

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

100110100110111100110010001100010100111010010001100011010101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 4 (38) том 3 2017



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (38) Т.3 2017 www.morintex.ru, ISSN № 2073-7173

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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

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

Огай С. А. к.т.н., доцент ректор, 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, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматизации, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (38) V. 3 2017 www.morintex.ru ISSN 2073-7173

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, Chief Researcher Krylov State Research Centre

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, CEO, 51 CCIS

Ogai S.A., PhD, Associate professor, Rector, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

A. E. Bogdanov, Doctor of Engineering, JSC "Control Systems"

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

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

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

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

120121, 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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

О журнале	8
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Барбанель Б.А., Федулов С.В. Использование опыта германских специалистов в области подводного кораблестроения в интересах ВМФ СССР (1945–1951)	10
Беляева Н.А., Курбенков В.А. Управление Владивостокским портом в начале XX века	17
Небылов А.В., Небылов В.А., Сукрит Шаран Перспективы развития аэролодок как скоростного амфибийного транспорта	23
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Азовцев А.И., Огай С.А., Огай А.С., Заводовская А.И. Обеспечение стабильности микроклимата в плавучем доке с использованием проницаемого мягкооболочечного закрытия	31
Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И. Численный анализ нелинейных колебаний упруго опертой деформируемой системы с ограничительными опорами по концам	37
Притыкин А.И. Влияние поясков на устойчивость флоров с круглыми вырезами	45
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Москаленко М.А., Друзь И.Б. Методологическая оценка предельных возможностей судостроительных сталей с точки зрения конструктивной безопасности морских судов	50
Легуша Ф.Ф., Павловский А.С., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю., Семенова Н.Г. Акустическая пропитка древесины	55
Москаленко М.А., Друзь И.Б. Некоторые методологические выводы по результатам анализа конструктивной безопасности при исчерпании несущей способности корпусами морских судов	65
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Ренев С.А., Шелофаст В.В. Решение задач прочности и трещиностойкости с использованием модифицированной функции «Birth and Death» для трех типов деформации в вершине трещины	72
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Черненко В.И. Выбор основных энергетических характеристик исполнительного привода аэроуруля судна на воздушной подушке	79
Завьялов В.В., Клюева С.Ф. Реализация алгоритма оценивания координат места судна по полю глубин на основе кластерного анализа	84
Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю. Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел (05.08.05)	94
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	
Кузьмичёв И.К., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Чебан Е.Ю. Оценка волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей	99
ИНФОРМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ	
Седова Н.А., Седов В.А., Левченко Н.Г. Оценка степени опасности наблюдаемой цели на море с использованием систем искусственного интеллекта	106
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Лукомская О.Ю., Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Шаталова Н.В. О разработке и тестировании алгоритма планирования расписания движения судов через систему Волго-Балтийского судоходного канала	115

Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Новые технологии формирования системы мониторинга и идентификации признаков полей морских объектов 127

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Волянская Я.Б., Волянский С.М., Онищенко О.А. Уточнение параметров математической модели трехфазного асинхронного электродвигателя системы электродвижения автономного плавательного аппарата 132

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Исаев А.А., Исаева Л.А., Луговец А.А. Обеспечение конкурентоспособности морских перевозок: теоретический и методологический аспекты 139

Исаев А.А., Мегей Е.С., Лентарев А.А. Факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок 144

Трубникова Е.И., Трубников Д.А., Назаров Д.В. Оценка перспектив использования высокоскоростных транспортных средств 151

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Васильева Н.В., Григорьев-Голубев В.В., Евграфова И.В., Кунтурова Н.Б., Леора С.Н. Оптимизация инженерных расчетов с помощью пакета компьютерной математики mathcad 158

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. О новом подходе к анализу физического смысла и математического описания тензорных величин в прикладных задачах механики 166

Рогозинский Г.Г., Комашинский В.И. Модифицированная доменная модель мультисенсорного мониторинга киберфизических полей 177

Сидоров В.Н., Катаржина Новак Задание обоснованных компьютерных моделей конструкционных материалов с реологическими свойствами 183

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Бузмакова М.М. Компьютерное моделирование структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами 189

Бутымова Л.Н., Модорский В. Я. Численное моделирование работы газодинамических сил в 2FSI подсистеме лабиринтных уплотнений центробежных компрессоров 194

Мехоношина Е.В., Модорский В.Я. Численное моделирование течения газа и деформирования конструкции при работе ступени центробежного компрессора в нестационарных несвязанных и связанной BFSI постановках 198

CONTENTS

About journal	page 8
---------------------	-----------

SHIP BUILDING

Boris A. Barbanel, Sergey V. Fedulov The use of the experience of German specialists in the field of submarine shipbuilding for the benefit of the USSR NAVY (1945-1951)	10
Natalia A. Belyaeva, Valery A. Kurenkov Management of the Vladivostok port in the beginning of XX century	17
Alexander V. Nebylov, Vladimir A. Nebylov, Sukrit Sharan Prospects for the development of airboats as a speed amphibian transport	23

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

Anatoliy I. Azovtsev, Sergei A. Ogai, Alexey S. Ogai, Anna I. Zavodovskaya Ensuring stability of microclimate in the floating dock using the permeable flexible coveringr	31
Sergej Ju. Gridnev, Jurij I. Skalko Numerical analysis of nonlinear vibrations of elastically supported deformable system with restrictive supports at the boundaries	37
Aleksej I. Pritykin Influence of bands on stability of floors with circular openings	45

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz Methodological evaluation shipbuilding steels limits from the point view the structural safety of the marine vessels	50
Fedor F. Legusha, Artjom C. Pavlovsky, Sergej I. Pugachev, Evgenij Ju. Rytov, Natalija G. Semenova Acoustical wood impregnation	55
Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz Some methodological findings of the structural safety analysis exhaustion hulls bearing capacity by marine vessels	65

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Sergej A. Renev, Vladimir V. Shelofast The method of solving the problems of strength and fracture toughness using the modified function "Birth and Death" for tree modes of deformation at the t.....	72
---	----

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Andrey G. Bogdanov, Valery Y. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Viktor I. Chernenko The selection of key energy characteristics of the executive drive air wheel the hower craft	79
Viktor V. Zavyalov, Svetlana F. Klueva Implementation of estimation algorithm in problem of terrain aided navigation based cluster analysis	84
Andrey Yu. Fershalov, Jurij Ja. Fershalov, Mikhail Yu. Fershalov Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles	94

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Igor' K. Kuzmichev, Evgeniya A. Lukina, Sergey G. Mitroshin, Egor Y. Cheban Valuation of the wave formation of the cargo catamaran for inland waterways	99
--	----

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Nelly A. Sedova, Viktor A. Sedov, Natalia G. Levchenko Risk assessment of the observed target on sea using artificial intelligence system	106
--	-----

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

O'l'ga Yu. Lukomskaya, Svyatoslav A. Seliverstov, Yaroslav A. Seliverstov, Natal'ya V. Shatalova About development and testing of the schedule planning algorithm on the vessel traffic via the system of the Volgo-Baltic shipping channel	115
Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychkova New technologies to build a system for the monitoring and identification of signs of fields belonging to seawater objects.....	127

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Yana B. Volyanskaya, Serhey M. Volyanskiy, Oleg A. Onishchenko Update of the parameters of the mathematical model of the three phase asynchronous induction motor of the electronic movement system of the autonomous vehicle	132
--	-----

. CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Alexander A. Isaev, Lyudmila A. Isaeva, Alexander A. Lugovets Ensuring the competitiveness of sea shipping: theoretical and methodological aspects	139
Alexander A. Isaev, Ekaterina S. Megey, Alexander A. Lentarev Factors of competitiveness of coastal sea freight shipping	144
Ekaterina I. Trubnikova, Dmitrii A. Trubnikov, Dmitry V. Nazarov Assesment of high-speed vehicles implementation using wing-in-ground (WIG) effect for transport infrastructure of Baltic sea developmen	151

SOFTWARE FOR COMPUTERS

Natalia V. Vasilieva, Vladimir V. Grigorev-Golubev, Irina V. Evgrafova, Nadezhda B. Kunturova, Svetlana N. Leora Optimization of engineering calculation by means of a package of computer mathematics of MATHCAD	158
--	-----

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Marlen E. Podolsky, Svetlana V. Cherenkova, Marina A. Ivanova A new approach to the analysis of the physical sense and of the mathematical description of tensor quantities in applied problems of mechanics ...	166
Gleb G. Rogozinsky, Vladimir I. Komashinsky Modified multi domain model cyber-physical systems monitoring	177
Vladimir N.Sidorov, Katarzina Nowak Assignment of valid computer models of constructive materials with rheological properties	183

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Mariya M. Buzmakova The computer modeling of the structure of the epoxy, modified by the fullerenes	189
Evgeniia V. Mekhonoshina, Vladimir Ja. Modorskiĭ Gas flow numerical modeling and structure deformation in operation of the centrifugal compressor stage in nonstationary unbound and bound BFSI formulations	194
Igor' K. Kuzmichev, Evgeniya A. Lukina, Sergey G. Mitroshin, Egor Y. Cheban Evaluation of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways	198

О ЖУРНАЛЕ

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

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

Наш журнал включен в международную реферативную базу данных Web of Science

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

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

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

Тематика

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

Основные направления

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

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

Basic Magazine Trends

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

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 623.8; 355.48

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА ГЕРМАНСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ
ПОДВОДНОГО КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ВМФ СССР
(1945–1951)****Барбанель Борис Аронович**

Кандидат технических наук, Академик РАЕН, Вице-президент Научно-технического общества судостроителей имени академика А.Н. Крылова
Научно-техническое общество судостроителей имени А.Н. Крылова
119011, г. Санкт-Петербург, Невский проспект, 44.
e-mail: cpntokrylov@mail.ru

Федулов Сергей Валентинович

Кандидат исторических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономических дисциплин
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.
e-mail: www.vka.mil.ru

Аннотация

Проблема использования опыта германских специалистов в послевоенный период (1945–1951) в интересах ВМФ СССР является малоизученной в отечественной историографии. Это связано с ее определенной узкопрофессиональной направленностью.

В период после Первой мировой войны и до разгрома гитлеровской Германии во Второй мировой войне германские учёные добились значительных результатов в создании новых образцов военно-морской техники и вооружения. Этому способствовала ориентация научно-исследовательских работ только для подготовки и ведения захватнической агрессивной войны. Военно-морская мощь Германии напрямую зависела от государственной политики по организации научно-исследовательских работ.

После разгрома нацистской Германии советские специалисты получили уникальную возможность изучить наработки германских конструкторов в области военной, военно-морской техники и вооружения. С этой целью на территории Германии начали создаваться советские структуры для изучения научно-технического опыта, в работе которых деятельное участие принимали германские специалисты. Конструкторское бюро ВМС в Берлине и «Бюро Антипина» использовали опыт германских специалистов в области подводного кораблестроения в послевоенные годы в интересах ВМФ СССР.

Ключевые слова: Военно-морской флот, Конструкторское бюро ВМС в Берлине, Бюро Антипина, германские специалисты, подводное кораблестроение, подводная лодка, верфь, двигатель.

**THE USE OF THE EXPERIENCE OF GERMAN SPECIALISTS IN THE FIELD
OF SUBMARINE SHIPBUILDING FOR THE BENEFIT OF THE USSR NAVY
(1945-1951)****Boris A. Barbanel**

PhD, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Vice-President of Science & Technology Society of Shipbuilders named after Academician A.N. Krylov
Science & Technology Society of Shipbuilders named after Academician A.N. Krylov
44 Nevsky prospect, Saint Petersburg, 119011, Russia.
e-mail: cpntokrylov@mail.ru

Sergey V. Fedulov

PhD, Associate Professor of the Department of Social and Economic Disciplines
Mozhaisky Military Space Academy
13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, 197198, Russia.
e-mail: www.vka.mil.ru

Abstract

The task of using the experience of German specialists in the post-war period (1945-1951) for the benefit of the Soviet Navy in the Russian historiography is insufficiently explored. That is connected with the fact that this problem is of specific narrow professional orientation.

In the period after the First World War and before the defeat of Hitler's Germany in the Second World War, German scientists achieved significant results in creation of new models of naval equipment and weapons. This was facilitated by the orientation of the research only for the preparation and conduction of the aggressive war. The naval power of Germany directly depended on the state policy for the organization of the research.

After the defeat of Nazi Germany, Soviet specialists received a unique opportunity to study the developments of German designers in the field of military and naval equipment and weapons. For this purpose were established Soviet structures on the territory of Germany to study research and development experience, in which German specialists took an active part. The Naval Design Bureau in Berlin and the Bureau of Antipin used the experience of German specialists in the field of submarine shipbuilding in the postwar years for the benefit of the Soviet Navy.

Key words: Navy, Naval Design Bureau in Berlin, Antipin Bureau, German specialists, submarine shipbuilding, submarine, shipyard, engine.

Введение

Накануне и в ходе Второй мировой войны в гитлеровской Германии активно реализовывалась государственная политика по организации научно-исследовательских работ. Основные принципы этой политики заключались в следующем:

- Создание превосходно оборудованных лабораторий, рассредоточенных по всей стране, и скрыто расположенных в живописных и курортных местностях.

- Наличие в этих лабораториях наилучшего оборудования, достаточного для проведения исследовательских работ.

- Предоставление научным работникам дополнительного питания, обеспечение их хорошей заработной платой и комфортабельными жилищно-бытовыми условиями.

- Освобождение научных работников от канцелярской рутины, ведения бухгалтерской отчетности, представления отнимающих много времени отчетов, проведения проверок хода работ или дачи обязательств о достижении определенных результатов. Было сделано всё, чтобы избавить научных работников от забот, которые могли бы отвлечь их от своей работы, и чтобы дать им возможность сосредоточиться на выполнении поставленных задач [1].

После разгрома нацистской Германии были обнаружены десятки таких лабораторий, расположенных в живописных Баварских Альпах, в Тюрингских лесах, на Саксонских курортах и на побережье Балтийского моря. Общее руководство всей исследовательской работой данных лабораторий осуществляло министерство исследований Германии, которое не подчинялось ни военному, ни морскому министерствам, ни ВВС. Однако все эти ведомства использовали работы министерства исследований. Минис-

терство исследований оказывало поддержку всем, кто предлагал здравую идею, будь то совершенно неизвестное лицо или маститый изобретатель, исходя из того, что если одно изобретение из десяти оказалось успешным, то считалось, что затраты себя оправдали [1].

Данная политика и отношение к научным работникам способствовали значительным успехам во многих областях науки и техники, в том числе и в области подводного кораблестроения.

1. Достижения германских конструкторов в области подводного судостроения

Еще в 1936 году профессор Г. Вальтер предложил идею революционного подводного корабля. Подводные лодки (ПЛ) того времени были в действительности надводными кораблями, способными двигаться под водой под электродвигателем и аккумуляторной батареей лишь несколько часов. Батареи могли обеспечить подводный ход лишь на очень ограниченное время. После получаса хода на максимальной скорости или в течение суток на «ползающей» скорости подводная лодка вынуждена была всплывать, чтобы перезарядить батарею, используя дизели, которые обеспечивали ей ход в надводном положении.

Г. Вальтер предложил достичь большого радиуса действия и высокой подводной скорости лодки за счет использования перекиси водорода в движительной установке (Рис. 1, 2).



Рис. 1. Гельмут Вальтер

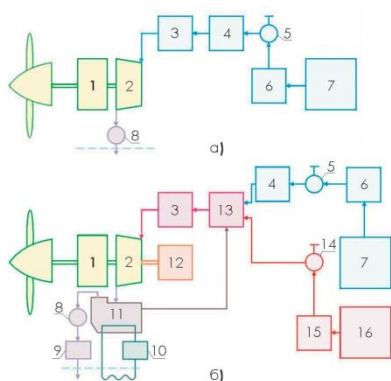


Рис.2. Схемы парогазовых энергетических установок Гельмута Вальтера: а) схема установки «холодного цикла»; б) схема установки «горячего цикла». 1/ редуктор; 2/ турбина; 3/ фильтр/сепаратор; 4/ камера разложения перекиси; 5/ регулятор подачи перекиси; 6, 15/ подкачивающие насосы; 7/ емкость с перекисью водорода; 8/ невозвратный клапан системы откачки отработавших газов; 9/ высокопарный насос; 10/ насос прокачки конденсата; 11/ конденсатор смешения; 12/ электромотор; 13/ камера горения; 14/ регулятор подачи топлива; 16/ топливная цистерна

По его схеме подводная лодка должна иметь обтекаемые, каплевидные обводы и в качестве энергоустановки использовать турбину замкнутого цикла, где тепловая энергия производится за счет применения высококонцентрированной перекиси водорода. Эта комбинированная система давала возможность работать турбине без доступа атмосферного воздуха и обеспечивать высокую подводную скорость [2].

На экспериментальной подводной лодке V-80 построенной по проекту Г. Вальтера в 1940 году, была достигнута, правда на короткое время, скорость более 26 узлов – это была максимальная скорость под водой на управляемом человеком аппарате. В ноябре

1943 года две вальтеровские подводные лодки XVIII серии U-792 и U-794 были предъявлены на испытания. Они достигли скорости 25 узлов в подводном положении на короткое время; наиболее длительный период под водой с 20-ти узловой скоростью достиг 5,5 часа [2].

Однако к 1942 году подводные лодки Вальтера не были готовы к боевой службе, и в ближайшей перспективе осуществить их боевое применение не представлялось возможным.

Изучая ситуацию вокруг подводных лодок Вальтера, Фриц Брёкинг (эксперт по энергетике) и Фридрих Шюрер (специалист по корпусу подводной лодки) предложили руководству германского флота использовать обтекаемые обводы вальтеровских ПЛ, которые были полностью испытаны, а также удвоить число аккумуляторных батарей. Поскольку подводные лодки будут иметь совершенные обводы, это даст возможность резко повысить подводную скорость и увеличить радиус действия в подводном положении. Мощные аккумуляторные батареи дают основание назвать эти лодки электрическими. В то же время Вальтер предложил устройство, названное впоследствии «шнорхель», дающее возможность забирать атмосферный воздух для дизелей и обеспечивающих выхлоп отработанных газов в подводном положении. Это позволяло дизелям работать в погруженном состоянии, обеспечивать ход и подзарядку батарей, что резко увеличило боевые возможности подводных лодок. В дальнейшем верхняя часть трубы «шнорхеля» стала облицовываться антирадарным покрытием, препятствующим обнаружению подводной лодки [2].

Так началось создание проекта, который стал известен как подводная лодка XXI серии (Рис. 3).



Рис. 3. Подводная лодка XXI серии

ПЛ XXI серии была большой подводной лодкой, нормальным водоизмещением 1,621 тонны. Подводная лодка XXI серии имела обтекаемый корпус с минимальным числом возмущающий набегавший поток выступающих частей, таких как, например, фундаменты, решетки или орудийные установки. Вместо ограждения рубки с платформой-фундаментом и

орудийной установки на ПЛ XXI серии было компактное обтекаемое ограждение, служащее обтекателем для перископов и других антенн. Эти особенности в шесть раз снизили сопротивление выше ватерлинии по сравнению с прежними ПЛ. Шпигаты в балластных цистернах были уменьшены, что также снизило общее сопротивление движению. Эти меры, совместно с совершенствованием и увеличением мощности аккумуляторных батарей и гребных электродвигателей, позволили на XXI серии вдвое увеличить подводную скорость против прежних ПЛ:

- 16 узлов на 25 милях (46 км);
- 12 узлов на 60 милях (111 км);
- 6 узлов на 280 милях (520 км).

Кроме двух основных гребных электродвигателей на ПЛ XXI серии были установлены два электромотора «подкрадывания» для бесшумного хода. Они могли обеспечить подводной лодке ход в $5\frac{1}{2}$ узла на дистанции 320 миль (595 км) – беспрецедентный радиус действия под водой для подводных лодок. Электродвигатели «подкрадывания» были размещены на резиновых амортизаторах и имели другие особенности для снижения уровня шума. Даже при использовании обычных стандартных электродвигателей ПЛ XXI серии были значительно малозумнее подводных лодок тех времен. Подводные лодки имели рабочую глубину погружения 135 м. Корпус ПЛ XXI серии отличался разительно от традиционных подводных лодок. На части длины прочный корпус имел форму восьмерки, на остальной длине был цилиндрическим и коническим. Носовая оконечность была закруглена, в отличие от других ПЛ, где она формировалась из условий надводного плавания. Кормовая оконечность ПЛ XXI серии была острая и узкая, кормовых торпедных аппаратов не было, чтобы не исказить обводы. В виде узкого крыла был сформирован вертикальный стабилизатор / руль так называемый режущий или «ножевой» конфигурации [2].

Шефство над строительством подводных лодок XXI серии принял на себя министр вооружений и снабжения армии Альберт Шпеер, который, в свою очередь, поручил возглавлять программу их создания Отто Меркеру, организовавшему посекционное производство субмарин. Таким образом, подводные лодки строились на стапелях верфи не как обычно, а собирались из секций на любом подходящем заводе и затем отправлялись на верфи для окончательной сборки (Рис. 4, 5).



Рис. 4. Носовая и средняя часть подводной лодки XXI серии на сборке

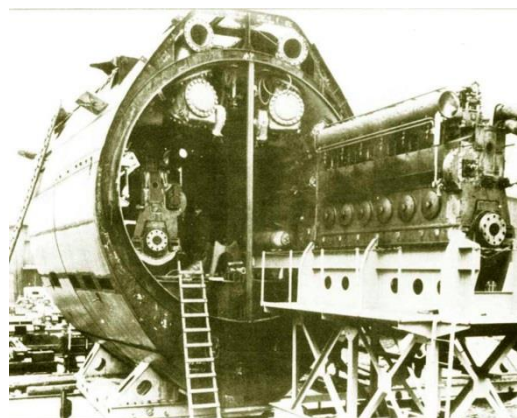


Рис. 5. Установка правого дизеля MAN M6V 40/46 в секцию 3 подводной лодки XXI серии.

Необходимо отметить, что данный метод советские кораблестроители освоили еще в 1930-е годы, когда секции подводных лодок серии «Д» создавались в Ленинграде, по железной дороге доставлялись в Комсомольск-на-Амуре, где на судостроительной верфи осуществлялась их окончательная сборка.

Вместе с тем подводные лодки XXI и XXIII серий были созданы в германском флоте как промежуточные лодки. Основными перспективными подводными лодками были ПЛ с энергоустановками замкнутого цикла или, как их называли, с «единым» двигателем, которые были независимы от атмосферного воздуха и могли и над водой, и под водой развивать скорость 25 узлов и более. Принципиальная схема установки замкнутого цикла была создана на германских верфях Г. Вальтером в 1930-х годах. Система Вальтера была достаточно сложная, основанная на разложении (декомпозиции) высококонцентрированной перекиси водорода – пергидроле [2].

Таким образом, германскими конструкторами и инженерами были созданы скоростные и технически совершенные на то время подводные лодки, которые вызывали значительный интерес у военно-морских специалистов стран-союзниц по антигитлеровской коалиции.

2. Изучение и использование опыта германских специалистов в области подводного судостроения

С целью изучения германского опыта создания военно-морской техники и вооружения на основании Приказа Народного комиссара ВМФ Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова от 23.07.1945 г. было сформировано и успешно функционировало до декабря 1947 года Конструкторское бюро (КБ) ВМФ в Берлине [3]. Этим же приказом начальником КБ был назначен инженер-капитан 1 ранга Л.А. Коршунов (Рис. 6).



Рис.6. Вице-адмирал Л.А. Коршунов

В составе Бюро помимо советских трудились германские специалисты, которых насчитывалось: в декабре 1945 г. – 41 чел., а в декабре 1946 г. – 198 чел. [3]. КБ ВМФ решало следующие задачи:

- с помощью германских инженеров выявлялись и изучались достижения германской военно-морской техники в области кораблестроения, вооружения и связи;
- германские специалисты обеспечивали квалифицированной консультацией и разъясняющими работами трофейную технику в области кораблестроения, вооружения и средств связи;
- германские конструкторы частично использовались в рядовых работах, для которых в СССР не хватало специалистов.

В соответствии с данными положениями был составлен Тематический план работ КБ ВМФ, поэтому какими-либо принципиально новыми, неизвестными образцами военно-морской техники Германии Бюро не занималось [3].

Если подводные лодки XXI серии, полученные в качестве трофеев и по репарациям, изучались непосредственно в СССР, то процесс создания лодок с двигателем Вальтера необходимо было изучать при помощи германских специалистов непосредственно в Германии. Для этого в

кораблестроительном отделе КБ ВМФ в Берлине была создана группа германских специалистов (20 конструкторов и чертежников) под руководством Ф. Статешного – помощника Г. Вальтера. Сам профессор Вальтер с большей частью своих сотрудников уехал в Великобританию [4].

С марта 1947 года КБ ВМФ перестало заниматься этой лодкой, и все материалы по ней были переданы в специально созданное для этого особое конструкторское бюро А.А. Антипина (Рис. 7).



Рис.7. Инженер-капитан 1 ранга А.А. Антипин

«Бюро Антипина», так было указано в Приказе Министра Вооруженных сил СССР от 16.05.1947 г. и приказе Главногоуправляющего Советской военной администрации в Германии (СВАГ) от 18.07.1947 г., было реорганизовано в самостоятельную структуру. Этими же приказами начальником Бюро был назначен инженер-капитан 1 ранга А.А. Антипин [5].

16.05.1947 г. группа Ф. Статешного в составе уже 27 германских специалистов была переведена в «Бюро Антипина». Из них: 3 руководителя группы, 6 старших инженеров, 8 инженеров-конструкторов, 5 инженеров-лаборантов, чертежник-конструктор, 4 стенографистки. 16.11.1947 г. эта же группа, но уже в составе 17 человек согласилась переехать вместе со своими семьями на работу в Советский Союз. [3]

В этом же году в Ленинграде было создано новое конструкторское бюро по проектированию подводных лодок – ЦКБ-18. Его возглавил инженер-капитан 1 ранга А.А. Антипин. Основные работы были сконцентрированы на создании энергоустановок подводных лодок, обеспечивающих высокие скорости подводного хода. Новое конструкторское бюро – известное как бюро Антипина – было укомплектовано из сотрудников ЦКБ-18, ЦНИИ-45, а также германскими специалистами во главе с доктором Ф. Статешным [2].

ЦКБ-18 начало разработку проекта советской копии ПЛ XXVI серии, который был обозначен как проект 616. Некоторые проектные решения, принятые немцами в XXVI серии, не удовлетворяли советских конструкторов и морских офицеров: такие как малый запас плавучести, расположение торпедных аппаратов в середине корабля и большие объёмы отсеков прочного корпуса. Немедленно после критического рассмотрения проекта, ЦКБ-18 начало разрабатывать оригинальный проект подводной лодки с парогазовой турбиной. Новый проект 617 рассматривался в Военно-морском флоте как очень важный, так как высокая скорость в подводном положении резко увеличивала тактическое использование подводных лодок (Рис. 8).



Рис.8. Подводная лодка 617 проекта

Эта ПЛ имела все отечественное оборудование, за исключением турбины. Эскизный проект 617 был разработан к концу 1947 года. ПЛ разрабатывалась под руководством одного из опытных инженеров-механиков П.С. Савинова, который участвовал во всех предыдущих проектах подводных лодок еще с досоветских времен, и молодых инженеров С.Н. Ковалева и Г.Н. Чернышева, которые позднее сыграли решающую роль в создании атомных подводных лодок. Проект курировал Б.М. Малинин, главный конструктор первой советской подводной лодки, проект которой начал разрабатываться в 1926 году. 617 проект был для него последним, так как он умер в 1949 году.

30 марта 1948 года для дальнейшего проектирования ПЛ проекта 617 в СССР было организовано третье проектно-конструкторское бюро подводных лодок. Этим бюро стало СКБ-143, созданное специально для разработки проектов подводных лодок с новыми типами энергоустановок для обеспечения высокой скорости подводного хода. Новое бюро было укомплектовано специалистами ЦКБ-18 и группой А.А. Антипина из Германии (включая 10 германских инженеров), а также сотрудниками энергетического отдела ЦНИИ-45. А.А. Антипин был назначен начальником СКБ-143 и главным конструктором проекта. Заместителем главного конструктора стал С.Н. Ковалев. Новое бюро

имело две ленинградские площадки: одна в Шуваловском парке, а другая на заводе «Судомех», где исследовалась энергоустановка и проводились сравнительные испытания.

