационарной среде

ИНС глубокого обучения (рис. 4) имеет множество скрытых слоев, подверженных

раздельному обучению в условиях нестационарности среды взаимодействия.

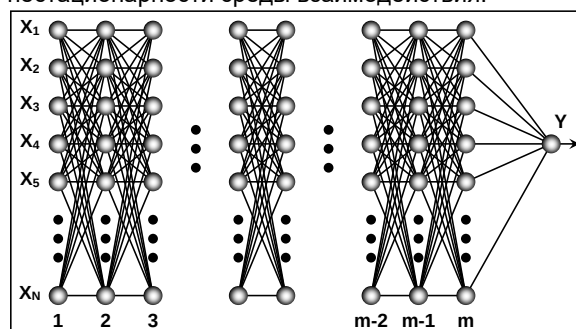


Рис. 4. Интегрированная ИНС с множеством скрытых слоев: (1 – 3) – входной и t – выходной слой

Поле обучения и верификации ИНС изменяют чувствительность к входным параметрам и степени их влияния на прогнозируемые результаты. ИНС может воспринимать практически любое число входных параметров. Эффективность ИНС в нестационарной среде существенно повышена на счет модификации концепции *глубокого и итерационного обучения* [2],[4].

Таким образом, моделирование эволюционной динамики судна АЛП является ресурсоемкой задачей, а многомасштабность, связность и динамическая изменчивость среды взаимодействия требуют эффективного использования существующих методов и алгоритмов.

При обучении ИНС на начальной стадии формирования алгоритма интерпретации динамики взаимодействия был применен метод обратного распространения ошибки (*Backpropagation*). Единственным условием применения данного метода является то, что передаточная функция нейронов должна быть дифференцируема. Процесс распространения ошибки для исходной нейронной сети, состоящей из 3 слоев представлен на рис.5 – 7.

Рассмотрим некоторые особенности модифицированного алгоритма *глубокого обучения* на основе следующих процедур:

Процедура 1. Переход от *усеченного* линейного преобразования (Rectified Linear Unit – RLU) к более сложной модели, отображающей динамические процессы функции интерпретации.

Процедура 2. Учет пространственно-временной конфигурации внешней среды, требующей использования модифицированной модели *стохастического* градиентного спуска (Stochastic Gradient Descent – SGD) на каждом шаге оценки градиента ошибки интерпретации.

Процедура 3. Разработка алгоритма глубокого обучения на основе нормализации формируемой выборки (Batch Normalization) для обеспечения стабилизации текущих оценок для каждого входа нейронов.

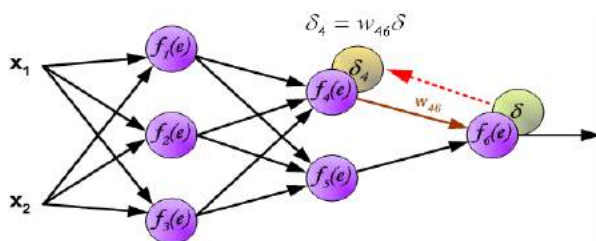


Рис. 5. Расчет величины ошибки для нейронов выходного слоя.

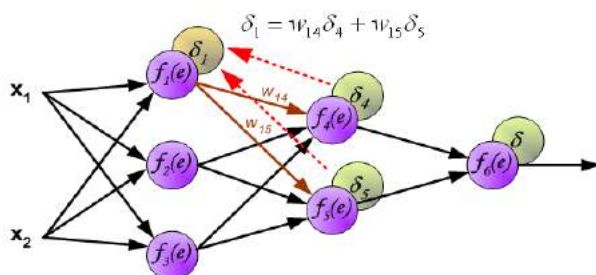


Рис. 6. Расчет величины ошибки для нейронов скрытого слоя.

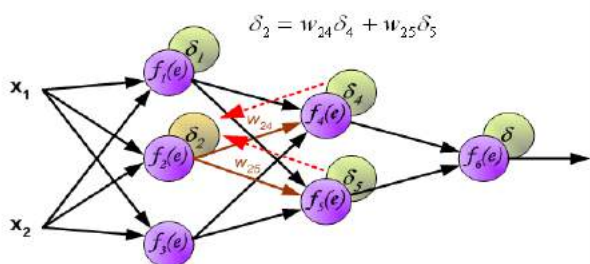


Рис. 7. Расчет величины ошибки для нейронов скрытого слоя. Шаг 2.

Концептуальные решения, формирующие структуру моделей динамики взаимодействия на основе процедур 1 – 3, представляет собой отображение $f: U \rightarrow U^*$ интегрированной модели глубокого обучения ИНС на основе следующих определений.

Определение 1. Отображение f характеризует преобразование информации об особенностях эволюционной динамики интерпретируемой системы глубокого обучения в виде направленного множества:

$$U(t_0, t_k) \Rightarrow U^*(R_1, R_2, R_3)[f_t \in \Omega], \quad (2)$$

где $U(t_0, t_k)$ – многорежимное управление, обеспечивающее функционирование ИНС на интервале реализации; $U^*(R_1, R_2, R_3)$ – функция интерпретации, формирующая управление в зависимости от сложности и неопределенности контролируемой ситуации при выполнении задач по алгоритма глубокого обучения; Ω – область допустимых значений параметров взаимодействия.

Определение 2. Функции интерпретации для выделенных режимов R_1, R_2, R_3 задач глубокого обучения в условиях неопределенности определяется кортежем:

$$U^*(R_1, R_2, R_3) = \langle U_1(Int), U_2(G), U_3(F) \rangle, \quad (3)$$

где $U_1(\bullet)$, $U_2(\bullet)$, $U_3(\bullet)$ – структуры управления, реализующие модели функций интерпретации $U_1(Int)$, пространственно-временной конфигурации внешней среды $U_2(E)$ и нормализации выборки $U_3(N)$.