После разработки проекта 617 началась его постройка на заводе «Судомех». Было принято решение сначала построить прототип или экспериментальную опытную подводную лодку, учитывая большую новизну проекта. Серийная постройка задерживалась до окончания испытаний подводной лодки. В течение строительства ПЛ проектное бюро осваивало новые функции, несвойственные обычно для конструкторских бюро. В одном из цехов завода «Судомех» был сооружен наземный прототип парогазовой установки на перекиси водорода и секция прочного корпуса с турбинной установкой. Этот стенд турбинной установки, смонтированный внутри прочного корпуса, был максимально приближен к реальным условиям подводной лодки. Энергетическая установка собиралась из компонентов оборудования, полученного из Германии; недостающие части изготавливались в мастерских конструкторского бюро.

Германские специалисты принимали участие в работе как консультанты по техническим проблемам. Работали они в отдельном помещении. По мере того как советские специалисты набирались опыта, их роль постепенно становилась все менее важной. Последний из германских специалистов уехал из СССР в конце 1951 года [2].

С 1952 года приоритетным направлением подводного кораблестроения стал атомный флот.

Заключение

В период после Первой мировой войны и до разгрома гитлеровской Германии во Второй мировой войне германские учёные добились значительных результатов в создании новых образцов военно-морской техники и вооружения. Этому способствовала, во-первых, ориентация научно-исследовательских работ только для подготовки и ведения захватнической агрессивной войны. Во-вторых, военная и военно-морская мощь Германии напрямую зависела от государственной политики по организации исследовательских работ. В-третьих, создание идеальных условий для проведения научных исследований и работы германских учёных. В-четвёртых, в основу реализации научно-технических открытий ставилась новая идея, а не известность и признанность учёного. Поэтому разработка и создание новых образцов германской техники и вооружений зачастую носили прорывной характер и нестандартные решения. В связи с этим страны-союзицы по антигитлеровской коалиции были заинтересованы не только и не столько в получении в качестве трофеев новых

видов военной, военно-морской техники и вооружения, сколько в ознакомлении с процессом их разработки, производства и научно-исследовательскими наработками.

В то время как западные «союзники» использовали германские научно-технические разработки германских специалистов для создания и развития собственных видов военной, военно-морской техники и вооружения, основной целью советских конструкторов, инженеров, военно-морских специалистов являлось изучение германских научно-технических достижений и

получение консультаций и разъяснений по трофейной военно-морской технике и вооружению. После расформирования КБ ВМС в Берлине часть германских инженеров соответствующих специальностей и квалификаций по собственному желанию со своими семьями поехали на работу в СССР, где передавали свой опыт работы советским специалистам. Этим и ограничивалось их пребывание в Советском Союзе.

Литература

1. *Федулов С.В.* Предоставить советской промышленности в кратчайшие сроки с минимальными затратами богатый экспериментальный материал. Результаты научно-исследовательских работ военно-морской и авиационной направленности в Германии и использование их странами — союзницами по антигитлеровской коалиции. // Военно-исторический журнал. № 7. 2016. С. 36–40.
2. *Норман Полмар, Кеннет Дж. Мур.* Подводные лодки холодной войны. Проектирование и строительство американских и советских подводных лодок / Пер. с англ. Б.Ф. Дронов. СПб.: Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». 2011. 470 с.
3. *Алешин О.В., Барбанель Б.А., Конеев А.Н., Федулов С.В.* Деятельность Конструкторского бюро Военно-морских сил СССР в Берлине (1945–1947). СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. 160 с.
4. *Коршунов Л.А.* 70 лет службы на флоте и в военном кораблестроении: Подводное кораблестроение. Прошлое, настоящее, будущее. Выпуск №10. СПб.: Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», 1998. 284 с.
5. Советская военная администрация в Германии 1945–1949. Деятельность Управления СВАГ по изучению достижений немецкой науки и техники в Советской зоне оккупации Германии, 1945–1949 / Отв. ред. и автор вступительной статьи В.В. Захаров; сост. В.В. Захаров, О.В. Лавинская, Д.Н. Нохотович; при участии Е.В. Полторацкой. М.: РОССПЭН, 2006. 457 с.

References

1. *Fedulov S.V.* Predostavit' sovetsoj promyshlennosti v kratchajshie sroki s minimal'nymi zatratami bogatj ehksperimental'nyj material. Rezul'taty nauchno-issledovatel'skih rabot voenno-morskoj i aviacionnoj napravlennosti v Germanii i ispol'zovanie ih stranami — soyuznicami po antigitlerovskoj koalicii. [To provide Soviet industry in the shortest time with minimum cost a rich experimental material. The results of scientific research of naval and aviation industry in Germany and use their allies on anti-Hitler coalition.] Military history journal. No. 7. 2016. Pp. 36–40. (in Russian).
2. *Norman Polmar, Kennet Dzh. Mur.* Submarines of the cold war. Design and construction of U.S. and Soviet submarines. English translation by B. F. Dronov. Saint-Petersburg. Publisher of the St. Petersburg naval Bureau of machine building «Malachite». 2011. 470 p.
3. *Aleshin O.V., Barbanel' B.A., Koneev A.N., Fedulov S.V.* The activities of the Design Bureau of naval forces of the USSR in Berlin (1945-1947). [Deyatel'nost' Konstruktorskogo byuro VoЕННО-morskih sil SSSR v Berline (1945–1947)] Saint-Petersburg. ETU Publishing. 2017. 160 p. (in Russian).
4. *Korshunov L.A.* 70 let sluzhby na flote i v voennom korablestroenii: Podvodnoe korablestroenie. Proshloe, nastoyashchee, budushchee. [70 years of service in the Navy and military shipbuilding: underwater shipbuilding. Past, present, future.] Saint-Petersburg. Publisher of the St. Petersburg naval Bureau of machine building «Malachite», V.10. 1998. 284 p. (in Russian).
5. The Soviet military administration in Germany, 1945-1949. The activities of the office of svag to study the achievements of German science and technology in the Soviet occupation zone of Germany, 1945-1949. [Sovetskaya voennaya administraciya v Germanii 1945–1949. Deyatel'nost' Upravleniya SVAG po izucheniyu dostizhenij nemeckoj nauki i tekhniki v Sovetskoj zone okkupacii Germanii, 1945–1949]. Resp. ed. and author of introductory article by V.V. Zakharov; the composer V.V. Zakharov, O.V. Lavinsky, D.N. Nohomovitz; with the participation of E.V. Poltoratskaya. Moskow. ROSSPEN, 2006. 457 p. (in Russian).

УДК 656.071.41(93/94)

УПРАВЛЕНИЕ ВЛАДИВОСТОКСКИМ ПОРТОМ В НАЧАЛЕ XX ВЕКА

Беляева Наталья Анатольевна

доктор исторических наук, профессор,
профессор кафедры теории и истории государства и права
Владивостокский филиал ГКОУ ВО «Российская таможенная академия»
690034, Владивосток, ул. Стрелковая, 16-в
тел. (423) 263-46-75 E-mail: minava204@rambler.ru

Курбенков Валерий Анатольевич

кандидат политических наук, доцент по кафедре морского права,
заведующий кафедрой морского права
Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского
690069, Владивосток, Верхнепортовая, 50-а
тел. (423) 230-12-48 E-mail: kurbenkov@msun.ru

Аннотация

На основе архивных документов Российского государственного исторического архива Дальнего Востока рассматриваются изменения в управлении Владивостокским торговым портом в условиях промышленного подъема начала XX века. Раскрывается деятельность особых совещаний и комиссий, выработавших проекты развития порта и предложения по совершенствованию управления им. Дана общая характеристика проектов учреждения Владивостокского коммерческого порта, проанализирована нормативная база, регламентирующая порядок управления портом, прослеживается ее эволюция на протяжении почти первого десятилетия XX века. Обращено внимание на противоречивость организации управления портом, порождавшую многочисленные межведомственные противоречия между морским, военным с одной и гражданскими ведомствами, а также и между самими гражданскими ведомствами - министерствами торговли и промышленности, финансов, путей сообщения и внутренних дел.

Ключевые слова: Владивостокский порт, Сибирская железная дорога, коммерческий порт, временное положение, управление портом, присутствие по портовым делам.

MANAGEMENT OF THE VLADIVOSTOK PORT IN THE BEGINNING OF THE XX CENTURY

Natalia A. Belyaeva

Professor, PhD in History
Russian Customs Academy, Vladivostok branch
Shooting, 16-in. Vladivostok, 690034
minava204@rambler.ru

Valery A. Kurenkov

Candidate of Political Sciences
head of the Department of law of the sea Maritime State University
named after admiral G. I. Nevelsoi
Verkhneportovaya, 50a. Vladivostok 690069
E-mail: kurbenkov@msun.ru

Abstract

In the article, based on archival documents of the Russian State Historical Archive of the Far East, the changes in the management of the Vladivostok Commercial Port under the conditions of the industrial boom of the beginning of the 20th century are considered. The activities of special meetings and commissions that developed port development projects and proposals for improving its management are disclosed. The general characteristics of Vladivostok commercial port establishment projects are given, the regulatory framework regulating the order of port administration is analyzed, its evolution is traced during almost the first decade of the 20th century. Attention is drawn to the inconsistency of the organization of the port administration, which generated numerous interdepartmental contradictions between the naval, the military with one and civilian departments, as well as between the civil departments themselves - the ministries of trade and industry, finance, communications and internal affairs.

Key words: Vladivostok port, Siberian railway, commercial port, temporary position, port management, commercial port presence on port affairs.

Введение

История Владивостокского порта – отражение истории освоения и развития дальневосточного региона, его постепенного вхождения в общее экономическое пространство страны. Начавший свое развитие как военный пост, он приобрел статус главного Российского порта на Тихом океане – базы российского флота и сохранял этот статус в течение всей своей истории. Однако будущее порта, его место в экономическом развитии региона и страны в целом, определялось не только этим, а развитием его гражданской составляющей – Владивостокского коммерческого, а затем торгового, порта, толчок к которому дала транспортная модернизация региона – строительство Транссибирской магистрали, естественной географически конечной точкой, которой стал Владивосток. Длительный период, когда порт существовал в режиме порто-франко, позволил ему занять место главного товарораспределительного центра для всего Приамурского края с отдаленными территориями – Камчатского полуострова и острова Сахалин. Одновременно порт превратился в центр международной торговли и торгового мореплавания. Цель статьи – показать эволюцию управления портом в соответствии с изменяющимися приоритетами развития региона в первое десятилетие XX века

1. Методы исследования

Основой исследования стали архивные материалы из фондов Российского государственного исторического архива Дальнего Востока (РГИА ДВ), представленные в основном законодательными актами и материалами делопроизводства: это записки чиновников, изучавших по поручению министров вопросы развития торгового мореплавания и судоходства на Дальнем Востоке; представления министерств, инициировавших те или иные мероприятия, связанные с изменениями в управлении, финансировании, технической модернизации порта; материалы совещаний по портовым делам, сыгравших роль в разработке проектов реорганизации порта и др. Большая часть этих документов доступна исследователю в печатном виде в изданных РГИА ДВ сборниках документов и материалов, в том числе и составленных на основании Полного собрания законов Российской империи (собрание третье) [3, 5]. Совокупность документов составила репрезентативную источниковую базу, позволившую исследовать изменения в управлении портом в первые десятилетия XX века.

2. Степень изученности проблемы

Несмотря на то, что порт сыграл важнейшую роль более чем в полутора вековой истории

Владивостока, его история все еще находится на периферии региональной историографии. Первые характеристики порта мы находим в трудах российских общественных деятелей и исследователей конца XIX в., рассматривавших функционирование порта в связи с развитием морской торговли и мореплавания. Отметим вышедший в 1883 году труд К. А. Скальковского [10], который оценил потенциал единственного тихоокеанского порта в условиях доминирования военно-стратегических задач освоения региона. В советский период внимание порту в историческом контексте уделяли исследовавший судоходство и мореплавание В. П. Бянкин [1], в контексте развития дальневосточного тыла в годы Первой мировой войны материалы по истории порта отражены в монографии Т. Я. Иконниковой [6]. Современные исследователи рассматривают проблемы функционирования Владивостокского порта в условиях Первой мировой войны [2, 4], а также правительственные программы его модернизации [7]. Однако особенности управления портом на протяжении всей его истории, поиск оптимальной модели сочетания интересов военного и коммерческого порта пока не были предметом самостоятельного исследования. Этот пробел в хронологических рамках начала XX века отчасти пытаются восполнить авторы.

3. Результаты исследования

Необходимость развития гражданского (коммерческого) порта на Тихоокеанском побережье стала очевидной в начале 80-х годов XIX века в связи с открытием рейсов Добровольного флота (Доброфлота).

Доход Доброфлота за 1885 г. составил 174 100 руб. Фрахтовый заработок за этот же год был определен в сумме 1 160 900 руб. Начиная с 1885 г., Доброфлот занял господствующее положение в перевозке русских товаров и пассажиров морем из Европейской России на русский Дальний Восток. [1, с. 17]

Перспективы русского судоходства требовали соответствующей инфраструктуры. В этом случае морской порт, обеспечивающий потребности российских судоходных компаний и прежде всего Доброфлота, становился звеном в решении задач интеграции территории Приамурского края в единое экономическое пространство империи. Одновременно становилась все более очевидной необходимость развития этой территории в интересах международной торговли, чему немало способствовал введенный во Владивостоке еще в декабре 1862 г. режим порто-франко.

Владивосток далеко не сразу стал местом размещения коммерческого (торгового) порта. Этому предшествовал долгий и сложный процесс проектирования, сопровождавшийся столкновением мнений высокопоставленных чиновников и инженеров. Перспективы Владивостока были оценены еще К. А.

Скальковским, который видел его достоинства в том, что «при обилии гаваней на Владивостокском рейде со смежными бухтами может поместиться значительная военная эскадра и масса коммерческих судов». При этом «все эти суда могут выходить из порта при каком бы то ни было ветре и во всякую погоду, ибо выход в море открыт через пролив в обе стороны» [10, с. 13]. К моменту, когда К. А. Скальковский описывал ситуацию во Владивостоке (1883 г.), вопрос о выборе места для коммерческого порта еще не был окончательно решен в его пользу. Тем не менее, здесь уже существовали построенные за счет города пристани, обеспечивающие малый каботаж в интересах местного населения. Таким образом, изначально складывалась ситуация, предопределившая противоречивость развития Владивостокского порта одновременно как главного военного и основного коммерческого порта российского порта на Тихом океане.

Новый виток обсуждения перспектив Владивостока как коммерческого порта был связан с реализацией глобального транспортного проекта – Транссибирской магистрали - Великой Сибирской железной дороги, как принято было называть магистраль в источниках того времени. В 1891 году в пользу немедленного сооружения во Владивостоке коммерческой гавани высказалась особая межведомственная комиссия, учрежденная для «распределения земель». Год спустя первый приамурский генерал-губернатор А. Н. Корф, предвидя возрастание государственного значения Владивостока как исходного пункта Великого сибирского пути, ходатайствовал перед управляющим министерством путей сообщения С. Ю. Витте «о составлении такого проекта в означенном министерстве» [5, с. 127]. Созданная для обсуждения данного вопроса особая комиссия под председательством самого приамурского генерал-губернатора высказалась за проведение дополнительного «подробного исследования» силами направленных в край специалистов. Работа этой комиссии дала толчок появлению нескольких проектов устройства коммерческого порта в бухтах близ Владивостока (Новик, Первая Речка, Патрокл), а также вне Владивостока (Посьет). В конечном же итоге специалисты все более склонялись в учреждении коммерческого порта именно во Владивостоке, который бы сохранял бы и статус главного военно-морского порта на Тихом океане. Аргументы сторонников этой точки зрения изложены примерно в одно время в двух, выражаясь современным языком, аналитических записках, авторами которых были представляющий Министерство финансов тайный советник Н. П. Забугин и инженер В. Е. Тимонов, член высочайше учрежденной комиссии для исследования на месте дела сооружения Сибирской железной дороги [5, с. 110-127]. Представители же морского ведомства сомневались в целесообразности и возможности

одновременного существования в бухте Золотой рог коммерческого и военного портов. В конечном итоге по соображениям экономии и в интересах Сибирской железной дороги коммерческий порт остался в бухте Золотой рог. При этом очевидным было разделение его функций на уровни – местный (для нужд города, снабжения населения, гарнизона крепости) и международный, связанный с обслуживанием внешних экономических связей России в тихоокеанском регионе. С 1896 г. Министерство путей сообщения начало выделять средства на устройство бухты «Золотой Рог».

Таблица 1

Средства Министерства путей сообщения для устройства бухты Золотой рог

Год	Выделено средств, руб.
1896	600 000
1897	300 000
1898	427 000
Всего	1 327 000

Финансирование позволило приступить к работам по постройке набережной. Одновременно начались поиски в прилегающих к Владивостоку бухтах места для большого коммерческого порта [9, л. 1-7].

Долгое время статус порта не был определен, и он функционировал на основе высочайше утвержденного 13 мая 1898 г. Временного положения об управлении Владивостокским коммерческим портом [8], подготовленного специально образованной Комитетом сибирской железной дороги комиссией. В заключении Комиссии, одобренной на объединенном заседании Комитета сибирской железной дороги и департамента государственной экономики Государственного совета, предлагалось создать во Владивостоке под председательством военного губернатора Приморской области Временный комитет по управлению портом. В его состав должны были войти начальник Уссурийской железной дороги; начальник работ коммерческого порта; капитан над коммерческим портом; по одному представителю от городского управления, министерств финансов и морского, местного прокурорского надзора, Добровольного флота и Китайско-восточной железной дороги (КВЖД). Кроме того, на Комитет возлагалась разработка двух проектов: проекта административного управления для Владивостокского коммерческого порта на основании временной его эксплуатации и общего проекта развития порта и его оборудования» [8, 323]. Оба проекта согласовывались с приамурским генерал-губернатором. Первый из них направлялся в адрес министра внутренних дел, обеспечивавшего его прохождение «в установленном порядке». Второй - через министра путей сообщения вносился на рассмотрение Комитета Сибирской железной дороги. Таким образом, двойственность

положения Владивостокского порта только усилилась:

- 1) он существовал наряду с военно-морским;
- 2) в административном порядке замыкался на Министерство внутренних дел;
- 3) в части проектирования и определения перспектив развития всецело находился под контролем Комитета Сибирской железной дороги.

Следует также отметить, что на основании примечания к ст. 607 Устава торгового Владивосток наряду с Севастополем и Кронштадтом был изъят из общепринятого в Российской империи порядка управления портами. Но если Севастополь оставался исключительно военным портом, а коммерческий порт в Кронштадте обеспечивал лишь нужды самого порта, Владивостоку отводилась особая роль в развитии внешнеэкономических связей России.

Узость подобного порядка управления стала очевидной сразу после завершения русско-японской войны, когда утрата южной Маньчжурии с вновь выстроенным и благоустроенным портом Дальний заставила российское правительство обратить внимание на коренной русский порт на Тихом океане – Владивосток. Однако уровень портовой инфраструктуры и сам порядок управления портом находились в полном противоречии с теми задачами, которые порт призван был решать в условиях начинавшегося промышленного подъема и не соответствовали нарастающему грузообороту.

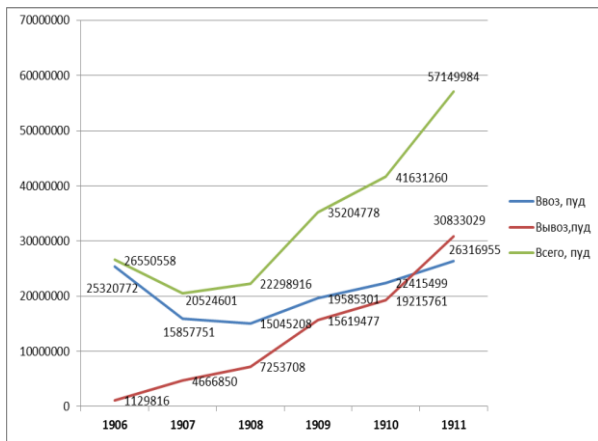


Рис.1 Динамика грузооборота Владивостокского торгового порта, 1906-1911[9, л. 1-7]

Уже в конце 1908 г. министерство торговли и промышленности инициировало в Государственной думе обсуждение закона, результатом которого должны были стать изменения в управлении портом. В представленном министром И. П. Шиповым докладе были обобщены все недостатки сложившейся архаичной системы.

Первым недостатком был сам особый порядок управления портом, который не соответствовал статусу наиболее развитого российского порта на Тихом океане. Деятельность временного

комитета по управлению портом оказалась «непродуктивной». Чрезвычайная занятость возглавлявшего его военного губернатора Приморской области привела к тому, что комитет не мог управлять портом «надлежащим образом». Со временем входившие в его состав представители ведомств стали решать свои узковедомственные задачи, «не придерживаясь какого-либо общего плана улучшения порта и не всегда сообразуясь с общими интересами морской торговли и судоходства» [5, с. 306]. Проблемы порождала межведомственная неразбериха. Как уже отмечалось, порт находился в ведении Министерства внутренних дел, а все немалые суммы портовых и ластовых сборов зачислялись на счет Министерства торговли и промышленности, в ведении которого, следует заметить, находилось заведование портами империи. Любая попытка решить вопрос о выделении сумм из собранных на развитие города сборов сопровождалась бюрократическими процедурами, порождая бесконечное множество бумаг.

Особое значение в новых условиях приобретал «человеческий фактор». Существующий порядок предполагал назначение на должности начальников портов и других высших лиц портовой администрации исключительно офицеров морского флота, состоящих на действительной службе, в отставке или запасе. Для Владивостока это создавало непреодолимые препятствия в организации эффективного управления портом.

И. П. Шипов подчеркивал, что полное «неустройство» порта, разнообразие национальностей посещающих порт судов, разноплеменность портовых рабочих, а главное, принадлежность портовой территории к разным ведомствам, придают особое значение «выбору лица, которое станет во главе коммерческого порта». Очевидно, что в этих условиях первостепенное значение имело знание местных условий ведения морской торговли, а также надлежащая юридическая и экономическая подготовка. Знание же морского дела для будущего начальника порта имело, по мнению министра, «лишь второстепенное значение» [5, с. 309].

20 ноября 1909 г. одобренный Государственной думой и Государственным советом закон об установлении штата Владивостокского торгового порта и о порядке заведования означенным портом получил высочайшее одобрение. Закон распространял на Владивостокский коммерческий (торговый) порт действие правил об управлении торговыми портами, изложенное в ст. 607-635 Устава торгового. Одновременно прекращалось действие Временного положения об управлении Владивостокским коммерческим портом от 13 мая 1898 г. Изменения коснулись заведования портом, которое возлагалось на начальника порта. Причем на эту должность кроме офицеров могли назначаться «и другие лица, получившие

надлежащую подготовку» [3, с. 160]. В руках помощника начальника порта сосредоточивалось «исполнение» строительных работ и составление проектно-сметной документации.

В законе были учтены предложения Министерства торговли и промышленности относительно состава и компетенции Владивостокского присутствия по портовым делам. В него, кроме установленного для всех портов империи состава (начальник порта - председатель, представители министерств внутренних дел, путей сообщения, финансов, юстиции, торговли и промышленности (по одному от каждого), городского головы, председателей местного Биржевого комитета и Комитета торговли и мануфактур и двух членов от местного купечества) вошли с правом участия на общих основаниях представители КВЖД, военного и морского ведомств. При этом для обеспечения особых интересов военного порта был выработан механизм взаимодействия с морским и военным ведомствами в случае, если их представители окажутся на заседании Присутствия в меньшинстве. Серьёзно расширены были и полномочия присутствия в других сферах. Так

наряду с согласием коменданта крепости для любого долговременного строительства на территории порта было необходимым разрешением Присутствия по портовым делам. Одновременно были утверждены штаты управления Владивостокского торгового порта, которые соответствовали штатам других крупнейших российских портов [3, с. 162].

Заключение

Изменение в управлении Владивостокским портом, распространение на него общепринятого порядка управления морскими портами империи отвечало требованиям момента и было одним из факторов развития порта в предвоенный период. За период 1908-1911 гг. ежегодный прирост грузооборота Владивостокского порта достигал 45% [5, с. 354]. В 1911 г. порт имел 14 причалов общей длиной 840 погонных саженей и 2 строящихся причала. Его грузооборот превысил 1 млн. т. [9, л. 1-7]. Именно портовое строительство позволило правительству, хотя и с опозданием, приступить накануне Первой мировой войны к модернизации Владивостокского порта.

Литература

1. Бянкин В. П. Русское торговое мореплавание на Дальнем Востоке (1860–1925 гг.). Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1979. 255 с.
2. Виноградов П. В. Архангельский и Владивостокский порты в годы Первой мировой войны (1914–1917 гг.) // Военно-исторический журнал. 2015. № 10. С. 53–56.
3. Дальний Восток в материалах законодательства. 1909 г. / Сост. Е. М. Гончарова, А. А. Горчаков. Владивосток: ФКУ «Российский государственный исторический архив Дальнего Востока», 2015. 182 с.
4. Дальний Восток и страны восточной Азии накануне и в годы Первой мировой войны: сб. науч. ст. Владивосток: Изд-во «Рея», 2016. 296 с.
5. Для пользы и процветания: Из истории экономических связей российского Дальнего Востока со странами АТР. 1856–1925 гг.: документы и материалы. Владивосток: Дальнаука, 2012. 592 с.
6. Иконникова Т. Я. Дальневосточный тыл России в годы Первой мировой войны. Хабаровск: Изд-во Хабаровского гос. пед. ун-та, 1999, 365 с.
7. Илларионов А. А. Проблема развития дальневосточных портов в начале XX в. в планах и решениях правительства // Вестник Морского государственного университета имени адмирала Г. И. Невельского. Общественные науки. Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2005. С. 7-14.
8. Полное собрание законов Российской империи. Собр. 3-е. Т. 18. 1898. Отд. 1. СПб.: Б.и., 1901. 1120 с.
9. Российский государственный исторический архив Дальнего Востока (РГИА ДВ). Ф. 487. Владивостокский коммерческий порт. Оп. 1. Д. 9.
10. Скальковский К. Русская торговля в Тихом океане: экономическое исследование русской торговли и мореходства в Приморской области Восточной Сибири, Кореи, Китая, Японии, Калифорнии. СПб.: Б.и., 1883. 515 с.

References

1. Byankin V. P. Russkoe trgovoe moreplavanie na Dal'nem Vostoke (1860–1925 gg.). Vladivostok : Dal'nevost. kn. izd-vo, 1979. 255 s.
2. Vinogradov P. V. Arkhangel'skiy i Vladivostokskiy porty v gody Pervoy mirovoy voyny (1914–1917 gg.) // Voennno-istoricheskij zhurnal. 2015. № 10. S. 53–56.
3. Dal'niy Vostok v materialakh zakonodatel'stva. 1909 g. / Sost. E.M. Goncharova, A.A. Gorchakov. Vladivostok: FКУ «Rossiyskiy gosudarstvennyy istoricheskiy arkhiv Dal'nego Vostoka», 2015. 182 s.
4. Dal'niy Vostok i strany vostochnoy Azii nakanune i v gody Pervoy mirovoy voyny: sb. nauch. st.. Vladivostok: Izd-vo «Reya», 2016. 296 s.
5. Dlya pol'zy i protsvetaniya: Iz istorii ekonomicheskikh svyazey rossiyskogo Dal'nego Vostoka so stranami ATR. 1856–1925 gg. : dokumenty i materialy. Vladivostok: Dal'nauka, 2012. 592 s.
6. Ikonnikova T.Ya. Dal'nevostochnyy tyl Rossii v gody Pervoy mirovoy voyny. Khabarovsk: Izd-vo Khabarovskogo gos. ped. un-ta, 1999, 365 s.
7. Illarionov A. A. Problema razvitiya Dal'nevostochnykh portov v nachale KhKh v. v planakh i resheniyakh pravitel'stva // Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta imeni admirala G. I. Nevel'skogo. Obshchestvennyye nauki..Vladivostok : MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2005. S. 7 -14

8. Polnoe sobranie zakonov Rossiyskoy imperii. Sobranie 3-e. T. 18. 1898. otd.1. SPb.: B.i., 1901. 1120 s.
9. Rossiyskiy gosudarstvennyy istoricheskiy arkhiv Dal'nego Vostoka (RGIA DV). F. 487.Vladivostokskiy kommercheskiy port. Op. 1. D. 9.
10. Skal'kovskiy K. Russkaya trgovlya v Tikhom okeane: ekonomicheskoe issledovanie russkoy trgovli i morekhodstva v Primorskoj oblasti Vostochnoy Sibiri, Koree, Kitae, Yaponii, Kalifornii. SPb.: B.i., 1883. 515 s.