Определение 3. Обеспечение многорежимного управления достигается за счет реализации ансамбля нейроконтроллеров [3], осуществляющего режим управления R_1 на базе процедуры перехода к более сложной модели интерпретации динамики взаимодействия; режим управления R_2 , реализующий стратегию учета конфигурации внешней среды; режим управления R_3 нормализации формируемой выборки данных для обеспечения стабилизации текущих оценок для каждого входа нейронов.

При использовании разработанной стратегии интерпретации ИНС глубокого обучения на базе определений 1 – 3 сохраняется исходная модель, заложенная при начальном обучении, а новые параметры вносятся без проблемы *забывания*. Эта необычная сеть имеет множество скрытых слоев, подверженных разделному обучению в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [5].

4. Алгоритм и стратегии управления

Процедуры, реализующие разработанную стратегию динамической модели глубокого обучения на основе разработанного алгоритма представляет цепочку преобразований:

$$X_1(T, S) \Rightarrow Y_1(Out), \dots, X_n(T, S) \Rightarrow Y_n(Out), \quad (4)$$

где компоненты $X_1(T, S), \dots, X_n(T, S)$ определяют функции интерпретации на каждом шаге эволюции, а $Y_1(Out), \dots, Y_n(Out)$ – результаты прогноза исследуемого параметра.

Реализация функции управления при планировании операций контроля эволюционной динамики МДО зависит от вектора параметров $X \in R^n$, определяющих поведение и вектора состояния среды взаимодействия $W \in R^m$ в заданном режиме. Если $[X, W] \in A$, то генерируемое решение с вектором параметров X обеспечивает поддержание состояния МДО, характеризуемого вектором W . Если же $[X, W] \in B$ то планируемые операции приводят к неэффективной работе системы поддержки управленческих решений. Приведенные условия определяют решение задачи выбора стратегических решений

$$x^*(X, W) > 0, \forall (X, W) \in A; \quad (5)$$

$$x^*(X, W) < 0, \forall (X, W) \in B, x^* \in X^*, \quad (6)$$

где x^* – выбранный класс разделяющих функций.

Генерация альтернатив позволяет сформировать обобщенный сценарий развития ситуации при формировании стратегии глубокого обучения в нестационарной динамической среде. Используя понятия теории принятия решений, можно идентифицировать следующие типы переменных:

$$\langle Str(P), Out(P), E(P) \rangle, \quad (7)$$

где $Str(P)$ – стратегии планирования; $Out(P)$ – исходы, которые можно осуществить при интерпретации ситуации; $E(P)$ – эффективность,

которая выражает соотношения между стратегиями планирования и исходами.

5. Эффективность стратегических решений

Функция цели при реализации динамики ИНС глубокого обучения определяет рациональные траектории судна АЛП из исследуемого состояния. Маневренность состояния характеризуется суммарной величиной вариантов рационального управления для всех состояний, через которые проходит траектория движения в рассматриваемой нестационарной среде:

$$M_i = k_m (R_i / N_i)^{(1-k)} (1 - \prod_{j=0}^n (1 - M_j)), \quad (8)$$

где M_i – маневренность i -го состояния; R_i – количество генерируемых траекторий, начинающихся в i -м состоянии; N_i – общее количество целевых траекторий, начинающихся в i -м состоянии; k – коэффициент учета маневренности M_j следующих состояний (от 0.6 до 1.0).

Управляющее воздействие, с помощью которого устанавливается однозначность решения задачи адаптивной идентификации, определим как $u(t)$. С учетом этих обозначений можно записать:

$$S(t)(a(t), u(t)) \in S(t)^*(a(t), u(t)), \quad (9)$$

где $S(t), S(t)^*$ – текущая и эталонная ситуации; $a(t)$ – параметры задачи, решаемой в момент времени t .

Интервал времени, на котором решается текущая задача оперативного контроля при известных параметрах и управляющих воздействиях, обозначим как $[t_0, t_k]$. Тогда необходимые данные в интерпретируемой ситуации, определяется структурами:

$$D_{1i} \in \{D_1\}, (i = 1, \dots, m), D_{2j} \in \{D_2\}, (j = 1, \dots, n),$$

$$m \ll |\{D_1\}|, n \ll |\{D_2\}|, \quad (10)$$

где m, n – количество данных измерений, моделирования и априорной информации, характеризующих текущую ситуацию, а символ $\ll$ определяет упорядочение данных по степени важности.

Эффективность реализации динамики ИНС глубокого обучения в нестационарной среде определяется оператором, характеризующим стратегию поведения судна АЛП:

$$F = \{F_1, \dots, F_N\} : x_i(t) = F(W_1, \dots, W_k, x_1^0, \dots, x_n^0), \quad (11)$$

где W – множество исходных переменных, характеризующих состав, структуру и свойства компонентов судна АЛП и окружающей нестационарной среды; $x_i(t)$ – множество переменных состояния и объектов моделирования, характеризующих преобразование информации при формировании скрытых слоев модифицированной ИНС глубокого обучения.

6. Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены на рис. 8, 9. Программная реализация взаимодействия судна АЛП с ледовым полем различной конфигурации на этих рисунках

обеспечивает визуализацию в виде графических полей, которые наглядно демонстрируют работы интерпретирующей системы в условиях нестационарной динамики ледовых образований.

При интерпретации результатов моделирования использованы различные представления графических полей: *поле 1* предназначено для отображения общего процесса прохождения судна на заданном отрезке пути; *поле 2* представляет изменение толщины льда на выделенном отрезке пути; *поле 3* иллюстрирует работу НФС и представляет рельеф ледового поля и движение судна, обозначенное в виде исходной позиции, поворотов направо и налево, сохранения курса. Функциональная модель контроля движения в нестационарном ледовом поле представлена на рис. 10.