УДК 656.6, 621.3

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЭРОЛОДОК КАК СКОРОСТНОГО АМФИБИЙНОГО ТРАНСПОРТА

Небылов Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой №11
Государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67
тел. (812) 494-70-16, e-mail: nebylov@aanet.ru

Небылов Владимир Александрович

кандидат технических наук, член совета директоров
ЗАО «МИПАКТ-Миллениум Холдинг»
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67
тел. (812) 494-70-16 e-mail: iiaat@aanet.ru

Сукрит Шаран

советник
ЗАО «МИПАКТ-Миллениум Холдинг»,
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67
тел. (812) 494-70-16 e-mail: iiaat@aanet.ru

Аннотация

В статье рассмотрены преимущества аэролодок в сравнении с другими видами транспортных аппаратов и возможные направления совершенствования их транспортных характеристик, расширения рынка. Показано, что применение на аэролодках комбинированных двигателей, совмещающих достоинства современных высокоэффективных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и облегченных электрических двигателей, может позволить повысить энергетическую эффективность и экологическую чистоту этих скоростных амфибийных аппаратов. Для облегчения выхода аэролодки в режим глиссирования важно также оптимизировать ее аэро- и гидродинамические характеристики и использовать современные достижения nano-технологий для снижения энергетических потерь в разных агрегатах аэролодки.

Характерный для городских автомобилей многократно повторяющийся цикл разгон-торможение не так типичен для аэролодок, что заставляет искать более эффективные циклы работы для комбинированного двигателя и оптимизации переключения потоков энергии на борту аэролодки. Это требует внедрения специальных средств автоматизации управления аэролодкой, пока не созданных. Необходимы и другие исследования по обеспечению для аэролодки энергетически выгодных режимов разгона, выхода на глиссирование и крейсерского движения за счет согласованной работы всех органов управления. На примере показано, что использование электродвигателя может быть выгодно при маршрутах движения, позволяющих производить достаточно частую подзарядку аккумулятора. Проблема повышения емкости аккумуляторных батарей должна быть скоро решена, поскольку этого требует также рынок электроавтомобилей. Ясно, что тенденция все более широкого использования комбинированных двигателей будет и далее развиваться для транспортных аппаратов разных типов.

Ключевые слова: Аэролодки, режим глиссирования, комбинированный двигатель, энергоэффективность, экологическая чистота.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AIRBOATS AS A SPEED AMPHIBIAN TRANSPORT

Alexander V. Nebylov

doctor of Technical Sciences, professor, head of the chair №11
the State University of Aerospace Instrumentations
190000, St. Petersburg, ul. Bolshaya Morskaya, 67.
Tel. (812) 494-70-16 e-mail: iiaat@aanet.ru

Vladimir A. Nebylov

Candidate of Technical Sciences

Board Member of IIAAT Holding JSC
190000, St. Petersburg, ul. Bolshaya Morskaya, 67
Tel. (812) 494-70-16 e-mail: iiaat@aanet.ru

Sukrit Sharan
Board Member
IIAAT Holding JSC
190000, St. Petersburg, Russia. Bolshaya Morskaya, 67
Tel. (812) 494-70-16 e-mail: sukrit_s@mail.ru

Abstract

Important advantages of airboats and methods for their improvement are comprehensively considered. It is shown that the use of hybrid engines connecting the advantages of modern internal combustion engines (ICE) and lightweight electric engines may allow increasing the energy efficiency and ecological purity of these amphibious and all-terrain high-speed vehicles. To facilitate the release of airboat in the mode of gliding it is also important to optimize its aerodynamic and hydrodynamic characteristics and to use the modern achievements of nano-technologies to reduce energy losses in various airborne units.

The repeated acceleration-deceleration cycle, which is typical for urban cars, is not so typical for airboats, which makes it necessary to search for more efficient cycles of operation for a combined engine and to optimize the switching of energy flows onboard a airboat. This requires the introduction of special automation tools for airboat control, which have not yet been created. Other research is also needed to provide energy-efficient modes of acceleration, planning access to gliding and cruising for airboat due to the coordinated operation of all control units. In example, it is shown that the use of an electric motor can be advantageous in the case of airboat routes, allowing a sufficiently frequent recharge of the battery. The problem of increasing the capacity of storage batteries should be resolved soon, as the market of electric cars also requires it. It is clear that the trend of increasing use of combined engines will continue developing for transport vehicles of different types.

Keywords: airboats, mode of gliding, combined engine, energy efficiency, ecological purity

Введение

Транспортная отрасль является одним из быстро развивающихся направлений мирового технического прогресса и очень чувствительна к инженерным инновациям. Основные виды транспортных аппаратов быстро совершенствуются как по технико-экономическим показателям, так и по экологичности и безопасности движения.

Автомобильный транспорт осваивает новые экономичные и экологически чистые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), более совершенную трансмиссию и разные варианты сочетания ДВС с электрическими двигателями, включая полностью электрический привод. Электрический самолет уже создан (например, АФ-32НС [1]) и будет расширять свою рыночную нишу по мере совершенствования аккумуляторов электроэнергии и солнечных батарей, особенно в экваториальных странах. Дизель-электрический принцип построения двигательной установки расширяет свое применение и на железнодорожном транспорте, и в судостроении.

Медленнее происходит модернизация специальных амфибийных видов транспорта. Конечно, для большинства мегаполисов транспортная инфраструктура хорошо развита и обычных автомобилей, поездов, судов и самолетов достаточно для решения большинства транспортных задач. Но на бездорожье возникает потребность в

специальных транспортных аппаратах. Вертолеты различных типов частично решают проблему, но требуют максимальных затрат на перевозки по сравнению с любыми другими транспортными аппаратами.

В качестве наиболее востребованных амфибийных транспортных аппаратов можно рассматривать аппараты на воздушной подушке, экранопланы и аэролодки.

Аппараты на статической воздушной подушке, создаваемой вентилятором в зоне, ограниченной гибким ограждением, достигли своего совершенства [2]. Их недостатки – дороговизна эксплуатации, ограниченные возможности движения по неровной поверхности, сравнительно небольшая скорость, трудности точного маневрирования.

Экранопланы как аппараты на динамической воздушной подушке обходятся в эксплуатации дешевле вертолетов и даже самолетов, имеют самолетные скорости полета. Однако взлет с воды требует избыточной мощности двигателей, что в итоге снижает транспортную эффективность. Точное выдерживание предельно малой высоты полета, при которой действует экранный эффект, требует дополнительного аппаратного обеспечения, особенно при движении над твердой неровной поверхностью [3]. Маневрирование без крена затрудняет полет по извилистым рекам. Некоторые до сих пор не решенные проблемы построения надежных и дешевых экранопланов заставляют пока рассматривать их как

перспективный вид транспорта, требующий совершенствования [4].

Аэролодки могут быть использованы в любое время года при движении над любой достаточно ровной поверхностью: водой, снегом, льдом, землей, пашней, болотом. Движителем аэролодки является воздушный пропеллер, а ровное, покрытое пластиковой «чешуей» или выполненное из композитных материалов днище корпуса способствует быстрому выходу в режим глиссирования. Пример аэролодки с корпусом из алюминиевых сплавов показан на рис.1.

Режим глиссирования достижим наступает при скорости движения, немного большей скорости распространения волны по воде. При ее достижении аппарат как-бы приподнимается над водной поверхностью и гидродинамическое сопротивление снижается. До момента выхода на глиссирование движитель должен развивать все большую мощность и увеличивать расход топлива, но после выхода на глиссирование сила сопротивления снижается и расход топлива при крейсерском движении сокращается. Аналогичная ситуация возникает при преодолении экранопланом «горба гидродинамического сопротивления» при взлете, но для аэролодки выход на глиссирование требует все же меньшей мощности движителя, чем взлет экраноплана. При старте движения с твердой поверхности выход в режим глиссирования также требует пика мощности движителя. Специально приспособленная форма днища корпуса может обеспечить снижение этого пика. На практике форму и покрытие днища оптимизируют на основе комплексных критериев, добиваясь наивысших показателей эффективности в разных условиях. При выходе в режим глиссирования существенно уменьшается площадь соприкосновения днища с водой, снижается вязкое сопротивление движению и повышается скорость хода.

Правильно спроектированная аэролодка, фактически использующая, как и экраноплан, динамическую воздушную подушку, но более дешевая и маневренная, может рассматриваться сейчас как наиболее эффективный вид амфибийного скоростного транспорта, востребованный рынком. Авторы делают такой вывод после многолетней работы над повышением рыночной привлекательности экранопланов [5].

1. Аэролодки с комбинированным двигателем

Использование на аэролодке комбинированного двигателя, т.е. сочетание ДВС и электродвигателя, является существенным инновационным элементом, повышающим конкурентоспособность аэролодки. Принцип комбинированного двигателя хорошо отработан для автомобилей в нескольких концептуальных

вариантах. Наиболее простой и применимый также к аэролодкам вариант состоит в том, что ДВС работает в оптимальном для него режиме средней мощности при минимальном удельном потреблении топлива. При остановках и медленном движении ДВС вращает электрогенератор и подзаряжает аккумулятор. Аккумулятор может подзарядиться также от внешнего источника электроэнергии на стоянке. При разгоне, выходе на глиссирование, высокоскоростном движении или других режимах эксплуатации с повышенным расходом энергии усилия ДВС дополняются электродвигателем, питаемым от аккумулятора. Возможен также режим движения при выключенном ДВС только за счет электродвигателя, если емкости аккумулятора достаточно для этого.

Перечисленное разнообразие режимов движения соответствует принятому в комбинированных автомобилях параллельному принципу построения их силовой установки (MildHybrid).

Оптимальные мощности ДВС и электродвигателя на аэролодке можно оценить в зависимости от массы загруженной аэролодки, расчетной скорости крейсерского движения, особенностей маршрута движения, выбранной тактики использования аэролодки. Факторами неопределенности при этом являются число пассажиров в салоне, характер маневрирования по курсу и скорости в конкретном маршруте, характер морского волнения.

Важно, что электродвигатель значительно легче ДВС той же мощности. При отсутствии на борту электродвигателя приходится ставить ДВС на значительной высоте (около метра), чтобы обеспечить его соосность с пропеллером. В результате расположение центра тяжести аппарата оказывается высоким, что отрицательно сказывается на устойчивости в процессе маневрирования. При использовании комбинированного энергопитания соосно с пропеллером может быть расположен более легкий электродвигатель, а тяжелый ДВС опускают ниже, что понижает центр тяжести аппарата. В этом – дополнительное достоинство комбинированного двигателя на аэролодке. Однако основное его достоинство при правильном проектировании – топливная экономичность.

2. Обеспечение баланса требуемой и располагаемой энергии на борту гибридной аэролодки

Первичным источником и механической, и электрической энергии на борту аэролодки является ДВС, а не электрогенератор (а также возможно аккумулятор, заряженный от внешнего источника на специально оборудованной стоянке).

Оценить требуемую на борту суммарную мощность двигателей Р€ можно по следующему правилу. Если аэролодка не имеет грубых ошибок в проектировании днища и других элементов, для вывода в режим глиссирования каждых 10 кг массы (включая вес лодки, топлива и пассажиров) нужна одна лошадиная сила мощности движителя. Для 10-местной лодки можно принять полезную нагрузку в $P=800$ кг и коэффициент полезной нагрузки $w=0.5$ (т.е. 50% от общей «взлетной» массы составляет полезная нагрузка). Тогда полная масса загруженной лодки составит $M=P/w=1600$ кг и для нее потребуется полная мощность 160 л.с. Для увеличения скорости уже в режиме глиссирования потребуется дальнейшее увеличение мощности, сначала небольшое, потом существенное. Указанный рост требуемой мощности движителей определяет критическое значение крейсерской скорости V_k , превышение которого нецелесообразно.

Оценим возможные пропорции в питании движителя со стороны ДВС и электродвигателя. Для этого введем следующие характеристики маршрута движения аэролодки с размерностью времени:

тк - время движения с крейсерской скоростью (превышающей скорость выхода на глиссирование);

тм - время маневрирования (со скоростью, меньшей крейсерской)

тс - время между стартом и выходом на глиссирование.

Сумма указанных трех типов временных интервалов определяет время движения по заданному маршруту $T = t_c + t_m + t_k$.

Электродвигатель должен преобразовывать электрическую энергию от генератора в механическую энергию вращения вала пропеллера только в интервале тк. В интервалах тс и тм основную роль в питании движителя играет ДВС, направляющий избыток своей мощности также на подзарядку аккумулятора.

Нормированные интервалы времени относительно полной длительности полета T могут составлять, например, $t_c/T=0.05$, $t_m/T=0.25$, $t_k/T=0.70$. В интервале тс, а также возможно после полета, аккумулятор может заряжаться сильным током. В интервале тм ток зарядки будет меньше, но в течение более длительного времени. Зарядка аккумулятора должна быть дольше, чем его разрядка. Поэтому в интервале тк большая часть мощности на движитель выдает ДВС, и только малую часть этой мощности – электродвигатель. Иначе заряда аккумулятора не хватит.

3. Оценка преимуществ аэролодки с гибридным двигателем

Экономия расхода энергии на движение аэролодки может происходить за счет выравнивания графика нагрузок для ДВС и исключения режима его больших оборотов, не экономичного и экологически не благополучного. Покроет ли эта экономия стоимость аккумулятора – требует исследования. Гибридный двигатель может быть выгоден при нестационарном режиме нагрузки с этапами разгон - выход на глиссирование - крейсерское движение – маневрирование с несколько меньшей скоростью, но все же при глиссировании. Нужна модель движения лодки и работы ее агрегатов в указанных режимах.

Рассмотрим пример расчета эффективности гибридного двигателя при движении аэролодки по графику, изображенному на рис.2,а, где показана расходуемая движителем мощность Р€ (сплошная жирная линия) в зависимости от времени. Длительность движения составляет $T=60$ мин.

В момент $t=0$ движение начинается при подаче напряжения от аккумулятора на электродвигатель, заставляющий воздушный пропеллер почти бесшумно вращаться, а лодку – набирать скорость. Этот стартовый режим движения без использования ДВС продолжается до момента t_1 , после чего запускается ДВС и, постепенно прогреваясь, плавно развивает мощность механической вращения до оптимальной величины $P_{двс}$ к моменту времени t_2 . Аэролодка при этом быстро увеличивает скорость, выходит в режим глиссирования при скорости V_g (при потребляемой мощности P_g) и далее достигает чуть большей скорости V_m , удобной для маневрирования.

Дальнейшее увеличение скорости до некоторой величины крейсерского движения V_k возможно при совместной работе ДВС и электродвигателя с питанием от аккумулятора, и длительность такого высокоскоростного движения зависит от заряда аккумулятора и от величины крейсерской скорости V_k , обеспечиваемой суммарной мощностью комбинированного двигателя $P_k > P_{двс}$.

Движение с крейсерской скоростью V_k может прерываться участками движения со скоростью маневрирования $V_m < V_k$. В рассматриваемом примере такое прерывание происходит один раз на участке от t_3 до t_4 . При этом требуемая мощность движителя становится P_m , причем $P_m < P_k$ и даже $P_m < P_{двс}$. Мощности ДВС должно хватить не только для движения со скоростью V_m , но и для подзарядки аккумулятора. После окончания маневрирования аэролодка опять развивает крейсерскую скорость V_k на время от t_4 до t_5 . В момент t_5 оба двигателя отключают от движителя и ДВС переключают на вращение вала генератора, обеспечивая зарядку

аккумулятора в интервале от t_5 до T . В момент T цикл движения аэролодки заканчивается. Интервалы времени, в течение которых происходит подзарядка аккумулятора, показаны на рис.2,б. Введенные ранее три режима движения t_c , t_m и t_k для рассмотренного примера можно конкретизировать по длительности так: $t_c = t_2 - t_1$, $t_m = t_4 - t_3$, $t_k = t_3 - t_2 + t_5 - t_4$.

Если для выхода на глиссирование аэролодки массой 1600 кг, как указано выше, требуется мощность 160 л.с., то для движения с крейсерской скоростью может потребоваться 300 л.с. Это полная мощность. Она может складываться из мощности ДВС в 270 л.с.=201 квт и мощности электродвигателя в 30 л.с.=22,4 квт.

Если аккумулятор имеет емкость 150 А-час, то он сможет питать напряжением 24В электродвигатель мощностью в 30 л.с. в течение $(150 \times 24) / (30 \times 745,7) = 0,16$ час = 10 мин (принято 1л.с.=745,7вт). Для полной зарядки такого аккумулятора от электрогенератора потребуется 3 часа при токе зарядки 50 Ампер. Ток зарядки может меняться в зависимости от соотношения располагаемой мощности ДВС и требуемой мощности работы движителя в режимах t_c и t_m . Соответствующие описанным возможностям два литиевых аккумулятора RT-Li50PRO-24 весом 17,5кг и емкостью 75 А-час каждый стоят $2 \times 126 = 252$ тыс руб. [6].

Ключевые вопросы проектирования аэролодки с гибридным двигателем состоят в выборе мощности ДВС и емкости аккумулятора. Можно задаться условием $P_{двс} = k P_k$, где k – некий коэффициент, обычно близкий к числу 0,9, а требуемую мощность для крейсерского движения P_k определить по величине V_k и массе аэролодки. Тогда потребуется емкость аккумулятора

$$E_a = P_k t_k (1 - k) \tag{1}$$

При $P_k = 300$ л.с., $t_k = 0,7$ час, $k = 0,9$ из (1) получим требуемую емкость аккумулятора в 21 л.с.-час или 15660 вт-час или при напряжении 24В получим $15660 / 24 = 652,5$ А-час. Это в 4,4 раза превышает емкость двух аккумуляторов RT-Li50PRO, указанную выше. Требуемые в этом случае семь батарей будут стоить на российском рынке у российского производителя $126 \times 7 = 882$ тыс. руб, что составляет около половины стоимости аэролодки и вряд ли допустимо.

Чтобы снизить требуемую емкость аккумулятора, можно увеличить коэффициент k до 0,95 и время разряда аккумулятора в крейсерском движении уменьшить до $t_k = 0,3$ час. Тогда из (1) получим $E_a = 300 \times 0,3 \times 0,05 = 4,5$ л.с.-час, что эквивалентно 3362 вт-час. При напряжении 24В для емкости аккумулятора получим $3362 / 24 = 140$ А-час. Стоимость необходимых двух аккумуляторов по 75 А-час каждый составит 252 тыс руб, что в принципе

приемлемо. Однако сокращение времени движения с крейсерской скоростью до $t_k = 0,3$ час = 18 мин существенно ограничивает характеристики транспортной эффективности. Проблему может создать и длительное время зарядки аккумулятора (3 часа при токе зарядки 50 Ампер) при использовании ДВС, вращающего генератор, или внешнего источника. Возможно, для сокращения времени простоя аэролодки целесообразно перед началом движения заменять разрядившийся аккумулятор на уже заряженный от внешнего источника, чтобы распараллелить процессы зарядки аккумулятора и движения. Но перетаскивать аккумуляторы весом 35 кг не просто.

Оценим целесообразность использования комбинированного двигателя на рассмотренной аэролодке. Альтернативой является обычный ДВС мощностью 300 л.с., т.е. 224,4 квт.

Чем и насколько ДВС в 270 л.с. лучше ДВС в 300 л.с.? Уменьшение мощности на 10% приведет к снижению среднего топливного потребления тоже примерно на 10%. Сам двигатель с меньшей на 10% мощностью будет немного дешевле, но экономия никак не превысит стоимости электродвигателя и аккумуляторной батареи большой емкости. Снизится также уровень шума и экологически вредных выбросов. Предполагается, что в комбинированном варианте ДВС будет постоянно работать при оптимальном числе оборотов, т.е. без переходных режимов, что полезно для экологической безопасности и экономии топлива. Отсутствие коробки передач в комбинированном двигателе также полезно. Будем считать, что все эти факторы повышают топливную экономичность на 15%.

При суточном потреблении топлива в 30 л будет сэкономлено примерно 4 л, или в пересчете на деньги 150 руб в сутки. Одна аккумуляторная батарея RT-Li50PRO окупится за $252 \cdot 103 / 150 = 1700$ суток или 4,7 года. Но это время превышает срок службы интенсивно эксплуатируемого аккумулятора. Отсюда вывод: в рассмотренном примере экономическая целесообразность использования комбинированного двигателя отсутствует. Однако при меньшей длительности движения с крейсерской скоростью комбинированный двигатель может стать экономически выгодным. И конечно разработка более энергоемких, дешевых и легких аккумуляторов может резко повысить эффективность использования комбинированного двигателя и даже позволить создать полностью электрическую аэролодку.

4. Основные направления совершенствования аэролодок

Совершенствование ДВС для автомобилей происходит без учета специальных потребностей аэролодок, но немедленно используется на них. Это обеспечивает

постоянное улучшение транспортных характеристик аэролодок. Все более важным становится возможность аэролодок передвигаться по снегу и льду, а не только по воде. Это облегчает освоение арктических зон, сибирских рек и других труднодоступных районов вне зависимости от сезона. Однако всепогодность использования аэролодок требует совершенствования формы днища корпуса для обеспечения энергетически выгодного выхода на глиссирование, устойчивости и управляемости движения. Идея добавления к аэролодке небольших крыльев, работающих с использованием экранного эффекта, интересна, но еще более усложняет задачу оптимизации аэро- и гидродинамических характеристик аппарата.

Для устойчивого движения аппарата с толкающим винтом необходимо, чтобы центр давления был позади центра тяжести. Но высоты этих двух точек должны быть одинаковыми, иначе возникнет момент сил, нарушающий стабилизацию аппарата по дифференту. Выход на глиссирование должен приводить к смещению центра гидродинамического давления назад. Это определяется многими факторами, включая правильную балансировку аппарата. Поскольку один воздушный пропеллер с вращением в одну сторону создает кренящий момент, его надо компенсировать либо аэродинамически, либо гидродинамически. Даже незначительные колебания аэролодки по углу рыскания или дифферента должны быть исключены, поскольку свидетельствуют о малом запасе устойчивости. Подобные исследования можно проводить экспериментально, и путем виртуальных экспериментов с использованием программных пакетов, например, COMSOL Multiphysics [7].

В случае использования комбинированного двигателя важно обеспечить требуемые характеристики электрогенератора и электродвигателя. Последние разработки этих электрических машин позволяют в 2-3 раза снизить их вес и повысить надежность [8].

Как и в автомобильной технике, для аэролодок, продаваемых в экваториальные страны, важен вопрос о роли солнечных батарей в обеспечении энергетического баланса на борту.

Средства автоматизации управления несомненно должны активно внедряться на

аэролодках, как и на других транспортных аппаратах. Их проектирование должно происходить на основе использования всех последних достижений теории и практики автоматического управления [9,10].

Заключение

Аэролодки получили широкое применение на рынке скоростных амфибийных транспортных средств в конкурентной борьбе с аппаратами на воздушной подушке и экранопланами. Они не создают для эксплуатационников каких-либо сложных проблем при скоростном движении над водой, землей, льдом и снегом и быстро совершенствуются, принимая и используя многие технологические достижения, пришедшие из автомобильной отрасли.

В статье проанализирована целесообразность использования на аэролодках важного направления совершенствования автомобильной техники – комбинированного двигателя. Показано, что использование электродвигателя может быть выгодно при маршрутах движения, позволяющих производить достаточно частую подзарядку аккумулятора. Характерный для городских автомобилей многократно повторяющийся цикл разгон-торможение не так типичен для аэролодок, что заставляет искать другие эффективные циклы работы для комбинированного двигателя. Это требует разработки специальных алгоритмов и электроники для оптимального переключения потоков энергии на борту аэролодки, отличных от автомобильных. Требуются и другие исследования по обеспечению для аэролодки энергетически выгодных режимов разгона, выхода на глиссирование и крейсерского движения за счет согласованной работы всех органов управления. Для этого могут потребоваться новые датчики и системы автоматизации управления

Благодарность

Исследование было поддержано Российским научным фондом по проекту 16-19-10381. Выражение (1) было выведено при поддержке РФФИ по проекту а.15-08-00423.

Литература

1. Полностью электрический самолет АВФ-32НС. МАКС 2017. ООО Экспериментальная мастерская НаукаСофт». Электронный ресурс <http://xlab-ns.ru/deyatelnost/polnostju-ehlektricheskii-samolet-avf-32ns/>
2. Ashley Holleb. The Hovercraft: A History. The History Press, GB, 2012, 300 p.
3. Nebylov A.V, Wilson P. Ekranoplane - Controlled Flight close to the Sea. Monograph. WIT- Press, Southampton, UK, 2002. 236p.

4. Небылов А.В., Небылов В.А.. Перспективы создания и использования тяжелых экранопланов с интеллектуальными средствами автоматического управления движением. XXX конференция памяти Н.Н. Острякова, ГНФ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 2016.
5. Nebylov Alexander, Nebylov Vladimir. WIG-craft flight control concept for the waved sea. The 7th EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS 2017), Milano, 2017.
6. LiFePo4: 12/24/48В Литиевые тяговые АКБ серия RT-L, RT-LPF. ООО «Радиотех», 2017, электронный ресурс <http://radio-technika.ru/o-produkcii/rt-l/>
7. Программный пакет для мультифизического моделирования. Электронный ресурс <https://www.comsol.ru/products>. 2017.
8. О ПРОЕКТЕ ALL-WIND. ООО «Готовые решения», 2017. Электронный ресурс <http://all-wind.com/ru/our-company/>
9. Nebylov A.V. Editor. Aerospace Sensors. Momentum Press. USA, 2013, 375 p.
10. Alexander Nebylov, Joseph Watson, Editors. Aerospace Navigation Systems. J.Wiley& Sons, ISBN: 978-1-119-16307-7, UK, 2016, 371 p.

References

1. Polnost'ju jelektricheskij samolet AVF-32NS. MAKS 2017. ООО Jeksperimental'naja masterskaja NaukaSoft». Jelektronnyj resurs <http://xlab-ns.ru/deyatelnost/polnostju-ehlektricheskii-samolet-avf-32ns/>
2. Ashley Hollebhone. The Hovercraft: A History. The History Press, GB, 2012, 300 p.
3. Nebylov A.V, Wilson P. Ekranoplane - Controlled Flight close to the Sea. Monograph. WIT- Press, Southampton, UK, 2002. 236p.
4. Nebylov A.V., Nebylov V.A.. Perspektivy sozdaniya i ispol'zovaniya tjazhelyh jekranoplanov s intellektual'nymi sredstvami avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem. XXX konferencija pamjati N.N. Ostrjakova, GNF RF AO «Koncern «ЦНИИ «Электроприбор», Sankt-Peterburg, 2016.
5. Nebylov Alexander, Nebylov Vladimir. WIG-craft flight control concept for the waved sea. The 7th EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS 2017), Milano, 2017.
6. LiFePo4: 12/24/48V Litievye tjavogye AKB serija RT-L, RT-LPF. ООО «Radioteh», 2017, jelektronnyj resurs <http://radio-technika.ru/o-produkcii/rt-l/>
7. Programmnyj paket dlja mul'tifizicheskogo modelirovanija. Jelektronnyj resurs <https://www.comsol.ru/products>. 2017.
 - PROEKTE ALL-WIND. ООО «Gotovyje reshenija», 2017. Jelektronnyj resurs <http://all-wind.com/ru/our-company/>
8. Nebylov A.V. Editor. Aerospace Sensors. Momentum Press. USA, 2013, 375 p.
9. Alexander Nebylov, Joseph Watson, Editors. Aerospace Navigation Systems. J.Wiley& Sons, ISBN: 978-1-119-16307-7, UK, 2016, 371 p.



Рис.1. Аэролодка на 10 пассажиров.