Разработанная стратегия маневрирования в нестационарном ледовом поле для заданного района плавания приводит к формированию до 100 скрытых слоев ИНС в зависимости от конфигурации ледовых образований.

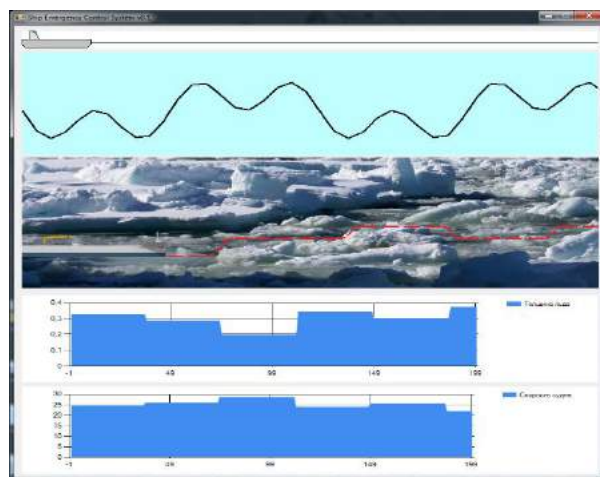


Рис. 8. Графическое окно программы среды моделирования в режиме движения в торах

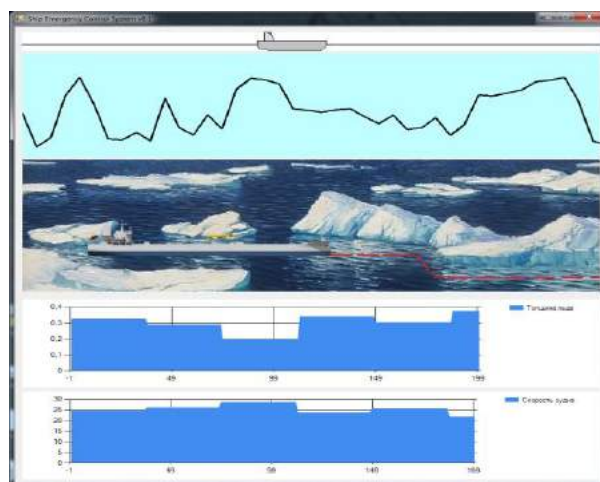


Рис. 9. Графическое окно программы среды моделирования в режиме движения в условиях битого льда



Рис. 10. Функциональная модель контроля динамики ИНС в нестационарной среде

Основные классы управляющей программы включают следующие интерпретации:

- GraphicsManager.cs. Реализует построение графиков, а также обновление поступающих данных;
- SectionGraphics.cs. Обеспечивает контроль графика толщины льда в разрезах;
- NeuralNetwork.cs. Описывает нейронную сеть. Опираясь слоями ИНС, осуществляет контроль их обучения и функционирования;

- Layer.cs. Описывает слой нейронной сети. Осуществляет контроль обучения и функционирования над нейронами ИНС;
- Neuron.cs. Описывает нейрон сети. Осуществляет обработку поступающих с предыдущего слоя данных.
- FileManager.cs. Выполняет функцию между ИНС и файлами. Осуществляет загрузку и сохранение памяти сети.
- MemoryGenerator.cs. Ответственен за создание/генерацию памяти сети в случае, если файл памяти (memory.txt) отсутствует.

Заключение

Таким образом, разработанная интеллектуальная технология контроля эволюционной динамики судна в нестационарном ледовом поле позволяет сделать следующие выводы:

- система управления, основанная на НФС, открывает новые возможности создания алгоритма оперативного контроля поведения судна АЛП как многорежимной системы в нестационарном ледовом поле различной конфигурации;
- использование динамической ИНС глубокого обучения обеспечивает настройку интерпретируемой системы в режиме экстренных вычислений;
- топологический синтез ИНС глубокого обучения реализован при создании интеллектуальной системы управления движением судов АЛП в нестационарной ледовом поле различной конфигурации.

Литература

1. Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. – Санкт-Петербург. Арт-Экспресс, 2018. – 384 с.
2. Николаенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – Санкт-Петербург: Питер. 2018. – 480 с.
3. Brusov V.S., Tiumentsev Yu.V. High performance aircraft flight control based on artificial neural networks // Proc. Of the RRDPAE-96. Warsaw.1997, p.p.97–100.
4. Hinton G et al. A fast learning algorithm for deep belief nets // Neural Computation. – 2006. v.58. №7, p.p. 1527 – 1554.
5. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

References

1. Nechaev Yu. I. Sovremennye problemy informatiki i vychislitel'noy tekhniki [Modern problems of computer science and computer engineering]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2018.
2. Nikolaenko S, Kadurin A., Arkhangelskaya E. Glubokoe obuchenie [Deep learning]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2018
3. Brusov V.S., Tiumentsev Yu.V. High performance aircraft flight control based on artificial neural networks // Proc. Of the RRDPAE-96. Warsaw.1997, p.p.97–100.
4. Hinton G et al. A fast learning algorithm for deep belief nets // Neural Computation. – 2006. v.58. №7, p.p. 1527 – 1554.
5. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

УДК 004.023:004.891.2:004.855.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИН

Иван Андреевич Янчин

аспирант

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3

e-mail: yanchin@pm.me

Олег Николаевич Петров

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3,

e-mail: petr_oleg@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается задача о прогнозировании изменения глубин некоторой области вследствие приливно-отливных течений. В работе рассматриваются две наиболее распространённые модели машинного обучения, используемые для решения подобного рода задач: линейные регрессионные модели и искусственные нейронные сети. Целью исследования являлось получение модели, осуществляющей прогнозирование значения глубины области на основе некоторого количества предыдущих значений. Частью исследования являлся выбор оптимального количества таких значений, а следовательно – оптимального числа входов модели. В работе рассматривается зависимость точности модели от количества входов, и делается вывод об оптимальном количестве входов. Работе также описывает набор данных, использованный для обучения моделей, и преобразования данных, которые необходимы для эффективного обучения моделей. На основании сравнения ожидаемых величин и прогнозов, полученных разными моделями, делается вывод о применимости этих моделей для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, прогнозирование периодической функции, искусственная нейронная сеть, линейная регрессия.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR REGRESSION MODELS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR DEPTH CHANGE PREDICTION