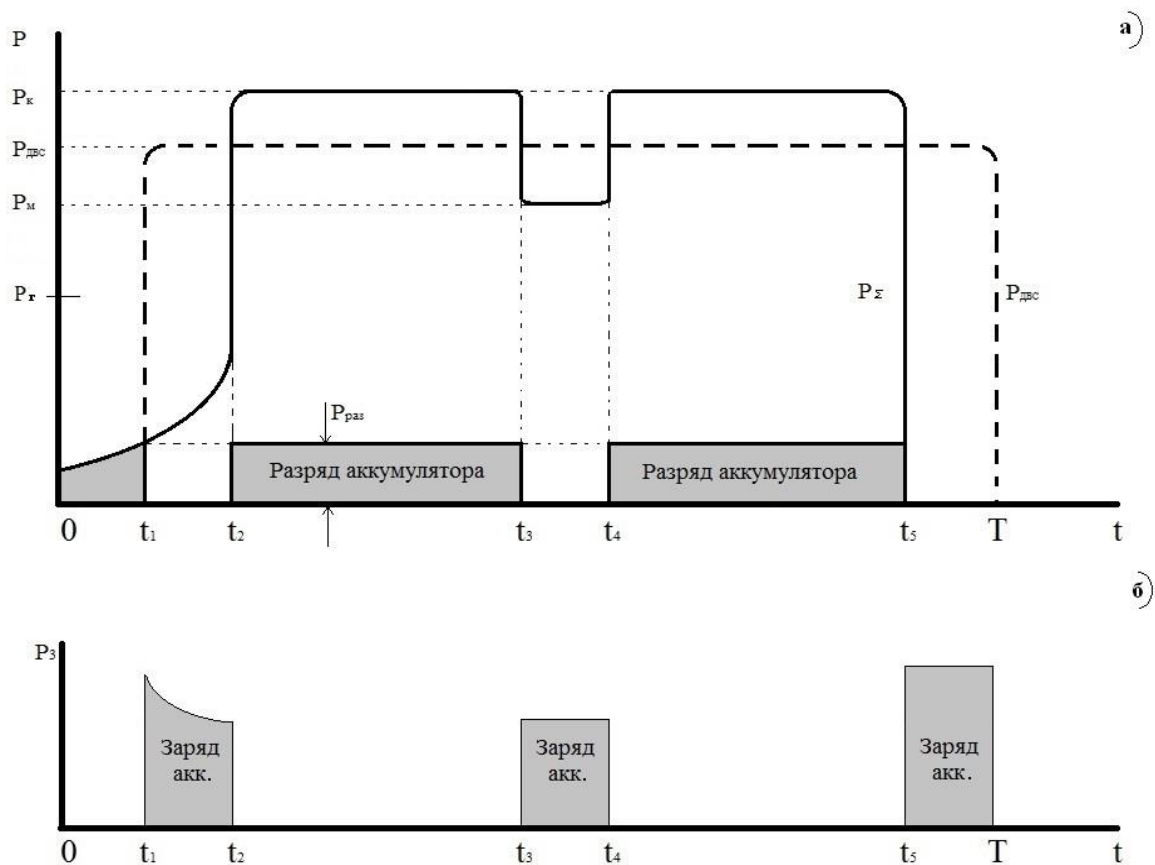


Рис.2. Изменение энергетических потоков на аэролодке во времени: а) Расходуемая двигателем полная мощность P_ϵ (сплошная жирная линия) и развиваемая ДВС мощность $P_{двс}$ (пунктирная жирная линия); б) график зарядки аккумулятора.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.083.5:629.565.2

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МИКРОКЛИМАТА В ПЛАВУЧЕМ ДОКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОНИЦАЕМОГО МЯГКОБОЛОЧЕЧНОГО ЗАКРЫТИЯ**Анатолий Иванович Азовцев**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Теории и устройства судна
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 – а
e-mail: Azovtsev@msun.ru

Сергей Алексеевич Огай

кандидат технических наук, доцент
ректор
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 – а
тел.: (423) 241–49–68; e-mail: Ogay@msun.ru

Алексей Сергеевич Огай

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Теории и устройства судна
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 – а
e-mail: Ogay_A@msun.ru

Анна Ивановна Заводовская

соискатель кафедры Теории и устройства судна
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 – а
e-mail: Zavodovskaya@msun.ru

Аннотация

В работе указаны причины, затрудняющие поддержание стабильности параметров воздуха во внутридоковом пространстве и рассмотрены мероприятия по стабилизации микроклимата в доке с помощью проницаемого мягкооболочечного ветрозащитного закрытия торца дока. Рассмотрены нормативные документы, регламентирующие оборудование плавучих доков специальными средствами создания благоприятного микроклимата в рабочих зонах, указаны причины необходимости проведения мероприятий по охране труда при доковых работах в холодный период года.

Приведены результаты экспериментальных исследований ветрозащитных качеств проницаемого ветрозащитного закрытия. Уточнены понятия ветровой тени и зоны комфортности применительно к плавучим докам. Определены границы зон комфортности для проницаемых и непроницаемых ветрозащитных закрытий. Результаты сделанных замеров скоростей на натурном образце в плавучем доке подтвердили наличие зон комфортности в пределах, полученных экспериментально.

Ключевые слова: судоремонт, плавучий док, микроклимат, охрана труда, ветрозащитное закрытие, мягкая оболочка.

ENSURING STABILITY OF MICROCLIMATE IN THE FLOATING DOCK USING THE PERMEABLE FLEXIBLE COVERING**Anatoliy I. Azovtsev**

Professor, Dr.Sci.Tech., the head of naval architecture department
Maritime State University named after G.I. Nevelskoi
50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russia
e-mail: Azovtsev@msun.ru

Sergei A. Ogai

Associate professor, Cand. Sci. Tech.
Rector
Maritime State University named after G.I. Nevelskoi
50-a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia

tel.: (423) 241-49-68; e-mail: Ogay@msun.ru

Alexey S. Ogai

Assistant professor, cand. sci. tech., assistant professor of naval architecture department
Maritime State University named after G.I. Nevelskoi
50-a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russian Federation
e-mail: Ogay_A@msun.ru

Anna I. Zavodovskaya

Applicant of Ph.D. of department of naval architecture department
Maritime State University named after G.I. Nevelskoi
50-a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russian Federation
e-mail: Zavodovskaya @msun.ru

Annotation

In the article pointed out the reasons making difficulties for the maintaining of the stable air parameters inside the dock. And reviewed the measures intended for the stabilization of microclimate into the dock using the permeable flexible windproof dock end closing. Studied the normative documents regulating the equipping of the floating docks with special means assigned for creation of favorable microclimate in the work zones, indicated the reasons for the necessity of implementing labour protection measures in case of conduction dock operations during the cold period of the year.

Given the results of experimental research of the windproof properties of the permeable windproof closing. Clarified the terms of wind shadow and comfort zone in the context of floating docks. Defined the comfort zone borders for the permeable and impermeable windproof closings. The results of the actual measurements of speed made into the floating dock confirmed the existence of the comfort zones in the range received during the experiment.

Keywords: ship repair, floating dock, microclimate, labour protection, windproof closing, flexible covering.

Введение

Одним из основных направлений совершенствования технической эксплуатации флота является повышение эффективности и качества докового ремонта судов, на проведение которого значительное влияние оказывают климатические факторы. При этом выполнение некоторых технологических операций и обеспечение качества работ имеют предельные значения по метеоусловиям.

Прежде всего, это относится к процессу подготовки поверхности корпуса судна под окрашивание, а также проведение окрасочных работ. Потери хода судами, окрашенными при неблагоприятных метеоусловиях, составляют в среднем 2,5 % уже в первый год эксплуатации. Увеличение срока службы покрытия обеспечивает экономию эксплуатационных расходов и рост нормативной прибыли. На многих судоремонтных заводах из-за низкой температуры воздуха и значительной скорости ветра (15-18 м/сек) в осенне-зимний период часто прекращаются наружные работы по ремонту судна в доке.

Исходя из сказанного, наиболее рациональная организация докового ремонта и сокращение затрат на докование судов имеет большое значение для нормальной эксплуатации флота. Сокращение сроков стоянки судов в доке и повышение их пропускной способности является одной из главных задач судоремонта. Для ускорения докования судов судоремонтными предприятиями ведётся работа по оснащению доков ветрозащитными закрытиями.

Для климатических условий северных и восточных регионов России характерны длительные периоды отрицательных температур воздуха, сильные ветры, повышенная влажность, осадки. Действие этих факторов приводит к переохлаждению организма, возрастанию профессиональных заболеваний рабочих, и как следствие к снижению производительности труда, текучести кадров, дефициту доковых рабочих. Поэтому необходимо проведение мероприятий по охране труда при доковых работах в холодный период года.

В этой публикации предлагаем рассмотреть мероприятия по стабилизации микроклимата в доке с помощью проницаемого мягкооблочечного ветрозащитного закрытия торца дока.

1. Мероприятия по стабилизации микроклимата в плавучем доке

Характерной особенностью показателей микроклимата внутри дока в холодное время года являются повышенные скорости движения воздуха, отрицательные температуры, осадки и сравнительно высокая влажность. Это является причиной, затрудняющей поддержание стабильности параметров воздуха во внутридоковом пространстве.

Указанные выше факторы влияют на самочувствие рабочих и определяют условия комфорта в доке. Поэтому большое значение придаётся улучшению санитарно-гигиенических условий труда в плавучих доках [1]. Создание микроклимата с заданными параметрами не только улучшает условия труда, но и обеспе-

чивает высокое качество и сокращение длительности технологических процессов.

Таким образом, эффективность использования плавучих доков может быть повышена за счёт создания наиболее благоприятных условий выполнения ремонтных работ при неблагоприятных климатических условиях.

Для этого в соответствии с Правилами безопасности труда на промышленных предприятиях Минморфлота и другими нормативными документами [2-4] плавучие доки должны быть оборудованы специальными средствами создания благоприятного микроклимата в рабочих зонах:

- закрытиями торцов от ветра;
- ветрозащитными закрытиями в других проницаемых районах дока;
- промежуточными закрытиями от атмосферных осадков;
- системой вентиляции и обогрева рабочих зон и др.

По рекомендации СП 18.13330.2011 «СНиП II-89-80* Генеральные планы промышленных предприятий» к неблагоприятным условиям относятся следующие сочетания средней температуры воздуха t и скорости ветра V [5]:

- $t \leq -36^\circ \text{C}$ и ниже при любой скорости ветра;
- t от -26°C до -35°C при $V = 1,5$ м/сек и более;
- t от -16°C до -25°C при $V = 2,5$ м/сек и более;
- t от -10°C до -15°C при $V = 3,5$ м/сек и более.

Социальный аспект получаемой эффективности от внедрения средств микроклимата является основным и характеризуется повышением производительности труда, снижением затрат, связанных с неблагоприятными условиями труда, снижением текучести кадров и условным высвобождением (экономией) численности работников.

Экономический аспект эффективности улучшения условий труда выражается в снижении сроков докования судов и себестоимости каждого докования, повышении эффективности использования капитальных вложений (доков и судов), в увеличении количества докований в холодный период года.

Основным отрицательным фактором работы в плавучих доках является ветер. При направлении ветра близком к продольной оси дока, скорость его в проходах между бортами судна и башнями дока может значительно превышать скорость ветра вне дока. В связи с этим важнейшей задачей создания микроклимата является защита внутримохового пространства от ветра [6]. Отсутствие ветрозащитных закрытий доков приносит огромные материальные потери и в определённой степени тормозит развитие судостроительной и судоремонтных отраслей.

2. Конструкция проницаемого ветрозащитного закрытия

Одним из наиболее эффективных методов стабилизации микроклимата в доке является

оборудование его ветрозащитными торцевыми закрытиями. В Морском государственном университете имени адмирала Г.И. Невельского на основе патента [7] разработана технология изготовления торцевых ветрозащитных закрытий плавучих доков и накоплен положительный опыт их эксплуатации [8]. Изготовленные за период с 1993 г. по 2005 г. семь ветрозащитных проницаемых закрытий прошли натурные испытания в условиях Дальнего Востока, в том числе на Дальзаводе и 178-м Судоремонтном заводе. Применение этих устройств позволяет снизить ветровые потоки во внутримачинном пространстве.

Конструкция мягкооболочечного проницаемого закрытия представляет собой полотнище, закреплённое по верхней и нижней кромкам на металлических тросах, натянутых между башнями дока. Полотнище состоит из эластичных клапанов, имеющих форму трапеции, закреплённых по трём сторонам на капроновых канатах.

При ветровой нагрузке свободная более длинная сторона каждого клапана расправляется, образуя отверстие в полотнище, через которое проникает воздушный поток и поворачивается вверх (рис. 1). Проницаемость закрытия значительно снижает ветровые нагрузки на него и образует пневматический затвор для исключения над ним вихреобразования.

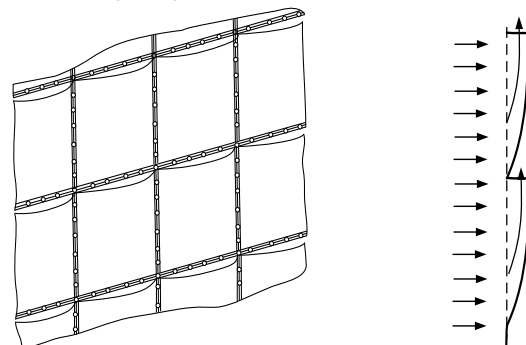


Рис. 1. Конструктивная схема и принцип действия ветрозащитного закрытия

Материалом клапанов служат ткани с двухсторонним поливинилхлоридным покрытием, стойким к воздействиям окружающей среды, что позволяет круглогодично использовать ветрозащитное закрытие, в зимнее время при температурах до $-30 - -45^\circ \text{C}$. Используемые для изготовления клапанов современные мягкие материалы позволяют успешно эксплуатировать закрытия торца дока в течение более 10 лет.

Материал конструкции соответствует Системе стандартов безопасности труда (ССБТ) ГОСТ 12.2.003-91, не оказывает опасного и вредного воздействия на организм человека, не опасен при производстве сварочных и иных работ. Конструкция является пожаробезопасной в предусмотренных условиях эксплуатации.

3. Экспериментальные исследования микроклимата плавучих доков

Работоспособность и эффективность проницаемых мягкооболочечных ветрозащитных закрытий подтверждена многочисленными лабораторными и натурными экспериментами.

Экспериментальные исследования ветрозащитных качеств закрытия проводились на моделях в специально спроектированной и построенной установке, состоящей из открытой в верхней части рабочей камеры, вентилятора и набора спрямляющих решёток [9]. Исследовали размер ветровой тени за закрытием и степень снижения скорости набегающего ветрового потока во внутридоковом пространстве. Полученные результаты выборочно проверялись сопоставлением с результатами натурных испытаний в плавучем доке подъёмной силой 83400 кН. Для сравнения выполнялись продувки моделей без защиты.

Были использованы проницаемая и непроницаемая модели, изготовленные из мягких оболочек (рис. 2). В эксперименте изменялась скорость ветрового потока и угол наклона закрытия от вертикали по направлению потока.

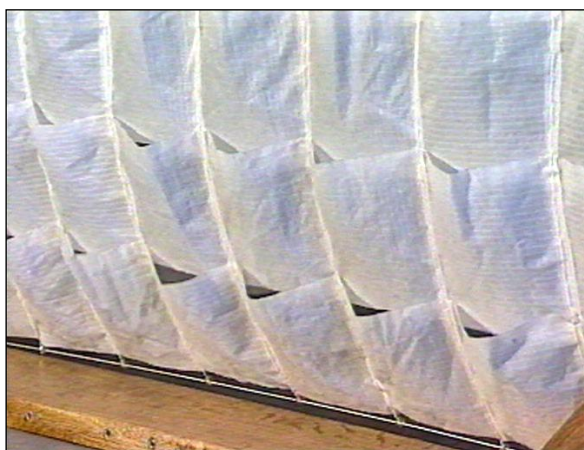


Рис. 2. Общий вид модели мягкооболочечного проницаемого закрытия

Скорости обдувания моделей и их размеры были определены из динамического подобия по критерию Фруда в предположении, что определяющей силой в воздушном потоке за ветрозащитным закрытием является сила тяжести. Соблюдалось подобие по числам Фруда

$$Fr = \frac{v_{\infty}^2}{gH},$$

где v_{∞} – моделируемые скорости потока на натуре 13,27 м/с и 18,72 м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $H=10$ м – высота натурального объекта (плавучего дока). Измерение скорости потока производилось за моделью в плоскости симметрии камеры в точках $x=X/H$, принимающих значения от 0,5 до 6,0, $y=Y/H$, изменяющихся от 0,4 до 2,0. За начало координат выбрано место установки модели.

Скорости воздушного потока замерялись цифровым переносным анемометром в выбранных точках за вертикально установленной моделью и за моделью, отклонённой на 15 ° от вертикали по направлению потока. Проведённые замеры скоростей в экспериментальной установке без модели показали равномерность создаваемого потока. Максимальная относительная погрешность измерений составила 10,2 %.

Для модели размеры клапанов выбраны с учётом сохранения коэффициента проницаемости 0,35, который определяется отношением суммы площадей просветов к площади проекции конструкции закрытия на вертикальную плоскость.

Для анализа результатов эксперимента уточнены понятия ветровой тени и зоны комфортности применительно к плавучим докам. Предложено за границу ветровой тени принимать точку перегиба на эпюре экспериментально полученных скоростей, V_r – скорость, принимаемая как граница ветровой тени, V_n – скорость протекания потока за экраном, V_x – скорость потока в пограничном слое (рис. 3). Под зоной комфортности принята зона, в которой скорости ветрового потока не выходят за пределы, устанавливаемые СП 18.13330.2011 в зависимости от параметров окружающей среды и погодных условий.

По данным Примгидромета во Владивостоке средняя месячная температура самого холодного месяца – января составляет –13,5 °С, поэтому в качестве граничных условий по ветровой тени принята скорость ветра 3,5 м/с.

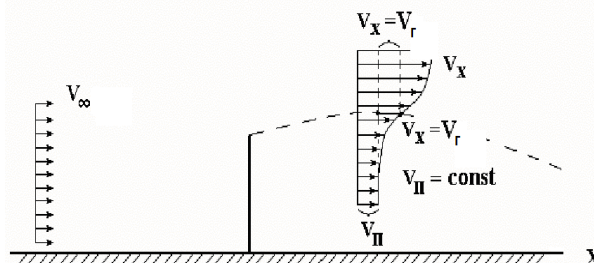


Рис. 3. К определению ветровой тени и зоны комфортности

Относительные скорости, определяющие зону комфортности, определяются по формуле

$$V_c = \frac{V_c}{V_{\infty}}, \text{ где } V_c = 3,5 \text{ м/с.}$$

На основании результатов экспериментальных исследований построены графики распределения скоростей воздушного потока за проницаемой и непроницаемой моделями в каждом сечении, кратном высоте экрана.

На рис. 4а приведены графики скоростей для сечения, отстоящего от закрытия на расстоянии, равном его двум высотам, при скорости набегающего потока $V_{\infty}=3,73$ м/с. Сплошная линия 1 – эпюра скоростей за проницаемым ветрозащитным закрытием, пунктирная линия 2

соответствует распределению скоростей потока за непроницаемой моделью. Точка отображает

границу зоны комфортности, а крестик показывает верхнюю границу ветровой тени.

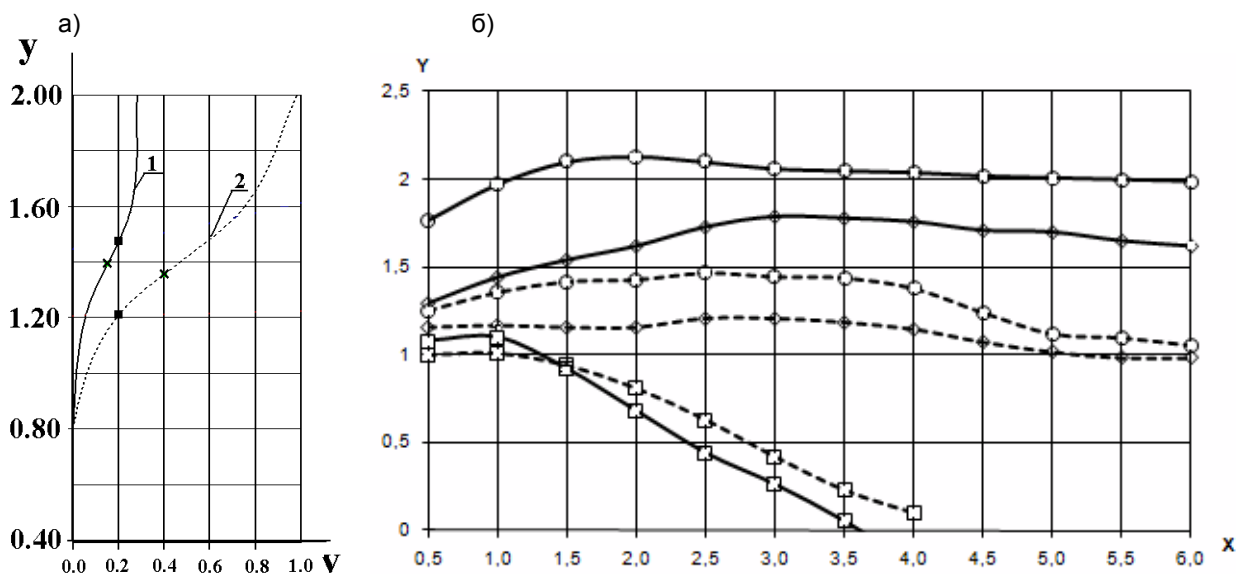


Рис. 4. Эпюра распределения скоростей за моделями в сечении и зона комфортности за проницаемым мягкооболочечным закрытием

На рис. 4б показаны границы зоны комфортности для непроницаемых (пунктирная линия) и проницаемых (сплошная линия) закрытий для $Fg=1,35$ (точки обозначены кругом), $Fg=1,88$ (точки обозначены ромбом), $Fg=3,51$ (точки обозначены квадратом).

Полученные картины поля скоростей и их замеры за моделями, соответствующие натурным скоростям от 4 до 20 м/с, подтверждают поворот потока вверх за проницаемым закрытием и значительное превышение горизонтальных и вертикальных размеров ветровой тени (зоны комфортности) в 1,5–2 раза по сравнению со сплошным закрытием. Больше увеличение ветровой тени можно получить за счет наклона ветрозащитного закрытия по направлению потока.

Наличие зоны комфортности в пределах, полученных с помощью эксперимента, было подтверждено с помощью замеров скорости ветрового потока во внутридоковом пространстве для зимнего периода в г. Владивостоке.

При условии совпадения направления ветра с диаметральной плоскостью дока согласно полученным экспериментальным зависимостям при высоте ветрозащитного закрытия 10 м зона комфортности, в которой скорость ветра во внутридоковом пространстве не превышает 3,5 м/с, должна наблюдаться по высоте дока от 10 до 18 м, по длине дока на протяжении 60 м.

При скоростях натурального ветра 30 м/с (на моделях 6,94 м/с) эффективность ветрозащитного закрытия снижается за счёт значительной деформации клапанов, которая приводит к увеличению проницаемости закрытия в целом.

Заключение

Оборудование торцов плавучего дока проницаемыми мягкооболочечными ветрозащитными закрытиями, изменяющими направление воздушного потока вверх, позволяет поддерживать стабильность параметров воздуха в доке.

Проницаемость существенно снижает скорость движения воздуха в междубашенном пространстве, увеличивает размеры ветровой тени и зоны комфортности в 1,5 – 2 раза как по вертикали, так и в горизонтальном направлении по сравнению со сплошными закрытиями. Защитный эффект от закрытия одного торца распространяется на 50 – 60% длины дока.

Литература

1. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: введ. В действ. с 01.01.1989, с изм. от 13.07.2017.
2. Правила безопасности труда на промышленных предприятиях Минморфлота : РД 31.83.04-89 : утв. Минморфлотом СССР 12.07.90 : введ. в действие с 01.03.1991 г.
3. Требования техники безопасности к морским судам : РД 31.81-01-87 : утв. Минморфлотом и Минсудпромом РФ 02.08.88 г. : введ. в действие с 01.07.1990 г.
4. Рекомендации по выбору типов, количества и расположения ветрозащитных устройств на плавучих доках: РД 31.83.06-83 : утв. Минморфлотом СССР 01.01.1970 : введ. в действие с 01.06.84. – М.: Мортехинформреклама, 1984. – 31с.
5. Свод правил СП 18.13330.2011 «Генеральные планы промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП II-89-80*». М, 2011.
6. Гамалеев В. В. Ветровая защита плавучих доков // В.В. Гамалеев, Э.В. Озолин. ММФ. ЦБНТИ. Техн.-экон. информ. Серия «Судоремонт», вып. №20 (243), 1971. – 14 с.
7. А.С. 1622222 СССР, МКИ5 В 63 С 5/00. Ветрозащитное закрытие / С. А. Огай, В. В. Малышкин. – №4640610/11 ; заявл. 26.12.88 ; опубл. 23.01.91, Бюл. № 3. – 8 с.
8. Потутаровский, А. И. Опыт эксплуатации ветрозащитных штор для плавучих доков / А. И. Потутаровский, В. Г. Непейвода // Проблемы транспорта Дальнего Востока: материалы VI Международной науч.-практ. конф. – Владивосток, 2005. – С. 205.
9. Огай С.А. Ветрозащитные экраны плавучих доков и грузовых терминалов портов / Огай А.С. – М.: Транспортное дело России, 2005.

References

- GOST 12.1.005-88 Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochey zony: vvod. V deystv. s 01.01.1989, s izm. ot 13.07.2017.
- Pravila bezopasnosti truda na promyshlennykh predpriyatiyakh Minmorflota : RD 31.83.04-89 : utv. Minmorflotom SSSR 12.07.90 : vvod. v deystvie s 01.03.1991.
- Trebovaniya tekhniki bezopasnosti k morskim sudam : RD 31.81-01-87 : utv. Minmorflotom i Minsudpromom RF 02.08.88 g. : vvod. v deystvie s 01.07.1990.
- Rekomendatsii po vyboru tipov, kolichestva i raspolozheniya vetrozashchitnykh ustroystv na plavuchikh dokakh: RD 31.83.06-83 : utv. Minmorflotom SSSR 01.01.1970 : vvod. v deystvie s 01.06.84. – M.: Mortechnikinformreklama, 1984, 31 p.
- Svod pravil SP 18.13330.2011 «General'nye plany promyshlennykh predpriyatiy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-89-80*». M, 2011.
- Gamaleev V. V., Ozolin' E.V. Vetrovaya zashchita plavuchikh dokov (MMF. TsBNTI. Tekhn.-ekon. inform. Seriya «Sudoremont», vyp. №20 (243)), 1971. 14 p.
- A.S. 1622222 SSSR, MKI5 V 63 S 5/00. Ogay S. A., Malyshekin V. V. Vetrozashchitnoe zakrytie. №4640610/11 ; zayavl. 26.12.88 ; opubl. 23.01.91, Byul. № 3, 8 p.
- Potutarovskiy A. I., Nepeyvoda V. G. Opyt ekspluatatsii vetrozashchitnykh shtor dlya plavuchikh dokov (Materialy VI Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Problemy transporta Dal'nego Vostoka»). Vladivostok, 2005, p. 205.
- Ogay S.A., Ogay A.S. Vetrozashchitnye ekrany plavuchikh dokov i gruzovykh terminalov portov (Transportnoe delo Rossii). Moscow, 2005.

УДК 624.073.82.001.63

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГО ОПЕРТОЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ С ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫМИ ОПОРАМИ ПО КОНЦАМ

Сергей Юрьевич Гриднев

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики
Воронежский государственный технический университет
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Юрий Иванович Скалько

канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики
Московский физико-технический институт (государственный университет)
141707 Долгопрудный (Московская область), Институтский пер., д. 9
e-mail: skalko@mail.mipt.ru

Аннотация

В рамках общей задачи: моделирования нелинейных колебаний наплавного моста неразрезной системы на отдельных плавучих опорах с дополнительными ограничительными опорами по концам при проезде одиночной многоосного автомобиля, решена частная задача. Разработана методика моделирования нелинейных колебаний упруго опертого деформируемого стержня с ограничительными опорами по концам, являющейся расчетной схемой пролетного строения, под действием одиночной движущейся силы. Предложен вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений в частных производных с разрывными граничными условиями при моделировании конструктивно-нелинейных колебаний упруго опертой деформируемой системы. Для решения дифференциального уравнения в частных производных с изменяющимися граничными условиями использованы полиномы Лежандра. Созданная на базе разработанной методики вычислительная программа в среде Matlab использована для выполнения численных исследований особенностей поведения динамической системы в зависимости от широкого спектра ее параметров и геометрии.

Ключевые слова: колебательная система, упругие опоры, изгибные деформации, ограничители хода, движущаяся нагрузка, конструктивная нелинейность, изменяющиеся граничные условия, полиномы Лежандра.

NUMERICAL ANALYSIS OF NONLINEAR VIBRATIONS OF ELASTICALLY SUPPORTED DEFORMABLE SYSTEM WITH RESTRICTIVE SUPPORTS AT THE BOUNDARIES

Sergej Ju. Gridnev

Dr. of Tech. Sc., Professor of Department of Structural Mechanics
Voronezh State Technical University
20 let Oktyabrya Str., 84, Build. 1, Voronezh 394006, Russian Federation
e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Jurij I. Skalko

Cand. of Ph.-Math. Sc., Associate Professor of Department of Computational Mechanics
Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
Institutski Per .9, Dolgoprudnyi, Moscow region 141701, Russian Federation
e-mail: skalko@mail.mipt.ru

Abstract

In the framework of a common objective: the simulation of nonlinear vibrations of continuous floating bridge system on a separate floating supports with additional restrictive supports at the ends, affected by the single moving multi-axis car, solved a particular problem. The authors developed special technique for modeling nonlinear oscillations of elastically supported deformable system with restrictive supports at the ends, which is the design scheme of the bridge's span structure under the action of a single moving force, changing in time. Computational algorithm for solving partial differential equations with discontinuous boundary conditions is proposed for modeling the constructively nonlinear oscillations of an elastically supported deformable system. To solve partial differential equation with discontinuous boundary conditions, Legendre polynomials are

applied. Based on the developed methodology, new computational program within the “Matlab” environment was used to perform numerical studies of the behavior of the dynamic system depending on a wide range of it’s parameters and geometry.

Key words: oscillatory system, elastic supports, bending deformations, movement restrictions, moving load, constructive nonlinearity, changing boundary conditions, Legendre polynomials.

Введение

В настоящей статье построен вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений с изменяющимися в процессе решения граничными условиями. Алгоритм является составной частью методики моделирования нелинейных

колебаний наплавного моста неразрезной системы на отдельных плавучих опорах с дополнительными ограничительными опорами по концам при подвижной нагрузке (рис.1).

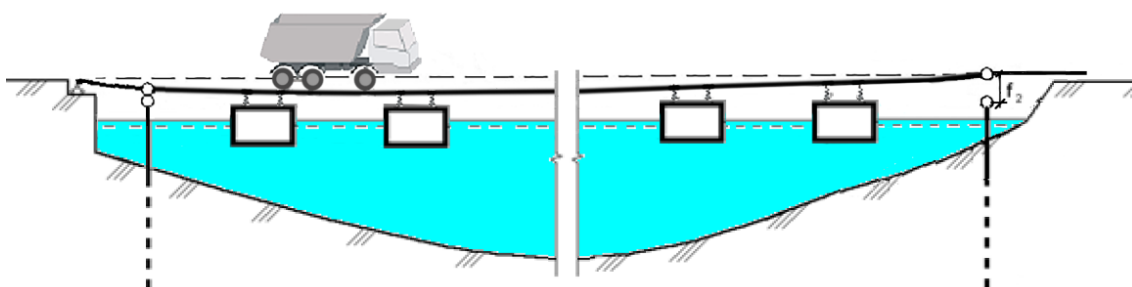


Рис. 1. Колебаний наплавного моста неразрезной системы на отдельных плавучих опорах с дополнительными ограничительными опорами при подвижной нагрузке

Отметим, что учет ограничительных опор в наплавных мостах неразрезной системы значительно усложняет моделирование даже при решении задачи в плоской постановке и требует поэтапного подхода. Перемещения концов пролетного строения ограничено величиной зазоров между концами и верхом ограничительных опор f_1 и f_2 . Использование плоской расчетной схемы оправдано предположением о движении автомобиля по оси моста или проезжей части с одной полосой движения. Наплавной мост неразрезной системы представляет собой сложную комбинированную колебательную систему, состоящую из отдельных

взаимодействующих между собой подсистем. Пролетное строение моста под воздействием подвижной нагрузки совершает пространственные колебания, вовлекая в общий колебательный процесс плавучие опоры, которые в свою очередь взаимодействуют с окружающей их водной средой. Таким образом, пролетное строение представляет собой деформируемую систему, находящуюся в каждый момент времени в равновесии под воздействием динамического давления от колес автомобиля $R_i(t)$ сверху и суммы усилий со стороны каждой плавучей опоры $S_j(t)$ в нижней части (рис.2)

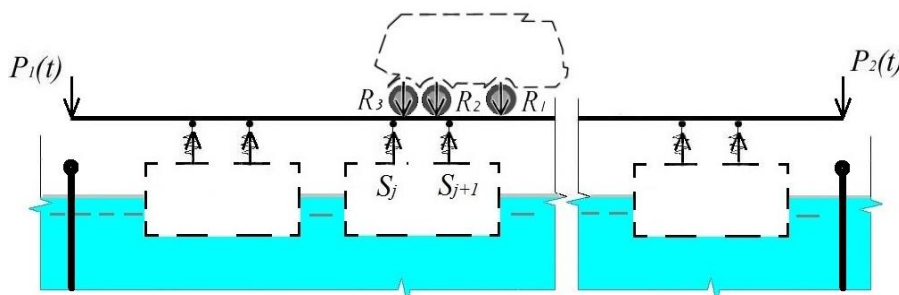


Рис. 2. Расчетная схема пролетного строения в составе наплавного моста неразрезной системы

Описание расчетной схемы наплавного моста, математическая модель колебаний каждой подсистемы, уравнения связей между подсистемами, обозначения входящих в

уравнения величин и описание их смысла подробно приведены в работе [1]. Подробнее остановимся на подсистеме «Пролетное строение». За расчетную схему пролетного

строения принят тонкостенный упругий стержень длиной l . В математической модели изгибные колебания в вертикальной плоскости стержня описываются дифференциальным уравнением в частных производных пятого (или четвертого без учета внутреннего трения) порядка относительно изгибной деформации упругого тонкостенного стержня, которая отсчитывается от положения стержня в состоянии равновесия при отсутствии внешней нагрузки, по теории В.З. Власова совместно с граничными и начальными условиями [2]. Дополнительно для описания движения пролетного строения как твердого тела использована система двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно вертикального перемещения $z(t)$ и угла поворота относительно центра тяжести $\varphi(t)$ с начальными условиями [1]. Обратим внимание, что пролетное строение наплавного моста представляет собой упруго опертую деформируемую систему с ограничителями хода, находящуюся под действием движущейся нагрузки. Задача моделирования колебаний наплавного моста неразрезной системы с дополнительными ограничительными опорами решалась в разных постановках в работах [3-5], однако локальное деформированное состояние пролетного строения вблизи ограничительных опор при этом определялось с недостаточной точностью.

1. Построение математической модели движений упруго опертого стержня

Построим математическую модель изгибных движений упругого тонкостенного стержня в системе координат, начало которой совпадает с центром масс этого стержня и связанной с этим стержнем, как с твердым телом.

Эта система координат является неинерциальной, поэтому при написании уравнений движения следует учесть силы инерции, действующие в точке с координатой

$$x : -m \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right).$$

Следуя теории изгибно-крутильных колебаний тонкостенного упругого стержня, изложенной в [2], исходные уравнения можно записать в форме начально-краевой задачи для уравнения в частных производных:

$$\begin{cases} \left(m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \right) = -mg + \sum_{s=1}^N F_s + \sum_{k=1}^K R_k + \\ + m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - mx \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \\ P_l + F_l + P_r + F_r \\ y(t=0, x) = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial t}(t=0, x) = 0. \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, -\frac{l}{2}) = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(t, -\frac{l}{2}) = 0, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, \frac{l}{2}) = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(t, \frac{l}{2}) = 0 \end{cases} \quad (1) \quad (1)$$

где $y(t, x)$ - изгибная деформация упругого тонкостенного стержня, отсчитываемая от положения стержня в состоянии равновесия в отсутствие внешней нагрузки,
 m - погонная масса стержня;
 \aleph - коэффициент затухания изгибных деформаций за счет внутреннего трения;
 E - модуль упругости материала;
 J - момент инерции поперечного сечения относительно оси изгиба;
 $F_s(t, x)$ - сила, действующая на стержень со стороны s -ой промежуточной опоры (соответствует ранее обозначенному $R_i(t)$). Распределение $F_s(t, x)$ не равно нулю в пределах некоторого «пятна» контакта s -ой опоры со стержнем и равно нулю за пределами этого пятна;
 $R_k(t, x)$ - сила, действующая на стержень со стороны k -ой оси автомобиля, у которого k осей. Каждая сила $R_k(t, x)$ распределена в пределах некоторого пятна контакта k -ой оси автомобиля с мостом;
 $P_l(t, x), P_r(t, x)$ - силы, действующие на мост со стороны, соответственно, левой и правой переходных частей
 $F_l(t, x), F_r(t, x)$ - силы, действующие на мост со стороны, соответственно, левой и правой крайних ограничительных опор, при опирании на них пролетного строения. Ограничительные опоры моделируются упругими связями большой жесткости. Краевые условия на концах стержня, соответствуют условиям стержня со свободными концами. Введем новую переменную $u(t, x) = y(t, x) + z(t) - x\varphi(t)$, описывающую вертикальные перемещения моста в момент времени t в неподвижной системе координат в случае малых угловых отклонений моста от положения равновесия. Тогда математическая модель (1) движения упругого тонкостенного стержня в неподвижной системе координат приобретает вид:

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = -mg + \sum_{s=1}^N F_s + \sum_{k=1}^K R_k + \\ + P_l + F_l + P_r + F_r \\ u(t=0, x) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}(t=0, x) = 0. \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, -\frac{l}{2}) = 0, \quad \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(t, -\frac{l}{2}) = 0, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, \frac{l}{2}) = 0, \quad \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(t, \frac{l}{2}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Модель (2) записана с использованием распределений $F_s, R_k, P_l, F_l, P_r, F_r$ сил, приложенных к упругому стержню.

Преобразуем модель для сил, приложенных в точке. Сделать это можно с использованием теории обобщенных функций, изложенной в [6].

Покажем, что $u(t, x)$, рассматриваемая, как обобщенная функция из D' для произвольной бесконечно-дифференцируемой пробной функции $\psi(x) \in D$ из пространства основных функций, удовлетворяет уравнению

$$\begin{aligned} m \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \psi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx &= -(1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx + \\ + \sum_{s=1}^N \psi(x_s) F_s^* + \psi(-\frac{l}{2}) F_l^* + \psi(\frac{l}{2}) F_r^* \\ - mg \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \psi dx + \sum_{k=1}^K \psi(x_k) R_k^* + \psi(-\frac{l}{2}) P_l^* + \psi(\frac{l}{2}) P_r^* \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $F_s^* = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} F_s(t, x) dx$ - суммарная сила,

действующая на мост со стороны s -ой промежуточной опоры. Обратим внимание, что $F_s^* = \frac{Mg}{N} + S_s$ состоит из двух слагаемых.

Первое соответствует силе, действующей на мост со стороны плавучей опоры, когда мост находится в состоянии статического равновесия в отсутствии внешнего воздействия. Суммарно сила воздействия со стороны всех промежуточных опор равна полному весу пролетного строения моста. Второе слагаемое отражает дополнительную силу, возникающую со стороны промежуточной опоры, когда мост находится под воздействием подвижной нагрузки.

$F_l^*, F_r^*, P_l^*, P_r^*, R_k^*$ - суммарные силы, действующие на мост со стороны, соответственно, крайних ограничительных опор, аппарелей, осей автомобиля.

В дальнейшем изложении индекс $*$ опустим для упрощения. Покажем далее справедливость (3).

Уравнение изгибных колебаний моста, на который действует сила, распределенная

по отрезку $(x^* - \square x, x^* + \square x) \in (-\frac{l}{2}, \frac{l}{2})$ с плотностью $F(x)$

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = -mg + F \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, x_l) = 0, \quad \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(t, x_l) = 0, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(t, x_r) = 0, \quad \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(t, x_r) = 0 \\ u(t=0, x) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}(t=0, x) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение будем искать в классе непрерывных обобщенных функций $u(t, x) \in C^0(-l/2..l/2)$. По определению:

$$\begin{aligned} I = \left(m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}, \psi(x) \right) &= \int_{-l/2}^{l/2} m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \psi dx + \\ + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \int_{-l/2}^{l/2} u \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} dx \end{aligned}$$

Выполним дважды интегрирование по частям

$$\begin{aligned} I = m \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \psi dx + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \left(\int_{-l/2}^{x^* - \square x} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \psi dx + \int_{x^* - \square x}^{x^* + \square x} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \psi dx + \int_{x^* + \square x}^{l/2} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \psi dx \right) \\ + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} u - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \psi \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right) \Big|_{x=-l/2}^{x=l/2} \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая граничные условия

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(x=l/2) = \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(x=-l/2) = 0, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x=l/2) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x=-l/2) = 0 \end{aligned} \quad , \text{ получаем}$$

$$\begin{aligned} I = - \int_{-l/2}^{x^* - \square x} mg \psi dx + \int_{x^* - \square x}^{x^* + \square x} (-mg + F) \psi dx - \int_{x^* + \square x}^{l/2} mg \psi dx \\ + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} u - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=-l/2}^{x=l/2} \end{aligned}$$

Переходим к пределу при $\square x \rightarrow 0$ так, чтобы

$$\begin{aligned} \int_{x^* - \square x}^{x^* + \square x} F dx \text{ оставался неизменным} \\ I = - \int_{-l/2}^{l/2} mg \psi dx + F(x^*) \psi(x^*) + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} u - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=-l/2}^{x=l/2} \end{aligned} \quad (6)$$

Сопоставляя (5) и (6), получаем

$$\begin{aligned} m \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \psi dx + (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} dx = \\ = - \int_{-l/2}^{l/2} mg \psi dx + F(x^*) \psi(x^*) \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая все приложенные к стержню силы, получаем (3). Это уравнение и примем за основу при построении вычислительного алгоритма.

2. Построение вычислительного алгоритма

Решение будем искать в виде $u(x,t) = \sum_{n=1}^K H_n(x)T^n(t)$, где в качестве пробных функций $H_n(x)$ возьмем полиномы Лежандра порядка $\psi^m(x) = H^m(x) \quad n = 1:K$.

$$m \sum_{n=1}^K \frac{\partial^2 T^n}{\partial t^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} H^m H_n dx = -(1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \cdot \sum_{n=1}^K T^n \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial^2 H^m}{\partial x^2} \frac{\partial^2 H_n}{\partial x^2} dx + \sum_{s=1}^N S_s \left(\sum_{n=1}^K T^n H_n \right) H^m |_{x=x_s} - mg \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} H^m dx + \frac{Mg}{N} \sum_{s=1}^N H^m(x_s) + \sum_{k=1}^3 R_k H^m(x_k) + P_l H^m(-\frac{l}{2}) + P_r H^m(\frac{l}{2}) \quad (8)$$

Определим матрицы и векторы

$$\mathbf{T}(t) = [T]^n(t) = T^n(t)$$

$$[\mathbf{H}\mathbf{H}] = [HH]_n^m = m \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} H^m H_n dx, \quad [\mathbf{d}\mathbf{H}\mathbf{d}\mathbf{H}] = [\partial H \partial H]_n^m =$$

$$= (1 + \aleph \frac{\partial}{\partial t}) EJ \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial^2 H^m}{\partial x^2} \frac{\partial^2 H_n}{\partial x^2} dx,$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{T}) = F^m(T^n) = \sum_{s=1}^N S_s (T^n) H^m |_{x=x_s} + \theta(-f -) c_l (-f - u) |_{-\frac{l}{2}} + \theta(-f -) c_r (-f - u) |_{\frac{l}{2}}$$

$$\mathbf{f} = f^m = -mg \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} H^m dx + \frac{Mg}{N} \sum_{s=1}^N H^m(x_s) + \sum_{k=1}^3 R_k H^m(x_k) + P_l H^m(-\frac{l}{2}) + P_r H^m(\frac{l}{2})$$

Теперь систему уравнений (8) можем переписать в виде

$$[\mathbf{H}\mathbf{H}] \frac{d^2 \mathbf{T}}{dt^2} = -\aleph [\mathbf{d}\mathbf{H}\mathbf{d}\mathbf{H}] \frac{d\mathbf{T}}{dt} - [\mathbf{d}\mathbf{H}\mathbf{d}\mathbf{H}] \mathbf{T} + \mathbf{F}(\mathbf{T}) + \mathbf{f}$$

Умножим это уравнение на матрицу, обратную $[\mathbf{H}\mathbf{H}]$

$$\frac{d^2 T^m}{dt^2} = -\aleph \sum_{n=1}^K A_n^m \frac{dT^n}{dt} - \sum_{n=1}^K A_n^m T^n + \Phi^m(T^n) + P^m(t) \quad (9)$$

Здесь

$$A_n^m = \mathbf{A} = [\mathbf{H}\mathbf{H}]^{-1} [\mathbf{d}\mathbf{H}\mathbf{d}\mathbf{H}] \quad (10)$$

$$\Phi^m(T^n) = [\mathbf{H}\mathbf{H}]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{T})$$

$$P^m(t) = [\mathbf{H}\mathbf{H}]^{-1} \mathbf{f}$$

В итоге для неизвестных функций T^n получаем задачу Коши для системы ОДУ

$$\begin{cases} \frac{d^2 T^m}{dt^2} = -\aleph \sum_{n=1}^K A_n^m \frac{dT^n}{dt} - \sum_{n=1}^K A_n^m T^n + \\ + \Phi^m(T^n) + P^m(t) \\ T^n(t=0) = 0, \frac{dT^n}{dt}(t=0) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Решив эту систему ОДУ (11), найдем решение

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^K H_n(x) T^n(t).$$

Решать задачу Коши для системы ОДУ (11) будем путем перехода к переменным $Y_1 = T^m$ и

$$Y_2 = \frac{dT^m}{dt}$$

$$\begin{cases} \frac{dY_1^m}{dt} = Y_2^m \\ \frac{dY_2^m}{dt} = -\aleph \sum_{n=1}^K A_n^m Y_2^n - \sum_{n=1}^K A_n^m Y_1^n + \Phi^m(Y_1^n) + P^m(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$Y_1^n(t=0) = 0, Y_2^n(t=0) = 0$$

3. Выполнение численных исследований нелинейных колебаний упруго опертой деформируемой системы

Как было отмечено выше, пролетное строение наплавного моста моделируется упруго опертым деформируемым тонкостенным стержнем с ограничительными опорами по концам, находящимся под действием движущейся нагрузки. Для реализации общей задачи моделирования нелинейных колебаний наплавного моста неразрезной системы с ограничительными опорами по концам при подвижной нагрузке наряду с построенным алгоритмом необходимо еще использовать методики моделирования колебаний движущегося автомобиля и одиночных плавучих опор. Однако на этом этапе исследований для тестирования и отладки разработанной методики, выявления закономерностей нелинейного поведения упруго опертой системы будем использовать упрощенную расчетную схему (рис.3).

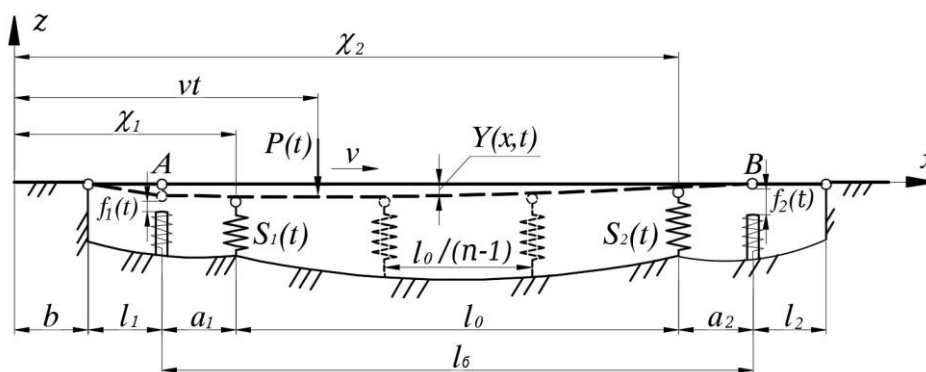


Рис. 3. Упрощенная расчетная схема упруго опертой деформируемой колебательной системы

Она представляет собой деформируемый стержень со свободными концами длиной l , который опирается, в общем случае, на n упругих связей с одинаковыми жесткостями c . Плавность приложения нагрузки обеспечивается двумя переходными частями длиной l_1 , которые служат только для передачи нагрузки на балку, когда сила находится на переходных частях. Их массой и собственной изгибной жесткостью мы пренебрегаем. Под концами стержня находятся ограничительные жесткие опоры. Вертикальные зазоры между концами стержня и жесткими опорами f_1 и f_2 . Вертикальные зазоры изменяются при движении по стержню нагрузки. Они могут замкнуться и далее разомкнуться т.е. концы стержня могут поочередно или одновременно опираться на ограничительные опоры и отрываться от них (рис.2). По балке движется с постоянной скоростью сила, изменяющаяся от времени t по гармоническому закону $P(t) = P_0 + A \sin(\omega t)$ относительно статического значения P_0 с частотой ω , которая имитирует воздействия колеса автомобиля. Использование такой расчетной схемы упруго опертой колебательной системы является продолжением исследований, выполненных в [7], где изучалось поведение недеформируемой упруго опертой конструктивно-нелинейной колеба-

тельной системы под действием движущейся нагрузки.

На основе разработанного алгоритма создана вычислительная программа. Решение задачи Коши для системы ОДУ было реализовано в среде Matlab. Для решения применялся встроенный в Matlab модуль для решения систем ОДУ, основанный на одношаговом явном методе Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядка с автоматическим подбором шага. С помощью программы выполнен широкий спектр численных исследований по изучению влияния изгибных колебаний, величины зазора между ограничительными опорами и концами стержня, скорости движения нагрузки и ее величины на амплитуды и характер колебаний. Ниже приведем для наглядности некоторые результаты численных исследований для стержня длиной $\ell = 42,5 м$, погонной массой $0,888 т/м$, моментом инерции поперечного сечения $J = 0,0050936 м^4$, опирающегося на пять упругих связей с шагом $9,8 м$. Скорость движения варьировалась в диапазоне $5-20 км/час$, статическая составляющая нагрузки принималась равной $P_0 = 2 кН$, амплитуда $A = 0,3 кН$

Для иллюстрации численных результатов на рис. 4 показан деформированный вид стержня в момент времени $t = 3 сек$ при движении нагрузки со скоростью $10 км/час$ и замыкании левого зазора $f_1 = 0,15 м$.

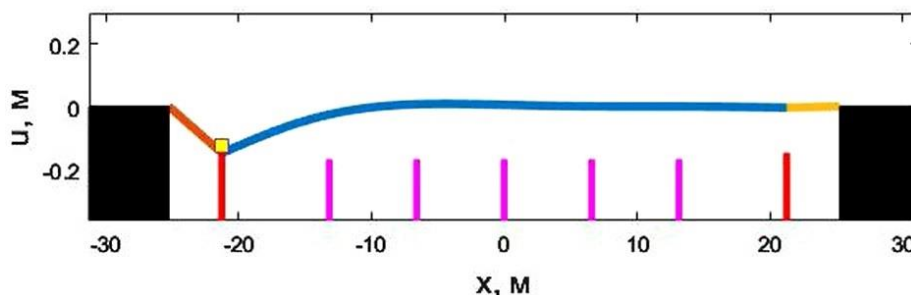


Рис. 4. – Деформированный вид стержня в момент времени $t = 3 сек$

На рис. 5 показаны графики вертикальных перемещений начала и конца стержня, сечений над первой, третьей и пятой

упругими связями при одинаковой скорости движения.

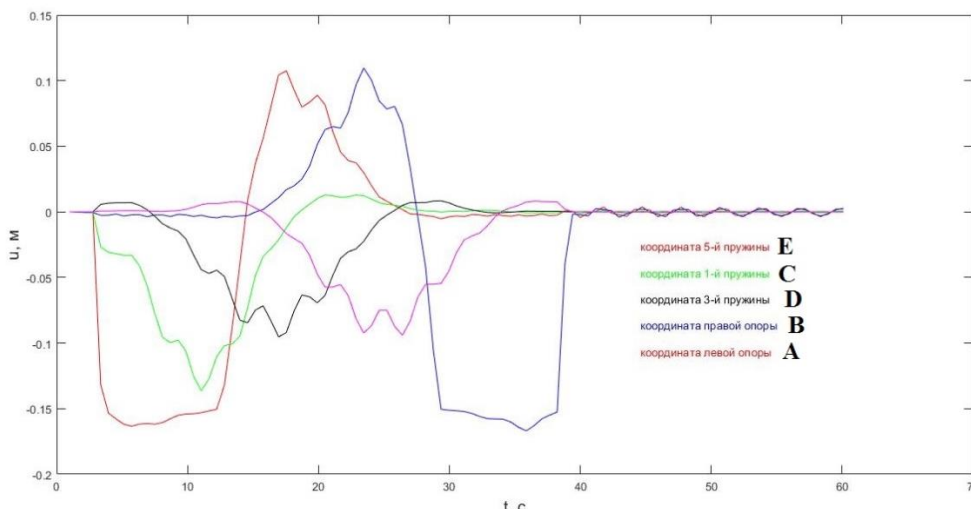


Рис. 5. – Вертикальные перемещения начала и конца стержня, сечений над первой, третьей и пятой упругой связями при одинаковой скорости движения

На рис. 6 показаны графики изменения вертикальных перемещений начала стержня при различных скоростях подвижной нагрузки

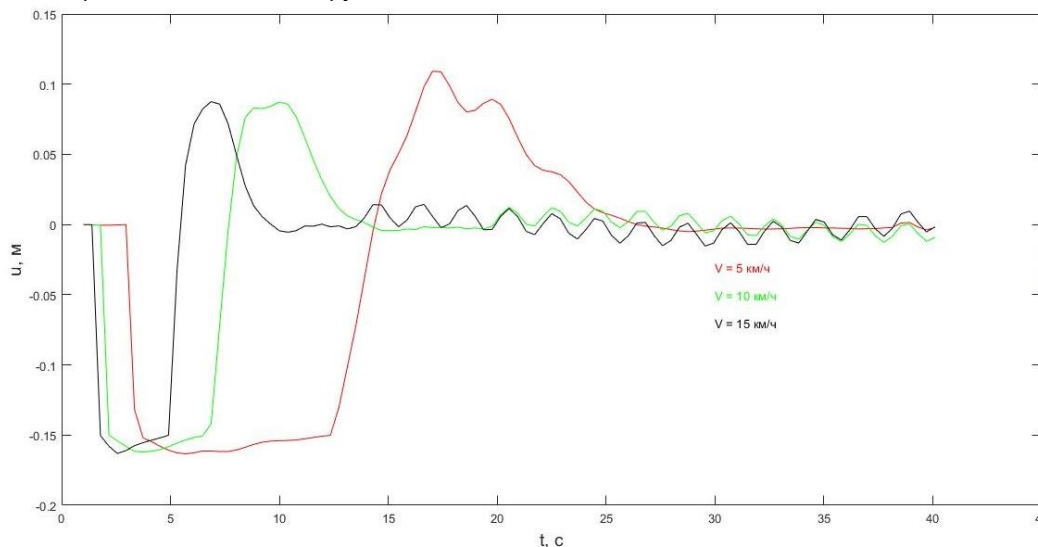


Рис. 6. – Вертикальные перемещения начала стержня при различных скоростях движения нагрузки

Заключение

Использован новый подход к решению дифференциальных уравнений в частных производных с разрывными граничными условиями путем сведения их к системе обыкновенных уравнений с помощью полиномов Лежандра. В отличие от использования при решении разложением в ряд по собственным функциям, это позволяет уточнить локальное деформированное состояние упруго опертой деформируемой системы вблизи ограничительных опор и получать устойчивое решение при большой жесткости упругих опор. Разработанный алгоритм позволил выполнять численные исследования колебаний упруго

опертой деформируемой системы с ограничительными опорами при наличии значительных конструктивных нелинейностей во время замыкания и размыкания зазоров и избежать вычислительных трудностей при численном моделировании. Вклад изгибных деформаций в общие вертикальные перемещения является значительным у концов стержня и в средней части в момент замыкания зазоров. Описанный алгоритм легко может быть применен при моделировании широкого круга конструктивно-нелинейных колебаний строительных конструкций, что позволит адекватно прогнозировать и оценивать характер таких конструкций при динамической нагрузке.