Ivan A. Yanchin

postgraduate student of department of computer science

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

e-mail: yanchin@pm.me

Oleg N. Petrov

associate professor, Ph.D., associate professor of department of computer science

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

e-mail: petr_oleg@mail.ru

Abstract

The paper is dedicated to prediction of water depths of an area caused by tides. The paper describes two machine learning model that are often used for this problem: linear regression models and artificial neural networks. The goal of the research was to design a model that is capable of predicting depth changes using previously measured depths. Additional goal was to determine the optimal number of such measures and, therefore, the number of model's inputs. The paper describes the dependency between the model accuracy and the number of inputs the model has. Based on this dependency we conclude on the optimal number of inputs. The paper also describes the dataset used to train the models and additional transformations, applied to the data, that are essential for the optimal model training. Based on the comparison of these models and comparison of the expected and the predicted values we conclude on the models' suitability for the aforementioned problem.

Key words: time series prediction, periodic function prediction, artificial neural network, linear regression.

Введение

При планировании достаточно протяжённого маршрута судна важным становится влияние изменений глубин области на возможность прохождения по этому маршруту. Так как

прохождение по маршруту занимает продолжительное время, то глубины отдалённой области могут измениться вследствие приливно-отливных течений к тому моменту, когда судно прибудет в эту область. Исследования показывают, что в изменение глубин акватории наибольший

вклад вносят именно приливно-отливные течения [1]. Таким образом, при решении задачи о построении маршрута движения судна, прохождение по которому займёт продолжительное время (более нескольких часов) важным становится прогнозирование изменения глубин по маршруту следования как результата влияния приливно-отливных течений. Знание об изменении глубин с течением времени позволит планировать маршрут так, чтобы предотвращать попадание судна в область, глубины которой недостаточны для безопасного прохождения, но которые были достаточны на момент планирования маршрута. Помимо обеспечения безопасности, учёт погодных условий, к которым относятся и приливно-отливные течения, позволяет снизить издержки при перевозке грузов морским транспортом [8].

Для решения этой задачи может быть осуществлено прогнозирование изменения глубин исследуемой области с целью определения искомой величины в тот момент времени, когда ожидается прохождение судна.

Особенностью задачи прогнозирования глубин является то, что если представить глубину как функцию от времени $d = depth(t)$, то такая функция будет периодической. Это связано с тем, что глубины изменяются с течением времени по периодическому закону и за периодом малых глубин следует период больших. В то же время, вычисление глубины некоторой области как функции от времени может оказаться невозможным, так как в этом случае зависимость должна быть известна заранее, то есть функция $depth(t)$ должна быть задана. Кроме этого, в этом случае должен быть использован ансамбль функций, так как в разных географических областях зависимость глубины от времени может различаться вследствие особенностей рельефа или иных факторов.

Вместе с этим, величина изменения глубин области зависит не только от времени, но и от внешних физических процессов, таких как гравитационное взаимодействие Земли, Луны и Солнца, ветра, а также приливно-отливных процессов в сообщающихся водоёмах [2]. Из-за этих внешних влияний, характеристики изменения глубин как колебательного процесса могут отличаться для разных периодов, так, может отличаться как амплитуда колебаний, так и продолжительность одного периода. Отличия могут быть достаточно существенными для того, чтобы процесс не мог быть представлен как гармонический колебательный процесс. С учётом того, что значения глубин зависят от множества факторов, их моделирование на основе этих факторов выглядит нецелесообразным. Вместо этого, более рациональным может быть прогнозирование изменения глубин на основе предыдущих значений, измеренных в течение некоторого времени. Другими словами, прогнозирование изменения глубин некоторой области может быть представлено как прогнозирование величины периодической функции на основе известных значений этой функции.

Использование прогностических моделей для прогнозирования периодических функций может представлять собой непростую задачу, так как модель должна быть способна обработать интервалы возрастания величины, интервалы её убывания, а также интервалы, когда один тип изменения величины сменяется другим.

1. Рассматриваемые модели

Обычно анализ свойств изменения глубин, вызванных приливно-отливным течением, производится с помощью гармонического анализа [1, 2]. Этот метод представляет анализируемые значения как зависящие от большого числа параметров, причем некоторые из таких параметров могут быть определены только на основе многолетних наблюдений (так как некоторые циклические процессы имеют период, исчисляемый годами), из-за чего использование этого метода анализа может оказаться невозможным [13].

Другим способом решения этой задачи являются статистические методы прогнозирования [9], однако эти методы могут иметь те же недостатки, что и гармонический анализ, и также требовать наличия больших объёмов исходных данных, чтобы иметь возможность корректно установить статистические зависимости.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходим большой объём входных данных, независимо от того, какой метод используется. Для решения подобных задач могут быть использованы методы, относящиеся к области машинного обучения. Наиболее часто для решения задач о прогнозировании величин используются регрессионные модели и искусственные нейронные сети. В настоящей работе рассматриваются оба этих класса моделей.

2. Набор данных

Набор данных, использованный для обучения и тестирования моделей, представляет собой замеры глубин, полученные с 10 мареографов, расположенных в разных частях океанского побережья США, сделанных в период с 01.01.2016 по 31.12.2017. Набор данных состоит из 1,75 млн. строк, где каждая строка соответствует одному замеру глубины. Мареографы выполняли замеры каждые 6 минут (из расчёта 10 замеров в час). Этот набор данных выбран из-за того, что, во-первых, он включает замеры, сделанные несколькими мареографами, расположенными в разных географических точках, во-вторых, из-за того, что он может быть свободно получен с официального веб-сайта Национального Управления Океанических и Атмосферных Исследований США [12], и, в-третьих, формат, в котором предоставляются данные таков, что возможны его автоматическая загрузка и обработка.

Хотя изменение глубин является периодическим процессом, колебания отличаются между собой даже для одного и того же мареографа и в течение одного дня. На рисунке 1 представлен график изменения глубин с течением времени, охватывающий период с 03.04.2016 по 05.04.2016, включительно. Из графика видно, что

амплитуды колебаний различаются между собой, в то время как период колебаний практически постоянный. Кроме этого, форма графика отличается для разных колебаний, что говорит об изменении характеристик процесса под влиянием внешних факторов.

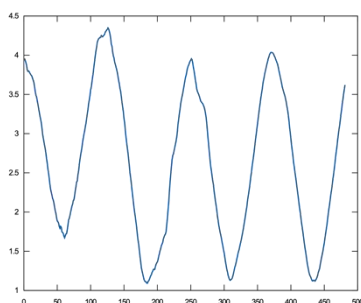


Рис. 1. График изменения глубин с течением времени. Вертикальная ось – глубина, метры, горизонтальная ось – порядковый номер замера глубины.

С учётом вышесказанного, задачей модели является прогнозирование глубин на основе более ранних значений, то есть прогнозирование $n+1$ значения на основе n значений. При этом предполагается, что эти значения получены последовательно, с одинаковым шагом между двумя идущими подряд значениями и что значения представлены именно в том порядке, в котором они были получены. Кроме этого, предполагается, что временной промежуток между последним замером и тем моментом времени, для которого выполняется прогнозирование, равен или близок ко времени между двумя последовательными замерами. Набор данных, используемый для обучения и тестирования модели, состоит из коротежей вида

$$T = (X, a_X)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n-2}, x_n)$ – измеренные значения глубин, а a_X – ожидаемое от модели выходное значение. Таким образом, используется метод скользящего окна, который показал хорошие результаты при прогнозировании временных рядов [7]. Целью обучения модели является минимизация разности между ожидаемыми величинами, и величинами, полученными в результате прогнозирования.

Для обучения и тестирования набор данных был разделён на две части: обучающую и тестовую выборки. Кorteжи из обучающей выборки использовались для обучения модели и расчёта ошибки при обучении, а corteжи из тестовой выборки никогда не использовались для обучения. Как следствие, при вычислении выхода модели для тестовой выборки, вычисляется выход для ранее неизвестных модели данных, что позволяет оценить реальную точность модели.

Так как результаты измерений глубин могут отличаться для одного и того же водного объекта в зависимости от места выполнения измерений [1], то для обучения модели следует использовать данные, полученные от разных мареографов.

Очевидно, что прогнозировать абсолютные величины глубин не имеет смысла, так как в этом случае модель не будет универсальной: она «научится» прогнозировать значения для конкретной географической области. Кроме этого, известно, что чем меньше абсолютная величина признака, используемого для обучения, и чем ближе диапазоны значений разных признаков, тем меньше время требуется для завершения обучения и тем лучший результат демонстрирует модель, как следствие применяются специальные методы нормализации признаков [14].

С учётом вышесказанного, в рамках настоящей работы выполняется прогнозирование изменения глубины относительного базового значения, которое является средним значением глубин для всех мареографов, другими словами, прогнозируется то, насколько глубина изменится относительно средней глубины. Возможен выбор другого базового значения, в общем случае предполагается, что это значение сравнительно легко получить, например, оно может быть тем значением глубины, которое обозначено на карте.

При таком методе представления глубин величины могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. В работе [14] отмечается, что метод нормализации признаков MinMax сохраняет их свойства и взаимные характеристики. На основании этого, для нормализации признаков, используемых для обучения и тестирования моделей в настоящей работе, использовался метод нормализации MinMax.

В процессе анализа набора данных было обнаружено, что данные содержат разрывы: для некоторых мареографов отсутствуют данные замеров глубин для некоторых временных промежутков, однако информация о самом замере в наборе данных присутствует. Такие «пустые» замеры были удалены из набора данных, и не использовались ни при расчёте среднего значения глубины, ни при обучении, ни при тестировании моделей.

3. Сравнение моделей

3.1. Линейная регрессионная модель

Ранее в работе [3] уже рассматривалась аналогичная задача, однако использовались синтетические данные. Из этой работы следует, что использовать нелинейные регрессионные модели не имеет смысла: модель «учится» игнорировать нелинейные компоненты и полагается только на линейные. Как следствие, в настоящей работе рассматривались только линейные регрессионные модели.

Одним из этапов подготовки прогностической модели является выбор количества входов этой модели. Если у модели недостаточное количество входов, то она не сможет учесть нюансы изменения прогнозируемой величины, но если входов слишком много, то модель будет уязвима к переобучению. Кроме этого, увеличение количества входов модели приводит к тому, что в случае использования в качестве входных значений замеров глубин, может потребоваться ожидать более продолжительное время, прежде

чем будет выполнено необходимое количество замеров. Таким образом, уменьшение количества входов модели также является целью исследования.

На рисунке 2 показан график изменения величины ошибки для обучающей выборки в зависимости от количества входов. Как видно, с ростом числа входов величина ошибки уменьшается, однако при достижении четырёх входов скорость снижения ошибки падает и в дальнейшем ошибка практически не меняется.