Литература

1. Гриднев, С.Ю. Уточненная пространственная расчетная схема наплавного моста неразрезной системы // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. Вып. №4.(9), 2008. С.38-47.
2. Власов В. З. Избранные труды / В. З. Власов. Москва: Из-во Академии наук СССР, 1963 Т. 2. 507 с.
3. Гриднев С. Ю. Расчет конструктивно-нелинейных колебаний балочной системы под действием подвижной нагрузки методом Канторовича / С. Ю. Гриднев // Материалы Международного конгресса наука и инновации в строительстве. Современные проблемы механики строительных конструкций. Воронеж, 2008. С. 83-92.
4. Гриднев С. Ю. Расчетное моделирование поведения балочных систем под действием подвижной нагрузки с учетом конструктивной нелинейности / С. Ю. Гриднев // Приволжский научный журнал. 2008. Вып. 2. С. 64-71.
5. Gridnev S.Yu. Analyzing the features of oscillations of a floating bridge under a moving load in view of non-linear effects of end supports // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 3 (23). pp. 75-83.
6. В.С. Владимиров. Обобщенные функции в математической физике // Наука. 1979. 379 с.
7. Гриднев С. Ю. Моделирование колебаний упруго опертой динамической системы с ограничителями хода / С.Ю. Гриднев, Ю. И. Скалько, И.В. Раводин, В.В. Янаева // Строительная механика и конструкции. Научно–технический журнал. Воронеж, 2017. Вып. № 1 (14). С.108-117.

References

1. Gridnev, S.Yu. Utochnennaya prostranstvennaya raschetnaya skhema naplavnogo mosta nerazreznoy sistemy [Refined spatial analytical model of floating continuous bridge]. Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitelstvo i arkhitektura [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]. 2008. No 4.(9). Pp.38-47. (rus)
2. Vlasov V. Z. Izbrannye trudy [Selected Works] . Moscow: Iz-vo Akademii nauk SSSR [Publishing house of the USSR Academy of Sciences]. 1963, Т. 2. 507 p.(rus)
3. Gridnev, S.Yu. Raschet konstruktivno-nelineynykh kolebaniy balochnoy sistemy pod dejstviem podvizhnoy nagruzki metodom Kantorovicha [Calculation of structural nonlinear oscillations of the beam system under the action of a mobile load by the Kantorovich method]. Materialy Mezhdunarodnogo kongressa nauka i innovatsii v stroitel'stve. Sovremennye problemy mekhaniki stroitel'nykh konstruksij [Materials of the International Congress of Science and Innovations in Construction. Modern problems of the mechanics of building structures]. Voronezh, 2008. Pp.83-92. (rus)
4. Gridnev S. Yu. Raschetnoye modelirovaniye povedeniya balochnykh sistem pod deystviem podvizhnoy nagruzki s uchetom konstruktivnoy nelineynosti [Mathematic simulation of the behavior of beam systems under mobile load with regard to non-linearity]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. 2008. No2. Pp. 64-71.(rus)
5. Gridnev S.Yu. Analyzing the features of oscillations of a floating bridge under a moving load in view of non-linear effects of end supports // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 3 (23). pp. 75-83.
6. Vladimirov V.S. Obobshchennyye funktsii v matematicheskoy fizike [Generalized functions in mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1979. 379 p.(rus)
7. Gridnev,S.Yu., Skalko Yu. I., Ravodin I. V., Yanaeva V. V. Modelirovaniye kolebaniy uprugoy opertoj dinamicheskoy sistemy s ogranichitelyami khoda [Simulation of vibrations of elastically supported dynamical system with movement limiters]. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii. Nauchno–tekhnicheskij zhurnal [Structural mechanics and constructions] . Voronezh, 2017. № 1 (14). Pp. 108-117(rus)

УДК 624.012

ВЛИЯНИЕ ПОЯСКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФЛОРОВ С КРУГЛЫМИ ВЫРЕЗАМИ

Алексей Игоревич Притыкин

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: prit_alex@mail.ru

Аннотация

Опыт эксплуатации корпусов судов разных типов свидетельствует о наличии повреждений днищевых проницаемых флоров с вырезами в стенке. Один из способов повышения несущей способности таких флоров заключается в подкреплении контура вырезов поясками. Цель работы заключалась в получении эмпирической зависимости для оценки критических нагрузок флоров с круглыми вырезами, а также в установлении рациональных размеров подкрепляющих поясков. Исследование устойчивости выполнялось с помощью метода конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS. Результатом работы явилась зависимость для оценки критических нагрузок флора с круглыми вырезами при действии на флор сосредоточенной силы, позволяющая учитывать наличие у флора полок. Анализ результатов расчета флоров показал, что для круглых вырезов целесообразная ширина поясков может составлять от 5-ти до 10-ти толщин стенки в зависимости от размеров вырезов. При этом устойчивость проницаемого флора может быть повышена до устойчивости флора со сплошной стенкой и выше. Полученная зависимость позволяет по параметрам перфорации приближенно определять величину критической нагрузки, вызывающей потерю устойчивости проницаемого флора с неподкрепленными вырезами. Полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с численными расчетами МКЭ. Расхождение в результатах расчета по эмпирическим зависимостям и с помощью численных расчетов МКЭ не превышает 5-10%. Причем эмпирическая зависимость приводит к погрешности в безопасную сторону. Результаты исследований помогут проектировщикам принимать более обоснованные решения при выборе оптимальных размеров конструкций.

Ключевые слова: флоры, круглые вырезы, устойчивость, сосредоточенная сила, эмпирическая зависимость, пояски, МКЭ.

INFLUENCE OF BANDS ON STABILITY OF FLOORS WITH CIRCULAR OPENINGS

Aleksej I. Pritykin

assistant professor, Dr.Sci.Tech.
Professor of Shipbuilding Department
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovietsky prospect 1,
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: prit_alex@mail.ru

Abstract

Exploitation of ships of different types shows that damage of bottom floors with openings in web take place. One of the ways to buildup the load capacity of floors is in strengthening them with bands on contour of openings. The major aim of work was to elaborate the empirical relation for evaluation of critical loads of floors with circular openings and also in determination of effective dimensions of stiffening bands. Research of floor buckling was performed with help of the finite element method using the program complex ANSYS. As a result of work it was obtaining of empirical relation for estimation of magnitude of critical load under point force action on floor and allowing taking into account existence of shelves in floor. The performed analysis of results of calculation of floors showed that for circular openings rational width of bands can be equal to 5-10 thicknesses of web in dependence of dimensions of openings. At the same time the stability of perforated floor can be elevated to the level of solid web stability and even higher. Obtained relation allows determining approximate value of critical load of unstiffened floor when parameters of floor perforation are known. The obtained results are in good correlation with numerical calculations by FEM. Divergence in results on empirical relations and

by FEM does not exceed 5-10%. Moreover, inaccuracy in calculation of empirical relation leads to error on the safe side. Results of investigation can help designers to adopt more reliable solutions about the choice of optimal dimensions of structures.

Key words: penetrated floors, circular openings, stability, pointed force, empirical relation, bands, FEM.

Введение

Опыт эксплуатации корпусов судов разных типов свидетельствует о наличии повреждений днищевых проницаемых флоров с вырезами в стенке, обусловленных действием значительных нагрузок при ударах о воду или от касания грунта при плавании на мелководье. Самым распространенным видом повреждений флоров является выпучивание стенок в районе вырезов из-за значительных усилий сдвига [1]. Статистика повреждений свидетельствует о том, что повреждаемость флоров в районе вырезов, подкрепленных поясками, значительно ниже, чем в зоне вырезов без подкреплений. Умение оценивать критическую нагрузку флоров с вырезами и сопоставление ее с величинами действующих на корпус усилий позволит определять целесообразные размеры поясков, подкрепляющих вырез. Ведь излишне большие размеры подкреплений приводят к утяжелению конструкции, а недостаточные их размеры не дадут желаемого эффекта повышения несущей способности флора.

Знание нагрузок, действующих на флор, и сопоставление их с критическими величинами позволит принимать обоснованное решение о необходимости установления тех или иных подкреплений.

Исследованию устойчивости балок с вырезами посвящено много работ как отечественных [4-7], так зарубежных [8-11] авторов, однако нет зависимостей, позволяющих аналитически оценить их критическую нагрузку.

1. Критические нагрузки флоров с неподкрепленными вырезами

Отметим, что вкратце требования Российского Морского Регистра [2] к конструктивному оформлению флоров с круглыми вырезами сводятся к тому, чтобы их высота не превышала 0.6b (b- высота флора), расстояние между вырезами должно быть не менее 0.5b. При необходимости свободная кромка панели должна быть подкреплена, но рекомендации по размерам подкрепляющего пояска не приводятся.

В Германском Ллоиде [3] нет четких требований к оформлению вырезов облегченных флоров, указывается лишь, что они не должны превышать 0.7H, но зато приводится расчетная зависимость для оценки критических напряжений в панели флора с овальным вырезом при сдвиге (рис.1) в виде

$$\tau_{кр} = 0.9KrE(t/b)^2, \tag{1}$$

где $K = 5.34 + 4/\alpha^2$; α - отношение сторон

панели; r - редуцированный коэффициент

$$r = (1 - d_b/b)(1 - d_a/ab), \tag{2}$$

учитывающий наличие выреза.

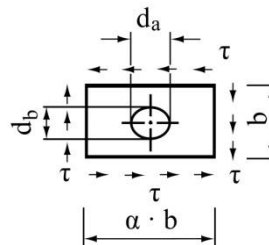


Рис. 1. Панель флора с вырезом

Цель работы заключалась в том, чтобы на основе анализа результатов расчета МКЭ получить приемлемую зависимость для оценки критической нагрузки облегченного флора $V_{кр}$ и определить рациональные размеры подкрепляющего пояска, окаймляющего вырез.

Для описания геометрии флора использовалась запись: $a - b - t_w - b_f - t_f \text{ см} - \beta - \xi$, где a - длина панели с вырезом, b - полная высота флора, t_w - толщина его стенки, b_f и t_f - ширина и толщина полка, $\beta = d_b/b$ и $\xi = d_a/a$ - относительные размеры выреза. Понятно, что для круглого выреза $d_b = d_a$. Линейные размеры балки указываются в сантиметрах.

Оценку устойчивости панели флора с вырезами рациональнее производить по величине критической нагрузки $V_{кр}$, а не по касательным напряжениям, из-за сложности определения последних при расчете МКЭ. Поэтому преобразуем формулу (1) к зависимости для критической величины $V_{кр}$ поперечной силы.

Зависимость (1) в ГП предложена для пластины, а, как известно, максимальные касательные напряжения в двутавровой балке с учетом наличия полка можно определить по соотношению

$$\tau_{кр} = V_{кр} S / I t_w, \tag{3}$$

где $S \approx b_f t_f b / 2 + b^2 t_w / 8$ - статический момент половины площади двутавра относительно нейтральной оси; $I \approx b_f t_f b^2 / 2 + b^3 t_w / 12$ - момент инерции всей площади.

Приравняв (1) и (3), получим выражение для критической нагрузки в виде

$$V_{кр}^{флор} = 0.72Kr_bEt^3I/Sb^2. \quad (4)$$

В выражении (4) учтено, что для двутавровой балки влияние вырезов на устойчивость гораздо ниже, чем в пластине. Более корректно устойчивость флора с круглыми вырезами будет отражаться зависимостью (4), если в нее вместо r в форме (2) подставить редуцированный коэффициент

$$r_b = \sqrt{(1 - d_b/b)(1 - d_b/cb)}, \quad (5)$$

а числовой множитель снизить до 0.72 вместо 0.9.

Если в (4) положить $r_b = 1$, то получим величину критической нагрузки для флора со сплошной стенкой.

Проверим применимость зависимости (4) соответствующими расчетами МКЭ.

Рассмотрим флор с круглыми вырезами с шарнирным опиранием по концам. Чтобы исключить влияние изгибающего момента и учитывать лишь действие поперечной силы, флор принят достаточно коротким всего с двумя вырезами. Нагружается он сосредоточенной силой посередине пролета. Для сокращения времени счета учитывается симметрия конструкции и на рисунках представлена только половина флора с одним вырезом. Размеры флора выбраны с таким расчетом, чтобы его критическая нагрузка при сплошной стенке $V_{кр}^{флор}$

равнялась 100кН. Тогда критическая нагрузка перфорированного флора указывает процент от $V_{кр}$ сплошного флора, что удобно при анализе.

Расчет МКЭ шарнирно опертого флора размерами 188-64-0.4-13-0.6см-0.5-0.34 (рис.2) дает значение $V_{кр}^{МКЭ} = 58.5кН$.

ФАКТ=58.522

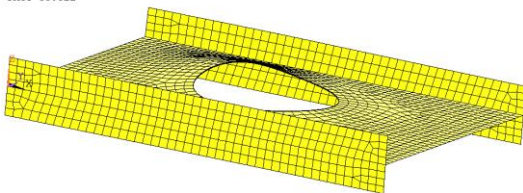


Рис.2. Устойчивость флора с вырезами 0.5b

Вычисления по (4) дают

$$V_{кр} = 0.72(5.34 + 4/1.47^2)((1 - 0.5)(1 - 0.34))^{0.5} * 2.1 \cdot 10^4 \cdot 0.4^3 \cdot 2.47 \cdot 10^4 / (454 \cdot 64^2) = 59.2кН. \quad (6)$$

Расхождение с МКЭ (рис.2) около 1%.

Проведем теперь вычисления МКЭ для флора с вырезами диаметром 0.55b, 0.6b, 0.65b и 0.7b. Отметим, что при изменении относительного размера выреза по высоте будут меняться и относительные размеры по длине. Данные расчета, представленные в табл.1, показывают, что с увеличением диаметра выреза с 0.5b до 0.7b величина $V_{кр}$ снижается на 25%. Оценить

степень снижения устойчивости очень легко по редуцированному коэффициенту r_b (5).

Фактически устойчивость флора с круглыми вырезами диаметром 0.7b снижается почти в 2.5 раза по сравнению с флором со сплошной стенкой.

Таблица 1

Влияние диаметра вырезов на $V_{кр}$

d/b	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
$V_{кр}^{МКЭ}$, кН	58.5	54.0	50.1	46.8	43.8
$V_{кр}$ (4)	59.2	54.7	50.2	45.6	40.9
δ , %	1.2	1.3	0.2	2.6	6.6

Расхождение результатов расчета по (4) с данными, полученными МКЭ (табл.1), в диапазоне вырезов $0.5 \leq \beta \leq 0.6$, рекомендуемых Морским Регистром, лишь незначительно превышает 1%. При вырезе диаметром 0.7b, допускаемых Германским Ллойдом, ошибка расчета достигает 6.6%.

Расчет по зависимости (4) при $r_b = 1$ приводит к значению $V_{кр}^{спл} = 103кН$, что дает отклонение от расчета МКЭ (рис.3) в 2.3%.

ФАКТ=100.72

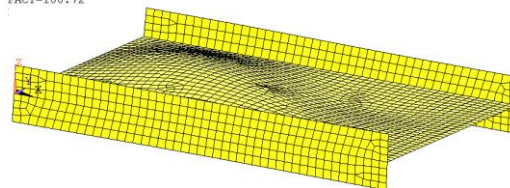


Рис.3. Критическая нагрузка флора без вырезов

При уменьшенных диаметрах вырезов 0.3b и 0.4b погрешность в оценке устойчивости по (4) не превышает 3%. Таким образом, зависимость (4) дает инженерную точность расчета в диапазоне относительных высот вырезов $0 \leq \beta \leq 0.65$.

2. Влияние размеров полок на устойчивость флоров

Проанализируем теперь влияние полок на критическую нагрузку флора. В табл.2 приведены результаты расчета устойчивости флора размерами 94-64-0.4- $b_f - t_f$ см-0.5-0.34 с разной шириной и толщиной полок. В одном случае при неизменной ширине полки увеличивается ее толщина до 1см, а во втором – возрастает и ширина и толщина (табл.2).

Таблица 2

Влияние размеров полок $b_f * t_f$ на $V_{кр}$

$b_f * t_f$, см	13*0.6	13*1	18*1	18*2
$V_{кр}^{МКЭ}$, кН	58.5	67.8	69.7	75.3
$V_{кр}^{флор}$ (4)	59.2	62.0	63.6	66.2

$\delta, \%$	1.2	8.6	8.8	12.1
--------------	-----	-----	-----	------

Результаты показывают, что зависимость (4) дает значительную погрешность в оценке критических нагрузок при увеличении размеров полков. Расчеты МКЭ свидетельствуют, что увеличение ширины полки влияет не столь существенно на повышение устойчивости флора, как увеличение ее толщины (сравните 3-ий и 2-ой столбцы табл.2). По-видимому, увеличение толщины полков влияет на степень заделки стенки, которая не отражается зависимостью (4). А вот увеличение ширины полков выражение (4) учитывает довольно неплохо (сравните 3-ий и 4-ый столбцы табл.2).

Расчет МКЭ флора с размерами полков 13*1см приведен на рис.4.

ФАСТ=67.8059

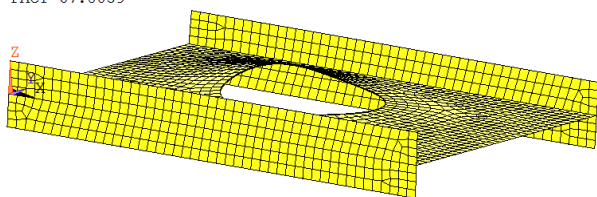


Рис.4. Устойчивость флора с $b_f * t_f = 13*1\text{см}$

3. Влияние поясков на устойчивость флоров

Зависимость (4) не отражает влияния на устойчивость флора поясков, подкрепляющих вырезы, поэтому анализ проводился на основании только расчетов МКЭ.

Рассмотрим влияние размеров $b_b * t_b$ поясков на величину $V_{кр}$. Толщину поясков примем равной толщине стенки флора. Результат расчета флора, подкрепленного поясками 5t*t, для вырезов высотой 0.5b приведен на рис.5.

При наличии в панели флора круглого неподкрепленного выреза диаметром $d=0.5b$ критическая нагрузка, определенная выше МКЭ, имеет величину $V_{кр}^{круз} = 58.5\text{кН}$. При подкреплении выреза пояском размерами 5t*t значение критической нагрузки возрастает до $V_{кр}^{круз} = 105.7\text{кН}$, как показано на рис.5.

ФАСТ=105.706

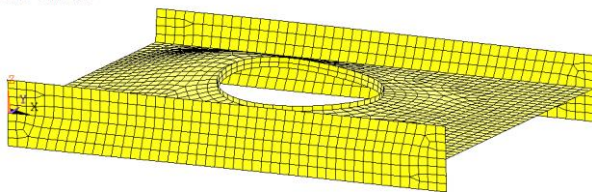


Рис.5. Устойчивость флора, подкрепленного пояском 5t*t

График, построенный по результатам аналогичных расчетов МКЭ флора с разной шириной подкрепляющих поясков (рис.6), показывает, что наличие поясков в указанном диапазоне существенно повышает устойчивость

флора. Уже при поясках размером 5t*t при $d=0.5b$ величина критической нагрузки превышает таковую для флора со сплошной стенкой (рис.3). Дальнейшее увеличение ширины пояска до 15t позволяет повысить устойчивость еще на 20%, но степень роста $V_{кр}$ значительно ослабевает.

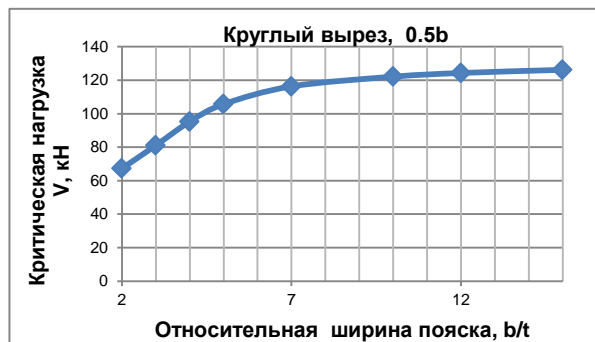


Рис.6. Влияние ширины пояска на $V_{кр}^{круз}$

Как видим, наличие пояска шириной 5t повышает устойчивость в 1.8 раза, а при ширине 10t величина $V_{кр}^{круз}$ возрастает в 2 раза по сравнению с неподкрепленным вырезом.

Исходя из рис.6, можно сделать вывод, что для круглых вырезов с отношением $d_b / b = 0.5$ нецелесообразно повышать ширину пояска больше 8t.

Отметим, что полученные результаты позволят уточнить распространенную практику [1] установки поясков размерами 10t*t.

При увеличении размеров выреза до 0.6b повысить критическую нагрузку до уровня $1.2V_{кр}$ сплошного флора также удастся установкой поясков шириной 8t.

Приварка поясков даже размером 5t*t повышает устойчивость флора с $d=0.6b$ до уровня панели со сплошной стенкой.

Таким образом, можно заключить, что эффективные размеры подкрепляющего пояска зависят не столько от габаритных размеров выреза, сколько от толщины подкрепляемой стенки флора.

Поскольку согласно требованиям Морского Регистра высота вырезов во флорах ограничивается величиной 0.6b, то и рекомендации будут относиться к флорам с такими вырезами.

Заключение

Оценку устойчивости панели флора с круглыми вырезами рациональнее производить по величине критической нагрузки, а не по касательным напряжениям, из-за сложности определения последних при расчете МКЭ.

Получена эмпирическая зависимость (4) для критической нагрузки $V_{кр}^{круз}$ пронцаемого флора

с круглыми вырезами, позволяющая учитывать как размеры перфорации, так и размеры полок.

Зависимость (4) дает инженерную точность расчета для флоров с неподкрепленными вырезами в диапазоне их высот $0 \leq \beta \leq 0.65$, включая вариант со сплошной стенкой.

Подкрепление свободных контуров поясками может полностью компенсировать эффект наличия вырезов и повысить критическую нагрузку до значения, соответствующего устойчивости флора со сплошной стенкой.

Целесообразные размеры ширины поясков при их толщине равной толщине стенки флора лежат в диапазоне $5t \leq b_b \leq 8t$.

Степень снижения устойчивости флора при наличии в его стенке неподкрепленных вырезов удобно оценивать по редуцированному коэффициенту r_b .

. Благодарности

Автор благодарит Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР [АААА-А17-117051840014-8](#)) и признателен доценту кафедры инженерной механики Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота С.В. Тананыкину за помощь в разработке программ на языке ANSYS.

Литература

1. Барабанов Н.В. и др. Повреждения судовых конструкций. Ленинград. 1977. 400с.
2. Российский Морской Регистр. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. 2017. 200с.
3. Германский Ллойд. Правила классификации и постройки. Морские суда. Корпусные конструкции. С-Пб. 2007. ч. 1.1-03. 18с.
4. Шаньгин И. Д. Прочность и устойчивость стенок рамных связей судов внутреннего плавания в районе вырезов: автореф. дисс... канд. техн. наук. Н.Новгород, 1994. 25с.
5. Арончик А.Б., Селезнева В. А. Экспериментальное исследование устойчивости стенок перфорированных балок // Исследование легких металлических конструкций производственных зданий. Красноярск. 1984. С.4-15.
6. Притыкин А.И., Притыкин И.А. Влияние ширины полок и толщины стенки на местную устойчивость перфорированных балок // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С.133-137.
7. Pritykin A., Lavrova A. Stress-strain state and local buckling of cellular beams with the different forms of openings //Proc. of the 19th Int. conf. "Mechanika-2014". Kaunas.: "Technologija" Lithuania, 2014. Pp. 219-224.
8. Cheng B.& Zhao J. Strengthening of perforated plates under axial compression: buckling analysis. //Thin-Walled Structures. 2010. Vol.48. Pp.905-914.
9. Durif S., Bouchair A., Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. // J. of Constructional Steel Research. 2013. Vol.82. Pp.72-87.
10. Jamadar F. M.,& Kumbhar P. D. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. V.2 (2). Pp. 715-722.
11. Lagros N. D., Psarras L. D., Papadrakasis M.,& Panagiotou G. Optimum design of steel structures with web opening. // J. of Engineering Structure. 2008. V.30(4). Pp. 2528-2537.

References

1. Barabanov N.V & oth. (1977) Damage of ship structures. Leningrad. 400pp.
2. Rossijskij Morskoj Registr. Pravila klassifikazii I postrojki morskikh sudov. II. Korpus. 2017. 200pp.
3. Germanskij Llojd. Pravila klassifikazii I postrojki. Morskie suda. Korpusnye konstrukzii. S-Pb. 2007. 1.1-03 -18 p.
4. Shangin I.D. (1994) Prochnost i ustojchivost stенок ramnyh svyazej sudov vnutrennego plavania v rajone vyrezov: avtoref. dissert. kand. techn. nauk: 05.08.02. Stroitel'naja mekhanika korablja. NPI.N.Novgorod. 25 p.
5. Aronchik A.B., Selezneva V. A. (1984) Eksperimentalnoe issledovanie usojchivosti stенок perforirovanyh balok. Issledovanie legkih metallicheskih konstrukzij proizvodstvennyh zdaniy. Krasnojarsk. 4-15.
6. Pritykin A.I., Pritykin I.A. (2010) Vlijanie shiriny polok I tolshchiny stенок na mestnuju ustojchivost perforirovanyh balok. Vestnik MGSU. 1. 133-137.
7. Pritykin A., Lavrova A. (2014) Stress-strain state and local buckling of cellular beams with the different forms of openings. Proc. of the 19th Int. conf. "Mechanika-2014". Kaunas.: "Technologija" Lithuania. Pp. 219-224.
8. Cheng B.& Zhao J. (2010) Strengthening of perforated plates under axial compression: buckling analysis. Thin-Walled Structures. Vol.48. Pp. 905-914.
9. Durif S., Bouchair A., Vassart O. (2013) Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. J. of Constructional Steel Research. Vol.82. 72-87.
10. Jamadar F. M.,& Kumbhar P. D. (2015) Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings. International Research Journal of Engineering and Technology. V.2 (2). 715-722.
11. Lagros N. D., Psarras L. D., Papadrakasis M.,& Panagiotou G. (2008) Optimum design of steel structures with web opening. J. of Engineering Structure. V.30(4). 2528-2537.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.024

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ СУДОВ****Москаленко Михаил Анатольевич**

доктор технических наук, профессор кафедры Теории и устройства судна
Морской государственной университет им. адм. Г.И.Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: asmsh@rambler.ru

Друзь Иван Борисович

Доктор технических наук, профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов
Морской государственной университет им. адм. Г.И.Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: druz_i_b@mail.ru

Аннотация

Аварии с истощением корпусами (относительно новых судов) своей несущей способности становятся в последние годы актуальной проблемой, как следствие однокритериальной оптимизации водоизмещения по дедвейту. При этом не учитывается то обстоятельство, что прочность материала в составе конструкций может быть существенно ниже спецификации для относительного удлинения, полученного при испытаниях стандартных образцов на разрыв. При одноосном же растяжении образца усилия распределены равномерно по длине и площади поперечного сечения, резервы пластического деформирования отсутствуют. При работе материала в составе конструкции напротив, имеется возможность для перераспределения напряжений, и следовательно, процесса пластического деформирования. В реальных судовых конструкциях зависимость между напряжениями и деформациями достаточно сложна и носит нелинейный характер. В статье излагается предложенный авторами подход к оценке предельных возможностей судостроительных сталей на основе нелинейных моделей процессов пластического деформирования материала.

Ключевые слова: судно, аварии, конструктивная безопасность, деформация, пластичность.