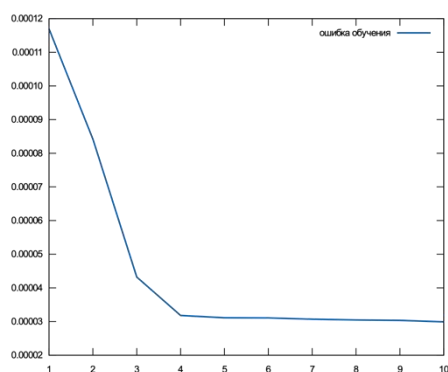


Рис. 2. Изменение ошибки при обучении при изменении количества входов модели. Вертикальная ось – величина ошибки, горизонтальная – количество входов модели.

В таблице 1 приведены данные об ошибке модели на тестовой выборке в зависимости от количества входов. Как видно, наименьшая величина ошибки достигается при четырёх входах. При этом видно, что с увеличением количества входов свыше четырёх величина ошибки возрастает. Увеличение ошибки на тестовой выборке при сохранении небольшой ошибки обучения обычно указывает на переобучение. На рисунке 3 показан результат выполнения прогнозирования для части тестовой выборки. Как видно, в большинстве случаев прогнозируемое значение близко к ожидаемому, однако в сложных случаях модель ошибается, сохраняя, тем не менее, возможность верно прогнозировать форму графика изменения глубин.

Таблица 1
Зависимость ошибки на тестовой выборке от количества входов модели.

Количество входов	Ошибка	Количество входов	Ошибка
1	$7.1884 \cdot 10^{-5}$	6	$6.0463 \cdot 10^{-6}$
2	$1.9106 \cdot 10^{-5}$	7	$6.2568 \cdot 10^{-6}$
3	$6.0107 \cdot 10^{-6}$	8	$6.4850 \cdot 10^{-6}$
4	$5.7984 \cdot 10^{-6}$	9	$6.6489 \cdot 10^{-6}$
5	$5.9993 \cdot 10^{-6}$	10	$6.4017 \cdot 10^{-6}$

Таким образом, среди рассмотренных линейных регрессионных моделей наилучшие результаты демонстрирует модель с четырьмя входами.

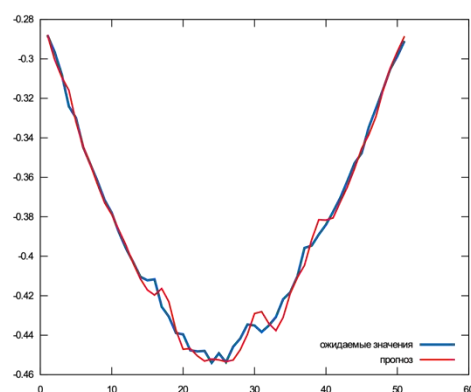


Рис. 3. Сравнение ожидаемых значений глубин и величин, полученных в результате прогноза.

3.2. Искусственная нейронная сеть

Многослойные искусственные нейронные сети могут быть использованы для решения различных задач, от прогнозирования временных рядов до распознавания изображений [11]. При использовании многослойных нейронных сетей характерным является увеличение сложности обучения с увеличением количества слоёв и количества нейронов в каждом слое, так как возрастает количество параметров, изменяемых в процессе обучения [5,15].

Целью этой части исследования является установление оптимального количества входов искусственной нейронной сети. На рисунке 4 показана зависимость ошибки для обучающей выборки от количества входов нейронной сети. Во всех случаях использовалась нейронная сеть с одним скрытым слоем с 10 нейронами, функцией активации ReLu, и линейной функцией активации в выходном слое, для обучения использовался метод оптимизации Adam [10], а для разработки архитектуры сетей и обучения использовался пакет Keras [4]. При такой архитектуре, сеть имеет сравнительно небольшое количество изменяемых в процессе обучения параметров, что позволяет снизить сложность процесса обучения. Обучающая и тестовая выборки были теми же, что и для линейной регрессионной модели. Как и в случае регрессионной модели, оптимальным является четыре входа (таблица 2).

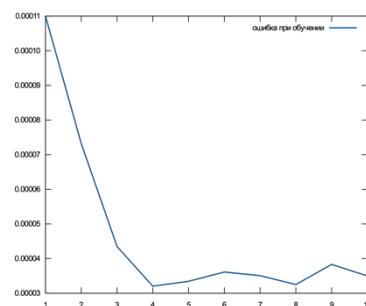


Рис. 4. Изменение ошибки при обучении при изменении количества входов нейронной сети. Вертикальная ось – величина ошибки, горизонтальная – количество входов модели.

Как видно, наименьшее значение ошибки достигается для сети с шестью входами, однако модель с четырьмя входами показывает лишь немногим большее значение ошибки, а модель с меньшим числом входов предпочтительнее, так как каждый вход модели соответствует замеру глубины. Так как замеры выполняются с некоторой периодичностью, уменьшение их требуемого количества приводит к уменьшению времени, в течение которого судно должно ожидать, не имея возможности выполнить прогноз.

Таблица 2
Зависимость ошибки на тестовой выборке от количества входов нейронной сети.

Количество входов	Ошибка	Количество входов	Ошибка
1	$7.3982 \cdot 10^{-5}$	6	$6.2017 \cdot 10^{-6}$
2	$3.1360 \cdot 10^{-5}$	7	$9.8932 \cdot 10^{-6}$
3	$7.4885 \cdot 10^{-6}$	8	$7.7039 \cdot 10^{-6}$
4	$6.3819 \cdot 10^{-6}$	9	$1.0478 \cdot 10^{-5}$
5	$6.9932 \cdot 10^{-6}$	10	$5.5306 \cdot 10^{-6}$

Вместе с тем, величина ошибки для тестовой выборки в случае нейронной сети выше, чем для случая линейной регрессионной модели. В целях повышения точности прогноза искусственной нейронной сети была сформирована архитектура, представленная в таблице 3. Обучение этой нейронной сети в течение 200 эпох позволило добиться точности $4.8225 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 3
Зависимость ошибки на тестовой выборке от количества входов нейронной сети.

Номер слоя	Количество нейронов	Функция активации
Входной	4	-
1	20	ReLU
2	10	ReLU
3	5	ReLU
Выходной	1	linear

На рисунке 5 представлено сравнение графика ожидаемых значений и графика значений, полученных в результате прогноза с помощью полученной нейронной сети. Как видно, в большинстве случаев прогноз нейронной сети практически совпадает с ожидаемыми значениями.

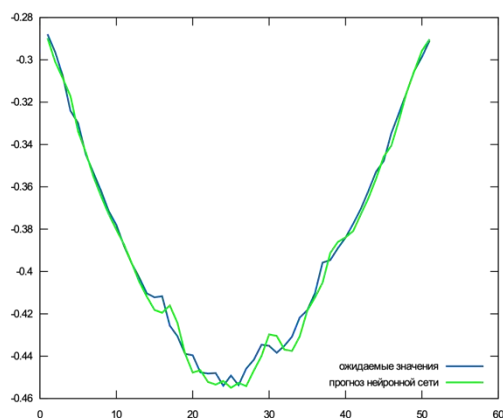


Рис. 5. Сравнение ожидаемых значений глубин и величин, полученных в результате прогноза с помощью нейронной сети.

3.3. Результаты сравнения моделей

На рисунке 6 представлено сравнение ожидаемых значений и значений, полученных в результате выполнения прогноза обеими рассматриваемыми в настоящей работе моделями. Как видно, обе модели имеют практически одинаковые ошибки, однако в случае нейронной сети величина ошибки часто оказывается меньше, чем для линейной регрессии. На графике различия между ожидаемыми и прогнозируемыми величинами в основном соответствуют интервалу, на который приходится переход от отлива к приливу, а во время установившегося процесса прилива или отлива ошибки невелики.

Из графика видно, что наибольшие ошибки обеих моделей выражаются в том, что модель верно прогнозирует изменение величины, однако согласно прогнозу это события должно произойти позже, чем на самом деле.

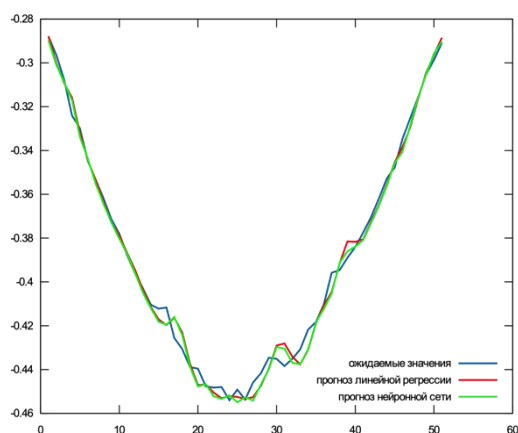


Рис. 6. Сравнение ожидаемых значений глубин и величин, полученных в результате прогноза разными методами.

Как видно из графика, что практически все события, прогнозирование которых выполняется с запаздыванием, выражаются в кратковременном перепаде прогнозируемой величины. На основании такого запаздывания можно было бы сделать вывод, что прогнозируемый процесс является мартингалом, и наилучшим прогнозом его будущего состояния является его предыдущее состояние [6]. В то же время, графики на рисунках 2 и 4 указывают на обратное, из них видно, что модель с одним входом показывает результат существенно худший, чем модель с несколькими входами, что, в свою очередь, говорит о том, что учитываются все входные значения. В противном случае, модели бы показывали сопоставимые результаты независимо от количества входов. Кроме этого, весовые коэффициенты, полученные в результате обучения линейной регрессии (выражение 1), подтверждают то, что при вычислении прогноза этой моделью учитываются все входные значения.

$$\Theta = \begin{pmatrix} -0.00019 \\ -0.514 \\ -0.102 \\ 0.81351 \\ 0.8009 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Из вышесказанного следует, что явление запаздывания не связано с тем, что обе модели адаптируются к тому, что прогнозируемый процесс является мартингалом и «учатся» минимизировать ошибку прогноза повторяя предыдущее состояние процесса.

Заключение

В настоящей работе была рассмотрена задача о прогнозировании изменения глубин вследствие

приливно-отливных течений. В работе были рассмотрены линейная регрессионная модель и искусственная нейронная сеть. В процессе исследования было определено оптимальное количество входов обеих моделей, необходимое для выполнения корректного прогноза, но не требующего долгого сбора входных данных.

Обе модели показали схожие результаты при выполнении прогноза. Однако нейронная сеть показала большую гибкость при адаптации к необходимым показателям точности, в частности, было показано, что путём незначительного изменения архитектуры сети и при сохранении того же числа входов возможно существенно повысить точность прогноза. Авторы отмечают, что для решения подобного рода задач нейронная сеть, за счёт гибкости подхода и возможности адаптации к требованиям точности, является более подходящим решением.

Обе модели прогнозируют наступление событий изменения прогнозируемой величины с некоторым запаздыванием. Анализ причин этого явления и возможных методов его преодоления является предметом дальнейших исследований. Но с учётом того, что в наборе данных, использованном для обучения моделей, замеры выполнялись каждые 6 минут, запаздывание на 1-2 замера означает запаздывание прогноза на 6-12 минут. Такая погрешность может быть приемлемой в зависимости от того, какие требования предъявляются к итоговому прогнозу, и того, для сколь длительных периодов выполняется прогноз. Для решения проблемы запаздывания возможно использование набора данных, использующего более частые замеры, однако такой подход может быть нерациональным с технической или экономической точки зрения, другим способом может быть введение поправки.