**METHODOLOGICAL EVALUATION SHIPBUILDING STEELS LIMITS
FROM THE POINT VIEW THE STRUCTURAL SAFETY OF THE MARINE
VESSELS****Mikhail A. Moskalenko**

doctor of technical sciences, professor chair of the ship theory and arrangement
Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoy
Verhneportovaya 50a, St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: asmsh@rambler.ru

Ivan B. Druz

doctor of technical sciences, professor chair of the theoretical mechanics&resistivity of materials
Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoy
Verhneportovaya 50a St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: druz_i_b@mail.ru

Abstract

Crash with exhaustion hulls (relatively new ships) its bearing capacity in recent years become a topical issue, as a consequence, one criterion optimization of the tonnage by deadweight, it doesn't account for the fact that the strength of the material within the structure may be significantly below the specifications for elongation, obtained by samples testing standard in the gap uniaxial tensile specimen the effort is distributed evenly along the length and cross sectional area. The reserves of plastic deformation are missing. When the material in the design on the contrary, there is a possibility for redistribution of stresses and hence process of the plastic deformation. In real ship structures the

relationship between stress and strain is quite complex and is not linear. The article describes proposed approach to the assessment of the limits shipbuilding steels on the basis of nonlinear models of the processes material plastic deformation.

Key words: vessel, accidents, structural safety, deformation, plasticity.

Основным видом повреждений связей корпуса судна продолжают оставаться трещины как хрупкого так и усталостно-хрупкого характера. Причем сами повреждения происходят как правило при относительно низких уровнях действующих напряжений до 50 % от предела текучести материала. Аварии судов с исчерпанием корпусов своей несущей способности и последующим переломом стали актуальными с самого начала развития цельносварного судостроения, что было типично для серийных стандартных судов типа п/х «Либерти».

Аварии, как правило, происходили во время балластных переходов, на волнении и в холодное время года. Последующий научный анализ позволил сделать выводы о конструктивных недостатках проекта, связанных с отсутствием серьезных исследований концентрации напряжений в корпусных конструкциях. Согласно данным исследований американского морского архитектора, куратора морской истории в Смитсоновском институте в Вашингтоне, округ Колумбия, Говарда Ирвинга Шапеля, за десять лет, с 1943 по 1953 годы наблюдалось 1450 случаев разрывов корпуса или переломов на судах длиной более 100м. Из них 231 аварию можно классифицировать как серьезную и связанную с опасностью перелома. В 19 случаях перелом произошел фактически как перегонировалось. С повышением уровня судостроительной науки подобные аварии не прекратились, в качестве примера, сюда можно отнести экологические катастрофы, связанные с переломом корпуса танкеров т/х «Эрика» в 1999 году и т/х «Престиж» в 2002 году. Перед судостроителями была поставлена задача – обеспечить «конструктивную безопасность» судов как систем с неэкономической ответственностью. Это требование вызвало соответствующую политическую реакцию со стороны Международной морской организации (ИМО), связанную с выводом из эксплуатации однокорпусных танкеров.

На сегодняшний день наиболее серьезной из аварий остается перелом в 2013 году «мега-контейнеровоза» «MOL Comfort», принадлежащего компании «Mitsui OSK Lines», длиной 316 м. По предварительному заключению экспертов, причиной крушения стали боковые нагрузки, превышающие допустимый предел. Последовавшее расследование не выявило конструктивных недостатков судна. По результатам расследования в середине декабря 2013г. Международная ассоциация классификационных обществ, МАКО (International Association of Classification Societies, IACS) приняла новые правила по конструкции

нефтеналивных танкеров, балкеров и судов класса «Post-Panamax». В 2014 году МАКО приняло общие правила структурной безопасности для сухогрузных судов и нефтеналивных танкеров которые вступили в силу в 2015 году, а в 2016 году были введены требования по обязательному взвешиванию морских контейнеров перед погрузкой на судно.

Однако, пока опыта эксплуатации судов, построенных по новым правилам, не существует, а в судоходную отрасль еще длительное время будет поступать значительное количество судов заказанных до введения новых правил.

Флот судов-контейнеровозов и навалочников продолжает расширяться, в портфелях заказов верфей запланированы к постройке суда вместимостью 20600 ед. дфэ. и навалочники дедвейтом 400 тысяч тонн. В марте 2017 года было спущено на воду первое судно серии из 5 судов MOLTriumph на 20150 дфэ. длиной 400 м. Поэтому, проблемы обеспечения оценки уровня конструктивной безопасности достаточного для эксплуатации будут стоять достаточно остро.

Кроме того, на практике следует учитывать, что с позиции судовладельца любое судно следует рассматривать как «инструмент для получения прибыли». Следовательно, ни один судовладелец не откажется от прибыли в пользу перевозок необоснованных запасов прочности за счет увеличения массы корпуса и соответствующего уменьшения дедвейта, учитывая тот факт, что большинство проектировщиков применяют однокритериальную оптимизацию водоизмещения по дедвейту.

Со своей стороны классификационные общества вынуждены снижать коэффициент запаса прочности, по мере развития судостроительной науки и необходимости привлечения под свой надзор потенциальных судовладельцев. Современные мега-суда построенные с целью экономии издержек на масштабе размеров остаются и будут оставаться относительно «гибкими», с риском потерять несущую способность корпуса даже у причала при неправильном порядке выполнения грузовых работ, даже при наличии или отсутствии двухкорпусной конструкции.

Надежды мирового сообщества на контроль «конструктивной безопасности» со стороны государства порта согласно резолюции ИМО А.787(19) по нашему мнению не оправдывают себя, так как конструктивная безопасность относится к пассивной (или скрытой) составляющей безопасности и может быть достаточно эффективно проконтролирована только во время освидетельствования подводной части корпуса судна в доке.

При оценке уровня конструктивной безопасности морских судов полагают, что изгиб корпуса происходит по схеме плоского напряженного состояния вплоть до разрушения с образованием трещин в крайних поясах эквивалентного бруса. Считается, что материал в образцах и в составе конструкции работает одинаково и соответствует спецификационным данным полученным при механических испытаниях судостроительных сталей.

Как показывает анализ серьезных аварий корпусов морских судов, в том числе связанных с переломом корпуса [1], материал в составе конструкции способен разрушаться при нагрузках значительно ниже предельных и теряет часть своей пластической способности. Однако, этому факту до сих пор не уделяют должного внимания при проектировании поперечного сечения корпуса, что может явиться определяющей причиной при разрушении конструкции по схеме «слабого звена» при резком увеличении изгибающего момента в поперечном сечении за счет неравномерности между силами веса и поддержания по длине корпуса судна.

Работоспособность судовых корпусных конструкций в значительной степени зависит от пластической способности материала. Из-за действия локальных нагрузок, концентрации напряжений в реальной судовой корпусной конструкции напряжения всегда распределены неравномерно. Поэтому материал, используемый для корпусной конструкции, должен обладать свойством выравнять напряжения и замедлять скорость их роста на отдельных участках. Чтобы количественно охарактеризовать эту способность материала выравнять локальные перенапряжения, на практике определяют предельную пластичность материала. Причем необходимость определения предельной пластичности возникает также при оценке долговечности по малоцикловой усталости $M_{лЦУ}$. Считается, что в предельном случае (разрушение 1/4 цикла) нагрузка $M_{лЦУ}$ переходит в предельную. Такой учет пластических свойств материала позволяет выявить значительные запасы прочности, которыми обладают конструкции по отношению к состоянию фибровой текучести. По данным Г. В. Бойцова [2], для стали они составляют от 20 до 100 % и выше. Согласно требованиям правил Классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) [3], минимальное относительное удлинение образцов судостроительной стали, в зависимости от толщины лежит в пределах от 14 % до 22 %.

Наиболее распространенные «стандартные» характеристики предельной пластичности корпусных сталей определяются при осевом растяжении [4]. Однако такой подход не может дать полное представление о пластических возможностях материала. Так, обработанный на высокую прочность образец в значительной степени теряет способность пластически деформироваться перед разрушением в

условиях двухосного растяжения, даже если он имеет высокую пластичность при осевом растяжении.

С появлением третьего растягивающего компонента напряжений снижение способности материала пластически деформироваться перед разрушением проявляется еще сильнее. Поэтому различные группы связей в составе корпуса судна имеют различную пластическую способность в зависимости от напряженного состояния при эксплуатации судна.

В связи с этим нами были выполнены специальные исследования, позволившие дать некоторые рекомендации по количественной оценке предельной пластичности стали в условиях общего случая напряженного состояния. Как следует из [5] величина истинного напряжения σ_p , при котором происходит разрушение при осевом растяжении, может быть принята за характеристику прочности металла, вне зависимости от схемы напряженного состояния. Поэтому, рассматривая общий случай трехосного напряженного состояния, мы полагали, что разрушение должно наступать тогда, когда наибольшее главное напряжение σ_1 , достигает величины σ_p . При этом пластическая деформация достигнет своего предельного значения $l_{1пл} = l_{1пр}$. Такому же напряжению при осевом растяжении этого материала соответствует деформация l_i . Следовательно, величина $\eta = l_{1пл}/l_{iпр}$ определяет пластические возможности материала. Аппроксимируя зависимость $\sigma_p = f(l_{iпр})$ в виде степенной функции, получили расчетную формулу для определения отношения

$$\eta = 0,5(2 - m - z)(1 - m - z - zm + z^2 + m^2)^{1-n/2n} \quad (1)$$

В трехмерном пространстве параметров $m = \sigma_1/\sigma_2$; $z = \sigma_3/\sigma_1$, при $n = \text{const}$ функцию $\eta = f(m, z)$ можно изобразить графически в виде поверхности. На рис. 1, 2 и 3 представлены предельные пластические возможности различных групп корпусных сталей (см. таблицу). На каждом рисунке заштрихованная площадь S_x определяет те соотношения компонентов напряжений, при которых может произойти хрупкое разрушение.

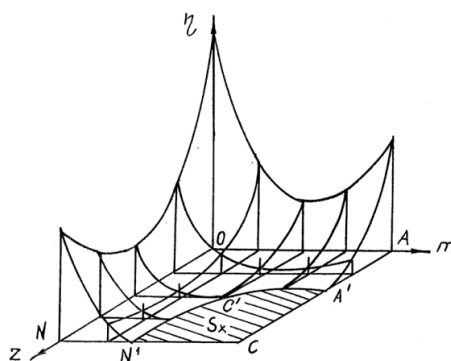


Рис. 1. График функции η для стали I группы

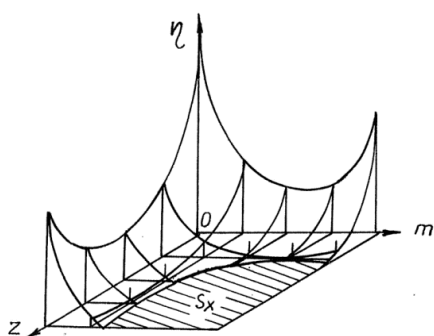


Рис. 2. График функции η для стали II группы

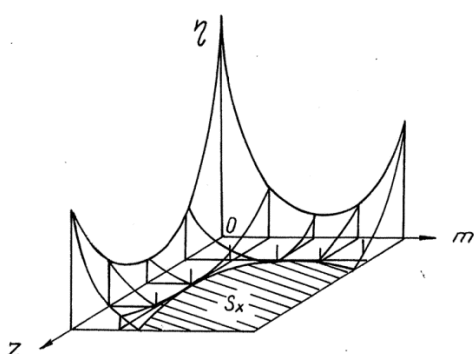


Рис. 3. График функции η для стали III группы

При максимально жесткой схеме нагружения, когда $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ разрушение происходит без пластической деформации. По мере увеличения прочностных свойств стали величина S_x растет и для таких материалов наличие даже небольшой величины третьего растягивающего компонента может предопределить хрупкий характер разрушения (см., например, рис. 3). В связи с этим нами был предложен критерий $R_{3п}$, обобщенно определяющий предельную пластичность корпусных сталей $R_{3п} = S_0/S_{\Sigma}$, где $S_0 = |S_{\Sigma} - S_x|$, S_{Σ} – площадь квадрата OACN (см. рис. 1). Для каждой группы стали в таблице представлены расчетные значения $R_{3п}$.

Таблица 1

Характеристики сталей

Группа стали	σ_T, τ , МПа.	l1, пр	n	$R_{3п}$
I	235	0,17	0,11	66,30
II	355	0,15	0,09	50,20
III	390-420	0,13	0,07	44,50

Остаточная пластичность деформированной конструкции может быть оценена с помощью критерия:

$$n_k = S_{01} / |S_0 S_n| \quad (2)$$

где S_{01} – площадь под фигурой, ограниченной графиками для деформированной конструкции (остаточная пластическая способность); S_n – нормативное значение предельной пластичности

$S_n = S_0$ при $R_{3п} = 40\%$. Если $n_k < 1$, то конструкция имеет недостаточную для дальнейшей эксплуатации предельную пластичность и остаточную деформацию следует классифицировать как повреждение. В литературе имеются сведения [6], что коррозионное поражение материала корпуса судна после длительной эксплуатации уменьшает l_1 примерно на 10%. Однако, как показал анализ при испытании образцов, такое изменение ведет к уменьшению $R_{3п}$ не более чем на 1%.

Выводы

1. Схема напряженного состояния оказывает существенное влияние на предельную пластичность корпусных сталей. Так, при действии σ_3 (даже незначительной величины) может произойти резкое уменьшение пластической способности материала и как следствие хрупкое разрушение по схеме «статического излома».

2. Пластические возможности стали целесообразно оценивать по критерию $R_{3п}$, а для деформированной конструкции – по критерию n_k . При этом, для нормирования остаточных деформаций при повреждении корпусов судов, данный обобщенный критерий можно использовать вместо допускаемого остаточного удлинения для физических моделей повреждений предложенных в [5].

3. Коррозионное разрушение корпуса судна практически не оказывает влияния на предельные возможности стали.

4. Коэффициент использования материала при нормировании допускаемых напряжений в поперечном сечении корпуса судна следует назначать с учетом оценок остаточной пластичности применяемых корпусных сталей. Программу соответствующих испытаний образцов материала следует разработать и ввести в практику судостроения и судоремонта.

Литература

1. Игнатович, В. С.. Исследование прочности транспортных судов, погибших в результате перелома корпуса / В. С. Игнатович, С. М. Бернацкая. // – Вестник СевНТУ, вып. 106, 2010. –174-179 с.
2. Бойцов, Г. В. О критериях нормирования местной прочности. – Судостроение, 1979, № 1, – 5-9 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов часть XIII материалы / Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2017. – 166 с.
4. Николаев, Г.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин и др. // – М.: Высшая школа, 1971, – 760 с.
5. Максимаджи, А. И. Оценка технического состояния корпусов морских судов / А. И. Максимаджи, Л. М. Беленький и др. // – Л.: Судостроение, 1982, – 156 с.
6. Чапкис Д.Т. О влиянии неравномерного износа на статическую прочность пластин судового корпуса. – Судостроение, 1963, № 5, – 14 с.

References

1. Ignatovich, V. S.. Issledovanie prochnosti transportnyh sudov, pogibshih v rezul'tate pe-reloma korpusa / V. S. gnatovich, S. M. Bernackaya. – Vestnik SevNTU, vyp. 106, 2010. –174-179 s.
2. Bojcov, G. V. O kriteriyah normirovaniya mestnoj prochnosti. – Sudostroenie, 1979, № 1, – 5-9 s.
3. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov chast' XIII materialy Rossijskij mor-skoj registr sudohodstva. – SPB., 2017. – 166 s.
4. Nikolaev, G.A. Raschet, proektirovanie i izgotovlenie svarnyh konstrukcij G. A. Nikolaev, S. A. Kurkin i dr. // – М.: Vysshaya shkola, 1971, – 760 s.
5. Maksimadzhi, A. I. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya korpusov morskikh sudov A. I. Maksima-dzhi, L. M. Belen'kij i dr. – L.: Sudostroenie, 1982, – 156 s.
6. CHapkis D.T. O vliyanii neravnomernogo iznosa na staticheskuyu prochnost' plastin sudovogo korpusa. – Sudostroenie, 1963, № 5, – 14 s.

УДК 678.686: 66.047.3.086.2

АКУСТИЧЕСКАЯ ПРОПИТКА ДРЕВЕСИНЫ**Легуша Федор Федорович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: legusha@smtu.ru

Павловский Артём Сергеевич

аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 3
e-mail: artempavlovskiy@gmail.ru

Пугачев Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
АО «Концерн «МПО-Гидроприбор»
194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24
e-mail: spugachev@bk.ru

Рытов Евгений Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры физики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Семенова Наталия Глебовна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики
Санкт-Петербургский государственный университет
198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 3
e-mail: tatabukamena@rambler.ru

Аннотация

Объект исследования – процесс пропитки древесины различных пород воздействием акустических колебаний ультразвуковой частоты. Цель работы – интенсификация процесса пропитки. Образцы из уплотненной и неуплотненной березы, а также из неуплотненной осины, пропитывались иммерсионным способом, а также по схеме тонкого слоя. Пропитывающим составом служил антипирен марки «Тент» на водной основе. Эксперименты показали, что акустические колебания ускоряют процесс пропитки и увеличивают массу пропитываемого состава, закрепляющуюся на поверхности древесины. Приведен анализ особенностей акустической пропитки, реализуемой иммерсионным способом и по схеме тонкого слоя. Для показавшей себя наиболее эффективной схемы тонкого слоя представлены рекомендации по выбору толщины слоя, а также взаимного расположения направления пропитки и колебательных смещений инструмента. Показано, что использование схемы тонкого слоя позволило осуществить качественную пропитку образцов из уплотненной березы

Ключевые слова: акустические колебания, уплотненная и неуплотненная древесина, пропитывающий состав, схемы пропитки, эффективность акустической пропитки.

ACOUSTICAL WOOD IMPREGNATION**Fedor F. Legusha**

Prof., Dr. Sci. Phys.-Math. State marine technical university of St. Petersburg,
3, Lotsmanskaya Str., 190121, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: legusha@smtu.ru

Artjom S. Pavlovsky

Postgraduate student, Saint Petersburg State University
3, Uliyanovskaya str., 198504, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: artempavlovskiy@gmail.com

Sergej I. Pugachev

Prof., Dr. Sci. Tech., the leading Researcher JSC «Concern «SUW – Gidropryor»
24, Bolshoj Sampsonievskij Str., 194044, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: spugachev@bk.ru

Evgenij Ju. Rytov

Cand. Sci. Tech., the senior lecturer State marine technical university of St. Petersburg,
3, Lotsmanskaya Str., 190121, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Natalija G. Semenova

Cand. Sci. Phys.-Math, Senior Lecturer, Saint Petersburg State University
3, Uliyanovskaya str., 198504, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: tatabukamena@rambler.ru

Abstract

The object under study is an impregnation process of wood of different species by exposure to acoustic ultrasound frequency vibrations. The purpose of the work is to intensify the impregnation process. Specimens of compacted and non-compacted birch and also of non-compacted aspen were impregnated by the immersion method and also using the thin layer mode. Water-based fire retardant of "Tent" brand was used as an impregnating mixture. Experiments showed that acoustic vibrations accelerated the impregnation process and increased the impregnation mixture weight fixed on the wood surface. The report analyzes the peculiarities of acoustic impregnation implemented by the immersion method and thin layer mode. The authors provide recommendations for selecting a layer thickness, angle of incident of an ultrasonic tool in the impregnating liquid and also mutual position of impregnation direction and vibrational displacement of the tool for the thin layer mode which proved to be the most effective. It was shown that the use of the thin layer mode allowed to implement the high-quality impregnation of compacted birch.

Key words acoustic vibrations, compacted and non-compacted wood, impregnating mixture, impregnation modes, efficiency of acoustic impregnation.

Введение

Древесина, по-прежнему, является незаменимым материалом в конструкциях современных кораблей. Ее уникальные физико-механические и массо-габаритные характеристики, стойкость к дестабилизирующим воздействиям делают актуальными работы, призванные расширять область применения этих материалов при создании кораблей новых поколений. С этой точки зрения важной технико-экономической задачей является вовлечение в промышленный оборот древесины малоценных пород: березы, осины, тополя и ряда других. Эту задачу реализуют в двух основных направлениях: 1) уплотняют древесину воздействием силовых механических и электрофизических полей, доводя физико-механические характеристики малоценной древесины до аналогичных характеристик древесины ценных пород: дуба, ясеня, бука. 2) пропитывают древесину жидкими составами, что, наряду с повышением физико-механических характеристик древесины, придает ей огнестойкость и обеспечивает биологическую защиту. В данной работе представлены и обсуждены экспериментальные результаты, полученные в рамках второго направления, ограниченные воздействием пропитывающего материала на поверхность древесины.

Известно, что при пропитке многих конструкционных материалов, включая древесину, пропиточные вещества перемещаются по капиллярам, порам, зазорам или трещинам под действием искусственно создаваемого давления. В результате пропитки наносимая на поверхность твердого тела жидкость закрепляется на ней

вследствие формирования связей, имеющих механическую или химическую природу.

По современным представлениям, последовательными стадиями рассматриваемого процесса являются: 1) смачивание поверхности твердого тела жидкостью; 2) активация поверхности твердого тела; 3) физико-химическое взаимодействие фаз, протекающее обычно в форме диффузии жидкости в твердое тело.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями [1-2] установлено, что возбуждаемые в пропитывающей жидкости ультразвуковые колебания (УЗК) интенсифицируют все стадии пропитки. Применительно к древесине, наиболее распространенной схемой ультразвуковой пропитки (УЗП) является иммерсионная схема [3], согласно которой пропитываемое изделие погружается в ультразвуковую ванну, заполненную жидким пропитывающим составом. Интенсивность возбуждаемых в жидкости упругих звуковых волн должна быть достаточной для возникновения в ней кавитации, а время их воздействия – достаточным для достижения требуемого эффекта пропитки.

Значительный интерес представляет применение для УЗП древесины разработанной в России схемы «тонкого слоя» [1, 4]. Согласно этой схеме колеблющийся с ультразвуковой частотой инструмент возбуждает коротковолновое поле вязких волн в слое жидкости, находящейся на поверхности твердого тела. При этом в зазоре между помещенным в жидкость рабочим торцом инструмента и поверхностью твердого тела возникают знакопеременные колебания давления. В фазе сжатия избыточное давление инициирует вынужденную диффузию, а

в фазе разрежения вызывает кавитацию, активирующую поверхность твердого тела и интенсифицирующую физико-химические процессы взаимодействия жидкости и твердого тела.

1. Описание эксперимента

Экспериментальные установки. УЗП древесины производили как по иммерсионной схеме, так и по схеме тонкого слоя.

В иммерсионной схеме (рис. 1) использовалась ультразвуковая ванна, в дно которой встраивался магнитострикционный преобразователь 1 типа ПМС-6, возбуждаемый ультразвуковым генератором УЗГ5-1,6/22. Ультразвуковое поле создавалось в объеме жидкости 8 в сосуде 6, на дне которого в один ряд размещались пропитываемые образцы 7. При общей продолжительности процесса пропитки, равной T , в течение $T/2$ образцы располагались одной стороной к излучающей поверхности преобразователя ПМС-6, и в течение $T/2$ – к противоположной.

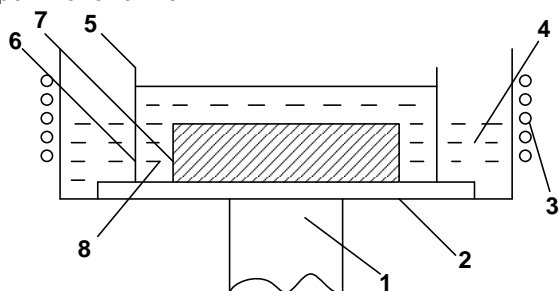


Рис. 1. Иммерсионная схема ультразвуковой пропитки: 1 – преобразователь ПМС-6, 2 – мембрана преобразователя, 3 – система термостатирования жидкости в ванне, 4 – вода, 5 – корпус ванны, 6 – сосуд с пропитывающим составом, 7 – пропитываемый образец, 8 – пропитывающий состав.

Схема тонкого слоя (рис. 2) реализовалась на полуавтоматической ультразвуковой установке для соединения разнородных материалов УЗУН-1. На поверхность образца 1, расположенного на столе установки (на рисунке не показан), наносили тонкий слой пропитывающего состава толщиной H . Поле колебаний создавалось в зазоре h ультразвуковым инструментом 2, который может вводиться в состав под углом α . При механическом перемещении стола ультразвуковой инструмент «сканировал» обрабатываемую поверхность образца в течение времени $T/2$. Затем образец переворачивали и обрабатывали его противоположную поверхность.

Частота УЗК в приведенных схемах составляла 18-20 кГц. Амплитуда колебательного смещения преобразователей ПМС-6 и ПМС-7А варьировалась в пределах 3 – 5 мкм.

Пропитывающий состав. Для пропитки древесины выбрали огнезащитный состав марки «Тент» [5]. Состав на 70% состоит из воды, обладает щелочной реакцией $Ph = 13$ и плотностью, близкой к плотности воды. Пропитку указанным составом проводят при комнатной

температуре. Наряду с огнестойкостью выбранный состав обладает свойством несмываемости. Консистенция состава такова, что находящийся в нем в виде взвеси мелкодисперсный осадок забивает поры древесины, что способствует удержанию состава в пропитываемом материале.

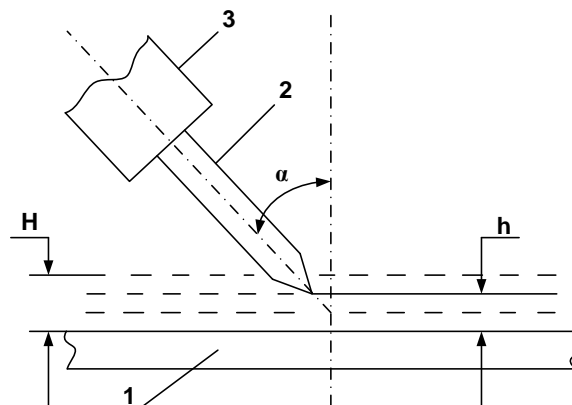


Рис.2. Ультразвуковая пропитка по схеме тонкого слоя: 1 – пропитываемый образец, 2 – ультразвуковой инструмент, 3 – магнитострикционный преобразователь ПМС-7А.

Выбор и подготовка образцов для пропитки.

Пропитке подвергались образцы, изготовленные из древесины малоценных пород: березы (неуплотненной и уплотненной) и неуплотненной осины. Испытания проводились на образцах размерами 150x45x7 мм с относительной влажностью 8%. Известно, что древесина представляет собой материал слоистотрубчатого строения (хвойные, лиственные кольцепоровые) или просто трубчатого строения (лиственные рассеянно поровые) [6-8]. При распиловке бревна на доски были получены образцы для пропитки, в которых обрабатываемая поверхность состояла из плотно уложенных трубок - долевые образцы. При распиловке бревна перпендикулярно его оси получались образцы, на пропитываемую поверхность которых выходили отверстия трубок - торцовые образцы.

Выбор критерия оценки степени пропитки древесины.

Учитывая свойства выбранного пропитывающего состава, в том числе его несмываемость, для текущей оценки степени пропитки было выбрано приращение массы образца. Образец древесины предварительно взвешивали с точностью 0,5%. Затем образец пропитывали, после чего извлекали из пропитывающего состава и сушили при комнатной температуре в течение суток. Высушенный образец взвешивали и определяли изменение массы Δm . Эту величину относили к единице площади S его поверхности. Поэтому в качестве критерия качества пропитки была выбрана мера $\Delta m/S, г/см^2$.

Наряду с определением изменения массы пропитываемых образцов контролировалась их относительная влажность. Этот параметр

определялся как в исходном состоянии образцов древесины непосредственно перед пропиткой, так и спустя сутки, а также спустя семь суток после пропитки в процессе естественной сушки. Относительную влажность образцов определяли кондуктометрическим методом прибором типа HYDROMETTE COMPACT фирмы GANNINGmBH, рассчитанным на измерение относительной влажности в пределах 8 – 30%.

2. Результаты экспериментов

По иммерсионной схеме пропитывались образцы из неуплотненной и уплотненной березы, торцевых и долевых срезов, а также из осины. Ультразвуковые колебания вводились перпендикулярно образующим капилляров древесины в долевых образцах. Торцевые располагались открытыми отверстиями капилляров навстречу колебательной скорости УЗК. Время озвучивания составляло 20 минут. Исходная относительная влажность образцов составляла 8%.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1, где *k* – показатель эффективности. Из таблицы следует, что введение УЗК повышает эффективность пропитки неуплотненных долевых образцов березы и осины, а также березовых торцевых образцов практически одинаково с показателем в 1,3-1,6 раза. Пропитка же уплотненных долевых образцов из березы практически отсутствует.