Литература

1. Ионов, В. В. Течения в проливах губы Кереть / Ионов, В. В. Май, Р. И., Смагин, Р. Е. // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2016.
2. Медведев, И. П. Приливные колебания в Балтийском море / Медведев, И. П., Рабинович, А. Б., Куликов, Е. А. // Океанология. – 53 – 2013 – стр. 596-609.
3. Янчин, И.А. Прогнозирование изменения глубин как периодической функции в задаче поиска пути судна / Янчин, И.А., Петров, О.Н // Сборник докладов «XXI Международной конференции по мягким вычислениям и изменениям». – изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018.
4. Chollet, F. et al. Home - Keras Documentation // Режим доступа: <https://keras.io>. Дата обращения: 12.01.2019.
5. Large Scale Distributed Deep Networks / Dean, J., Corrado, G. S., Monga, R., Chen, K., Devin, M., Le, Q. V., Mao, M. Z., Ranzato, M. and Senior, A., Tucker, P., Yang, K., Ng, A. Y. // Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2012.
6. Elliot, A. Time Series Prediction : Predicting Stock Price / Elliot, A., Hsu, C. H. // ArXiv e-prints. – 1710.05751. – 2017.
7. Frank, R. J. Time Series Prediction and Neural Networks / Frank, R. J., Davey, N., Hunt, S. P. // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 1 (31). – 2001 – стр. 91-103.
8. Grifoll, M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping / Grifoll, M., Martínez de Osés, F. X., Castells, M. // WMU Journal of Maritime Affairs. – 2 (17). – 2018. – стр. 195-211.
9. Hasler, N. Short-term Tide Prediction / Hasler, N., Hasler, K.-P. // Pattern Recognition – Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg – 2007 – стр. 375–384.
10. Kingma, D. Adam: A Method for Stochastic Optimization / Kingma, D., Ba, J. // International Conference on Learning Representations. – 2014.
11. LeCun, Y. Deep learning / LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. // Nature. – 521. – 2015.
12. Noaa tides & currents // Режим доступа: <https://tidesandcurrents.noaa.gov>. Дата обращения: 02.01.2019.
13. Weekly Prediction of Tides Using Neural Networks / Salim, A., Dwarakish, G.S., Liju, K.V., Thomas, J., Devi, G., R, R. // Procedia Engineering. – 2015 – стр. 678-682.

14. Singh, B. K. Investigations on Impact of Feature Normalization Techniques on Classifier's Performance in Breast Tumor Classification / Singh, B. K., Verma, K., Thoke, A. S. // International Journal of Computer Applications. – 19 (116). – 2015 – стр. 11-15.
15. Accelerating Recurrent Neural Network Training via Two Stage Classes and Parallelization / Huang, Z., Zweig, G., Levit, M., Dumoulin, B., Oguz, B., Chang, S. // ASRU. – IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2013.

References

1. Ionov, V. V. Tsecheniya v prolivakh guby Keret' / Ionov, V. V. Maj, R. I., Smagin, R. E. // Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle. – 2016.
2. Medvedev, I. P. Prilivnye kolebaniya v Baltijskom more / Medvedev, I. P., Rabinovich, A. B., Kulikov, E. A. // Okeanologiya. – 53 – 2013 – str. 596-609.
3. Yanchin, I.A. Prognozirovanie izmeneniya glubin kak periodicheskoy funktsii v zadache poiska puti sudna / Yanchin, I.A., Petrov, O.N // Sbornik dokladov «XXI Mezhdunarodnoy konfe-rentsii po myagkim vychisleniyam i izmeneniyam». – izd. SPbGETU «LETI». – 2018.
4. Chollet, F. et al. Home - Keras Documentation // URL: <https://keras.io>. Accessed: 12.01.2019.
5. Large Scale Distributed Deep Networks / Dean, J., and Corrado, G. S., Monga, R., Chen, K., Devin, M., Le, Q. V., Mao, M. Z., Ranzato, M. and Senior, A., Tucker, P., Yang, K., Ng, A. Y. // Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2012.
6. Elliot, A. Time Series Prediction : Predicting Stock Price / Elliot, A., Hsu, C. H. // ArXiv e-prints. – 1710.05751. – 2017.
7. Frank, R. J. Time Series Pre-diction and Neural Networks / Frank, R. J., Davey, N., Hunt, S. P. // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 1 (31). – 2001 – стр. 91-103.
8. Grifoll, M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping / Grifoll, M., Martínez de Osés, F. X., Castells, M. // WMU Journal of Maritime Affairs. – 2 (17). – 2018. – стр. 195-211.
9. Hasler, N. Short-term Tide Prediction / Hasler, N., Hasler, K.-P. // Pattern Recognition – Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg – 2007 – стр. 375—384.
10. Kingma, D. Adam: A Method for Stochastic Optimization / Kingma, D., Ba, J. // International Conference on Learning Representations. – 2014.
11. LeCun, Y. Deep learning / LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. // Nature. – 521. – 2015.
12. NOAA tides & currents // URL: <https://tidesandcurrents.noaa.gov>. Accessed: 02.01.2019.
13. Weekly Prediction of Tides Using Neural Networks / Salim, A., Dwarakish, G.S., Liju, K.V., Thomas, J., Devi, G., R, R. // Procedia Engineering. – 2015 – стр. 678-682.
14. Singh, B. K. Investigations on Impact of Feature Normalization Techniques on Classifier's Performance in Breast Tumor Classification / Singh, B. K., Verma, K., Thoke, A. S. // International Journal of Computer Applications. – 19 (116). – 2015 – стр. 11-15.
15. Accelerating Recurrent Neural Network Training via Two Stage Classes and Parallelization / Huang, Z., Zweig, G., Levit, M., Dumoulin, B., Oguz, B., Chang, S. // ASRU. – IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2013.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное ([ISSN № 2073-7173](#)) издание
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лощманская 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 – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**