Таблица 1

Увеличение поверхностной массы образцов древесины по иммерсионной схеме

Материал	Приращение поверхностной массы $\Delta m/S$, г/см ²				<i>k</i>
	Пропитка без УЗК		Пропитка с УЗК		
	Доле вые	Торце вые	Доле вые	Торце вые	
Береза неуплотненная $\rho=0,46$ г/см ³	0,5		0,8		1,6
	2,9		3,5		1,2
		8,1		13,4	1,65
Береза уплотненная $\rho=0,64$ г/см ³	0,5		0,5		1
Осина неуплотненная $\rho=0,4$ г/см ³	1,1		1,45		1,3

Другие методы оценки результатов пропитки, тем не менее, выявили интересные особенности. Рассмотрение среза древесины под микроскопом показало, что глубина проникновения пропитывающего состава через торцы капилляров составляет 0,5 мм. При этом приращение поверхностной массы торцевых образцов в несколько раз превышает таковое у долевых образцов при одинаковых площадях их поверхности. Продолжение наблюдений за изменением массы образцов показало, что у торцевых образцов по сравнению с долевыми

потеря массы через 7 суток в несколько раз больше, т.е. эти образцы сохнут быстрее долевых (табл. 2). Однако сравнение скорости сушки пропитанных с УЗК образцов и без воздействия УЗК показывает, что это воздействие приводит к более прочному закреплению пропитывающего материала в древесине для долевых и торцевых образцов, что существенно снижает скорость естественной сушки. Этот результат, по-видимому, является следствием различных механизмов взаимодействия пропитывающего состава с древесиной в зависимости от направления пропитки.

Таблица 2

Средняя скорость естественной сушки долевых и торцевых образцов, г/сут

Долевые		Торцевые	
Пропитка с УЗК	Пропитка без УЗК	Пропитка с УЗК	Пропитка без УЗК
0,03	0,08	1,1	1,5

В экспериментах для пропитки древесины по схеме тонкого слоя использовались те же образцы, что и для иммерсионной. Отличие состояло в том, что ультразвуковой инструмент вводился в тонкий слой *h* пропитывающей жидкости, находящийся на поверхности образца, на глубину *h*. Зазор *h* между торцом ультразвукового инструмента и пропитываемой поверхностью составлял доли миллиметра. Поверхность образца механически сканировали. Время обработки образца составляло 10 минут.

Сравнение схем воздействия по приращению поверхностной массы образца при ультразвуковой пропитке проведено в таблице 3.

Таблица 3

Приращение поверхностной массы образца из березы при УЗП $\Delta m/S$, г/см²

Иммерсионная схема		Схема тонкого слоя при $h>0$	
Долевой	Торцевой	Долевой	Торцевой
2,5	8,0	2,7	13

Из данных табл. 3 можно сделать следующие выводы. Использование схемы тонкого слоя не дает преимуществ пропитке долевых образцов по сравнению с иммерсионной схемой. Однако пропитка протекает вдвое быстрее. При этом расход пропитывающего состава меньше. Для торцевых образцов схема тонкого слоя дает лучшие результаты по всем показателям. Степень УЗП долевого и торцевого образцов во всех исследованных схемах зависит от длительности процесса (рис. 3 и рис. 4). Для сравнения приведены результаты пропитки образцов без УЗК, т.е. путем выдержки древесины в пропитывающем составе с последующей естественной сушкой. Из зависимостей, полученных при пропитке долевых (уплотненных и неуплотненных), а также торцевых образцов из березы, следует, что

количество пропитывающего состава, способного проникать в древесину, ограничено. Об этом свидетельствует стремление кривых к насыщению при большом времени пропитки без УЗК и пропитке по иммерсионной схеме с УЗК. Схема тонкого слоя обеспечивает значительно большее изменение поверхностной массы образцов за меньший промежуток времени. Особенно это касается образцов из уплотненной древесины. Можно предположить, что последующее уменьшение поверхностной массы (рис. 3) связано с кавитационным разрушением нанесенного слоя из-за большого времени нахождения слоя в кавитационном поле. Из рисунков видно, что пропитка по схеме тонкого слоя длится одну минуту, т.е. время воздействия УЗК на единицу поверхности снижается на порядок. Скорость пропитки по схеме тонкого слоя примерно в 1,5 раза выше, чем в иммерсионной схеме.

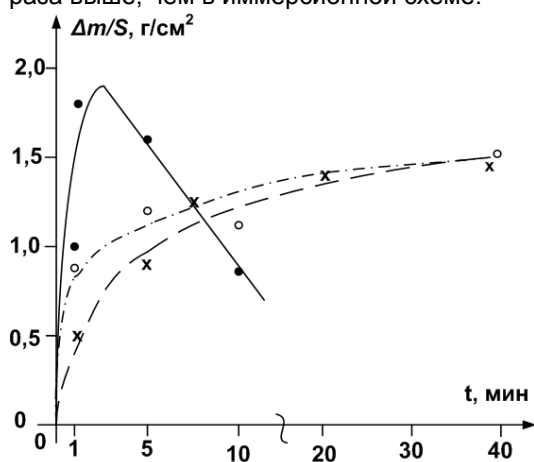


Рис. 3. Зависимость приращения массы долевых образцов из уплотненной березы ($\rho = 0,64 \text{ г/см}^3$, $W = 8\%$) от продолжительности пропитки: x – пропитка без ультразвука, o – УЗП по иммерсионной схеме, • – УЗП по схеме тонкого слоя.

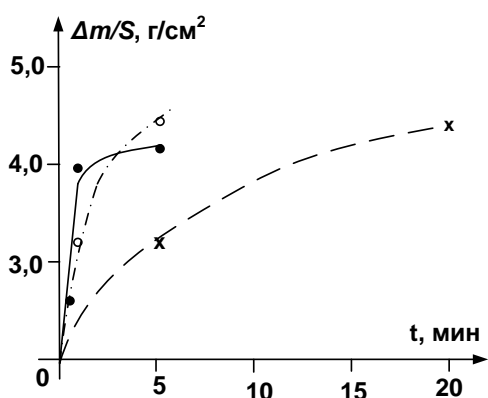


Рис. 4. Зависимость приращения массы долевых образцов из неуплотненной березы ($\rho = 0,46 \text{ г/см}^3$, $W > 30\%$) от продолжительности пропитки (обозначения экспериментальных точек те же, что и на рис.3).

3. Обсуждение результатов

Рассмотрим акустические ситуации в иммерсионной схеме и схеме тонкого слоя. В

практике использования акустических волн для интенсификации технологических процессов весьма редко приходится иметь дело с объемами, характерные размеры которых превышают длину используемой акустической волны или хотя бы соизмеримы с ней. Это относится и к иммерсионной схеме (рис. 1) пропитки древесины, использующей низкие ультразвуковые частоты (18-20 кГц), длины волн которых в воде составляют единицы сантиметров. Поэтому в экспериментальной ванне создается совместное поле прямых и отраженных от ограничивающих поверхностей, в том числе и от пропитываемой заготовки, волн, т.е. интерференционное поле. Это поле очень неоднородно по пространству, степень его диффузности мала. Рассчитать такое поле крайне непросто. По данным работы [9], скалярные характеристики среды (акустическое давление и температура) находятся алгебраическим суммированием их величин в каждой точке поля. Для векторных характеристик (колебательная скорость частиц среды) требуется суммирование векторное. Для нахождения интенсивности звука следует учитывать, что это величина, квадратично зависящая от давления в этой точке поля. Средняя интенсивность в точке поле равна сумме интенсивностей каждой из интерферирующих волн, поскольку фазы их случайны. Например, наличие интерференции продольных волн приведет к мелкомасштабным (по сравнению с длиной волны) градиентам величины плотности потока поглощенной мощности и потому к формированию мелкомасштабных вихрей акустических течений в отличие, например, от одновихревого течения в поле продольной бегущей волны.

Неоднородность по пространству вследствие интерференции звукового поля приведет к тому, что в случае кавитации пузырек, наряду с пульсациями, будет двигаться поступательно. Пузырьки с размером меньше резонансного пульсируют в фазе с давлением и мигрируют по направлению к пучностям давления. В противоположном случае, когда пузырек крупнее резонансного, он перемещается к узлам давления. Из-за этих перемещений образуются области с увеличенной концентрацией колеблющихся пузырьков. Это может быть предпосылкой для их взаимодействия и коагуляции.

Приведенные обстоятельства неизбежно являются причиной появления неоднородностей в качестве пропитки по поверхности обрабатываемой древесной заготовки. Конечно, избежать этого можно, перемещая заготовку по объему ванны, или перемешивая жидкость, или изменяя рабочую частоту ультразвукового преобразователя в течение времени пропитки. Однако эти меры усложняют установку, существенно затрудняют управление процессом пропитки. К недостаткам иммерсионной схемы следует отнести и большой расход

пропитывающего состава. Это, в свою очередь, потребует увеличения мощности ультразвукового генератора, чтобы создать необходимую для эффективного процесса пропитки плотность энергии.

При реализации схемы тонкого слоя инструмент – волновод ультразвукового преобразователя, работает в объеме жидкости, характерный размер которого меньше или много меньше длины акустической продольной волны в жидкости. Инструмент представляет собой осциллирующий преобразователь (диполь), размер торца которого также значительно меньше длины продольной акустической волны. Его рабочий конец приближен к обрабатываемой поверхности, чтобы создать около нее наибольшую колебательную скорость частиц жидкости. Такое соотношение длины волны и расстояний от излучателя-диполя приводит [9, 10], к отсутствию поля продольных упругих волн. В объеме жидкость ведет себя как несжимаемая. Ее частицы, при использовании в общем случае инструмента произвольной формы совершают продольно-поперечные колебания с частотой осцилляций. На рис. 5 показаны цифрами области в жидкости, отличающиеся своими колебательно-волновыми свойствами.

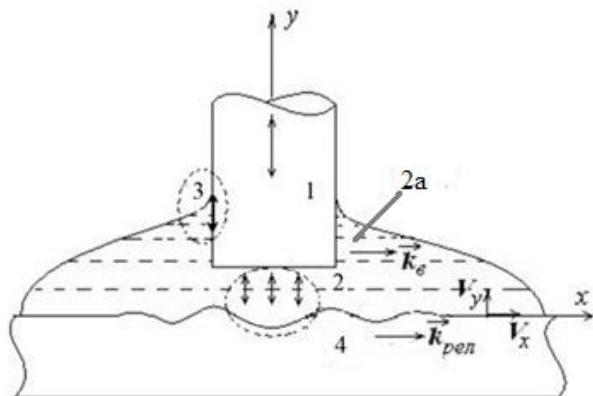


Рис. 5. Типичное расположение акустического инструмента и реагирующих фаз с указанием направлений колебаний их частиц при акустическом воздействии по схеме тонкого слоя. 1 – ультразвуковой инструмент, 2 – объем жидкой фазы, 3- область взаимодействия трех фаз, 4 – твердая фаза.

В работах [10, 11, 12] представлены результаты численного моделирования полей колебательных скоростей и давлений в областях жидкости, соответствующих рис. 5, возбужденных малым осциллирующим диполем диаметром d в вязкой несжимаемой жидкости ограниченного объема при выполнении условия прилипания. Моделирование проводили для следующих значений параметров: частота $f = 50$ Гц, (период колебаний $T=0,02$ с), $d = 8,7$ см, $A \ll d$, $A < \delta$, $\delta = 2.75$ мм, $\nu=1.1 \cdot 10^{-3}$ м²/с. A – амплитуда колебательного смещения диполя. Здесь $\delta=(2\nu/\pi f)^{0,5}$ – толщина пограничного слоя, h – толщина слоя жидкости, толщина зазора. Отношение h/δ изменяли в диапазоне 0,2 – 10 –

400, $h/d = 0,74 - 40$, Число Рейнольдса вязкой несжимаемой жидкости $Re = 0,63-630$. Подобные ситуации рассматривали в сходственных временных точках. Для моделирования использовали пакет Comsol Multiphysics 4.3. решения нестационарного нелинейного уравнения гидродинамики. Шаг сетки по пространству составлял $\leq \delta/10$. Максимальная погрешность численного счета скорости и давления – 3.5% (непосредственно в зазоре 0,03% по давлению и 0,05% по скорости). Шаг по времени – $T/200$.

Результаты моделирования показали следующее. Погруженная в жидкость боковая поверхность инструмента является источником гораздо более коротковолновой (по сравнению с длиной упругой продольной волны) вязкой волны. Вязкая волна – поперечная; ее волновой вектор направлен перпендикулярно колеблющейся плоскости (в нашем случае образующей цилиндрического волновода). Колебательные скорости частиц пропитывающей жидкости ориентированы параллельно образующей волновода (рис.5, области 2а и 3). Вязкие поперечные волны – это медленные волны. Они создают очень коротковолновое поле, могущее существовать в малом объеме жидкости. Например, в жидкости на поверхности твердой фазы. Использование ультразвуковых частот рабочего инструмента обусловлено желанием возбудить возможно более короткие длины вязких волн и имеющимся в наличии инструментарием.

Волновое поле в этой области жидкости хорошо изучено [11, 12, 13]. Характерный размер этой области составляет десятки и даже сотни длин вязких волн. Поэтому они распространяются как в свободном пространстве. Сильно затухая, вязкие волны вызывают акустические течения в жидкости. Акустические течения [14] являются мощным интенсификатором массо-теплообменных процессов в жидкости. Кроме этого, в работах [2, 10, 11] было показано, что на границе слоя жидкости, ультразвукового инструмента и газа (рис. 5 область 3) максимальна колебательная скорость в вязкой волне. Ее вектор направлен перпендикулярно мягкой границе. Поперечная вязкая волна вызывает в жидкой среде радиационные напряжения. При этом на границу раздела сред, например, мягкую границу жидкости с воздухом, будет действовать средняя по времени сила со стороны среды, где плотность кинетической энергии больше, т.е. из жидкости в газ. Появление этой силы изменяет баланс сил на контактной линии трех фаз и способствует смачиванию твердого тела жидкостью. Приведены эксперименты, показывающие, что время, необходимое для смачивания твердой поверхности составляет несколько периодов колебаний.

На рис. 6 показано поле вязких волн в зазоре между рабочим торцом ультразвукового инструмента (сферическим диполем) и поверхностью образца (неподвижной поверх-

ностью), соответствующем области 2 рис. 5. Черными стрелками показаны вектора колебательных скоростей. Цветными линиями изображены изолинии поля установившихся потенциальных течений.

Численный эксперимент показал, что в рассматриваемом зазоре в жидкости давление меняется по гармоническому закону в фазе со смещением диполя (рис. 7). Из рисунка следует, что абсолютные значения давлений сжатия и разрежения в зазоре в разы выше, чем в свободном пространстве. Видно также, что при увеличении толщины зазора h/δ влияние этого параметра на величину давления уменьшается и при достижении 400 прекращается.

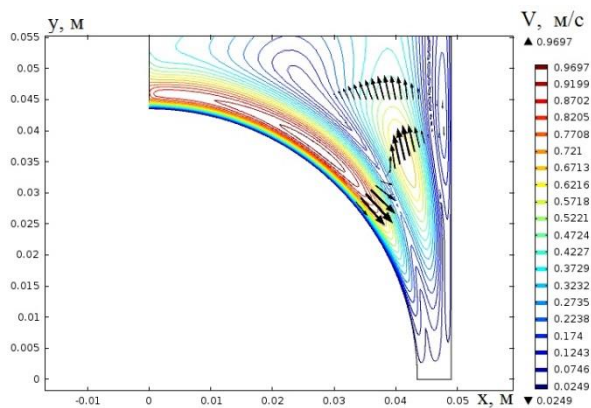


Рис. 6. Вязкая волна в зазоре между малым сферическим диполем и неподвижной стенкой в установившемся режиме: $h/\delta = 2$, $Re = 63$, $t = 49T + T/2$.

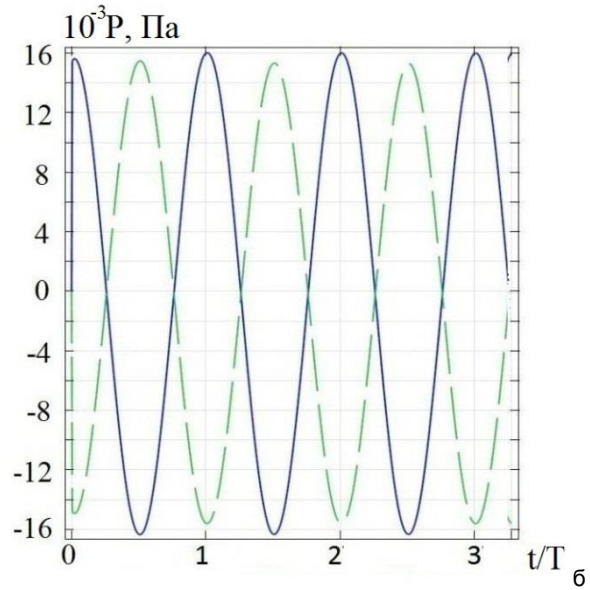
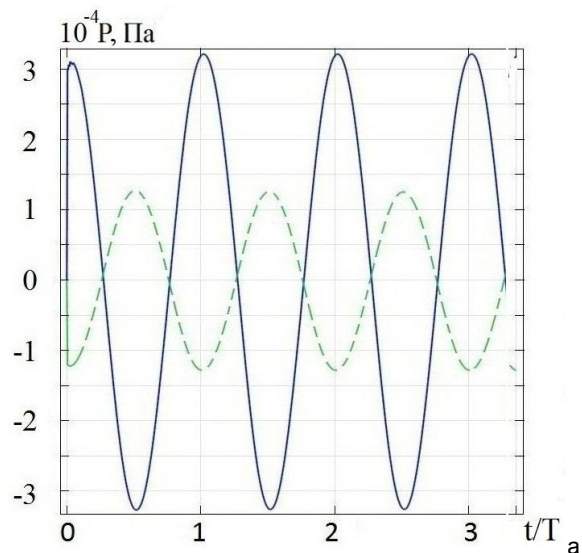


Рис.7. Изменение давления в зазоре между осциллирующим диполем и поверхностью от времени в периодах. Точка наблюдения расположена на расстоянии $0,1h/\delta$ от поверхности диполя: а) $Re = 63$, $h/d = 0,2$, $h/\delta = 6$; б) $Re = 63$, $h/d = 12,6$, $h/\delta = 400$.

Эти результаты по изменению давления в жидкости, заполняющей зазор, оказываются принципиальными для понимания механизма явления в технологической схеме тонкого слоя, используемой для пропитки древесины.

Процесс пропитки древесины обусловлен явлениями переноса жидкостей и газов в древесине из-за ее способности пропускать эти среды под действием избыточного давления. Эффективные способы пропитки древесины [15, 16] используют создание избыточного давления в направлении массопереноса. Рис. 7 демонстрирует появление избыточного давления сжатия весьма большой величины в течение полупериодов УЗК инструмента, соответствующих движению его к пропитываемой поверхности. На рис. 8 показано, как зависит абсолютная величина избыточного давления (сжатия и разрежения) от величины зазора между пропитываемой поверхностью и рабочим торцом инструмента.

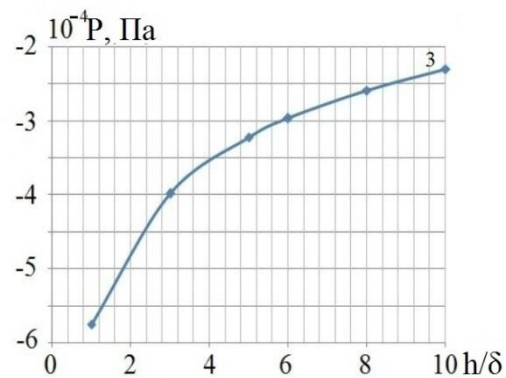


Рис. 8. Рассчитанные значения изменения давления в зазоре под инструментом в зависимости от его толщины при $Re = 63$, $d = 0,087$ м, $t = 4T$.

С другой стороны, в течение следующих полупериодов УЗК инструмента, соответствующих движению его от пропитываемой поверхности, наблюдаются значительные давления разрежения. Они могут превышать давление насыщенного пара для воды [17] при рабочей температуре 25-30 °С (4000 Па), являющейся основой антиперена (вещества, предохраняющего древесину от разрушающего действия огня). Это создает условия для возникновения гидродинамической кавитации [18] в тонких зазорах, а также при больших числах Рейнольдса.

Возникшие кавитационные полости в условиях тонкого слоя колеблются с ультразвуковой частотой инструмента и захлопываются с потерей устойчивости первоначально сферической формы [19, 20]. При этом могут образовываться кумулятивные струи жидкости, направленные к твердой поверхности, скорость которых близка к скорости захлопывания пузырька. Возникающие при этом давления имеют порядок величины давления при сжатии пузырька. Эти давления также могут внести свой вклад в интенсификацию процесса вынужденной диффузии.

Кроме того, именно колеблющиеся и схлопывающиеся кавитационные пузырьки выполняют основную работу по подготовке поверхности древесины к пропитке. Они очищают поверхность, способствуют выделению газа из шероховатостей.

Кавитация, возникающая в слое жидкости под ультразвуковым инструментом, играет существенную роль в ультразвуковом капиллярном эффекте, заставляющем жидкость продвигаться по тонким капиллярам [21, 22]. Известно, что нелинейные вязкие волны, возбуждающие нелинейные волновые движения стенок капилляра, вызывают среднее направленное вдоль трубы движение вязкой жидкости в отсутствие градиента давления. Скорость среднего массопереноса жидкости вдоль трубы при негармоничности в волновых поперечных составляющих на несколько порядков превышает скорость среднего массопереноса при негармоничности в продольной составляющей при прочих равных условиях. Этот эффект многократно усиливается при возникновении кавитации на срезе капилляра. Подобные явления и приводят к эффективной торцевой пропитке древесины.

Заключение

Экспериментальные исследования акустической пропитки образцов из березы и осины показали, что упругие продольные и вязкие поперечные волны интенсифицируют процесс пропитки: увеличивается поверхностная масса, ускоряется процесс пропитки, большая масса антиперена закрепляется на поверхности. Сравнительный анализ схем акустического

воздействия показал преимущества схемы тонкого слоя относительно иммерсионной: ускорение процесса пропитки в разы, возможность пропитки плотной древесины (уплотненная береза). Численное исследование модели тонкого слоя позволило разработать физическую модель ультразвуковой пропитки капиллярно-пористых твердых тел, и определить роль нелинейных акустических эффектов – течений, кавитации. Рассмотрены технические особенности реализации пропитки по схеме тонкого слоя и приведены основные технологические параметры процесса; показаны пути выбора их применительно к конкретной паре древесина – антипирен.

Литература

1. Прохоренко П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. Минск: Наука и техника, 1987. – 271 с.
2. Красавина М.А., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация электрофизической керамики. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2013. – 183 с.
3. Центр ультразвуковых технологий. Аппараты ультразвуковые. Каталог продукции. Бийск, 2017. – 72 с.
4. Патент 2218273 Российская Федерация. Способ пропитки заготовок из древесины. [Текст] / Легуша Ф.Ф., Попов Н.М., Пугачев С.И., Семенова Н.Г., Ан Сун Тэ. Опубликовано 10.12.2003. Бюл. №34.
5. Патент 2074088 Российская Федерация. Огнебиозащитный состав для обработки древесины [Текст]. / Иванова Т.А., Кошевой П.И., Грекова Н.А. Опубликовано 27.02.97. Бюл. № 6.
6. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
7. Колосовская Е.А., Лоскутов С.Р., Чудинов Б.С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. – Новосибирск: Наука, 1989. – 213 с.
8. Гоманай М.В. Технология переработки древесины. М.: МГУЛ, 2002. – 232 с.
9. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 495 с.
10. Пугачев С.И., Павловский А.С., Рытов Е.Ю., Семенова Н.Г. Новые представления о физическом механизме ультразвуковой металлизации по схеме тонкого слоя. // Морские интеллектуальные технологии, Т. 2, № 2 (24), 2014. – С. 79-86.
11. Павловский А.С., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Роль вязких волн в технологических процессах по схеме тонкого слоя (на примере ультразвуковой металлизации материалов). // Ученые записки физического факультета МГУ. 2014, вып. 5, С. 145338.
12. Павловский А.С., Семенова Н.Г. Свойства вязких плоских и цилиндрических одномерных волн в свободном пространстве и в зазорах. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2014, вып.5, с. 145307.
13. Павловский А.С., Семенова Н.Г. Исследование свойств одномерных плоских и цилиндрических вязких волн в задачах с различными граничными условиями. // ЖТФ, 2015, Т. 85, вып. 3. – С. 28-33.
14. Павловский А.С., Семенова Н.Г. Акустогидродинамические явления вблизи малого акустического диполя, работающего в вязкой несжимаемой жидкости в широком диапазоне чисел Рейнольдса. // Письма в ЖТФ, 2014, Т. 40, вып. 8. – С. 14-22.
15. Булгаков В.И. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса пропитки и прокраски древесины в звуковом поле. Автореф. дис. М.: МПИ. 1981 г.
16. Патент 2378106. Российская Федерация. Способ пропитки древесины. [Текст]. / Шамаев В.А., Трубников Н.А., Анучин А.И., Никулина Н.С., Ткачев С.С. Опубликовано 10.01.2010 Бюл. №1.
17. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 10. / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономарёвой – СПб.: Иван Фёдоров, 2003. – С. 29.
18. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Судостроение, 1966. – 439 с.
19. Красавина М.А., Кувшинов Г.И., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. К выбору зазора инструмент – образец при ультразвуковой металлизации. // Физика и химия обработки материалов, 1996, № 4. – С. 100-107.
20. Дежунов Н.В., Кувшинов В.И. и др. Несферическое захлопывание кавитационного пузырька между двумя твердыми стенками. // Акустический журнал., 1980, Т. 26, № 5. – С. 695-699.
21. Прохоренко П.П., Дежунов Н.В., Коновалов Е.Г. Ультразвуковой капиллярный эффект. – Минск: Наука и техника, 1981. – 136 с.
22. Бруй Е.А., Семенова Н.Г. Массоперенос в вязкой сжимаемой жидкости в узкой трубе, вызванный нелинейными волнами по стенке. Сб. докладов XXV научной сессии РАО. М.: ГЕЛИОС, 2012. – С. 169-172.

References

1. Prokhorenko P.P., Pugachev S.I., Semenova N.G. Ultrasonic material metallization. Minsk: Science and Technics, 1987. 271 p.
2. Krasavina M.A., Pugachev S.I., Semenova N.G. Ultrasonic metallization of electrophysical ceramics. Saint Petersburg: Publishing House of SpbPU, 2013. 183 p.
3. Center of Ultrasound Technologies. Ultrasonic units. Catalogue of products. Biisk, 2017. 72 p.
4. Patent No 2218273 of the Russian Federation. Method for wood workpiece impregnation. [Text]. Legusha, F.F., Popov N.M., Pugachev S.I., Semenova N.G., An Sun Te. Published on 10.12.2003. Bulletin No 34.
5. Patent No 2074088 of the Russian Federation. Fire bioprotective mixture for wood treatment [Text]. Ivanova T.A., Koshevoy P.I., Grekova N.A. Published on 27.02.97. Bulletin No 6.
6. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Wood handbook. M.: Forest industry, 1989. 296 p.
7. Kolosovskaya E.A., Loskutov S.R., Chudinov B.S. Physical principles of interaction between wood and water. Novosibirsk: Science, 1989. 213 p.
8. Gomanay M.V. Technology of wood processing. M.: MGUL, 2002. 232 p.
9. Isakovich M.A. General acoustics. M.: Science, 1973. 495 p.

10. Pugachev S.I., Pavlovsky A.S., Rytov E.Yu., Semenova N.G. New conceptions on physical mechanism of ultrasonic metallization using thin layer mode. *Marine intellectual technologies*, vol. 2, No 2(24), 2014. P. 79-86.
11. Pavlovsky A.S., Pugachev S.I., Semenova N.G. Role of viscous waves in technological processes using the thin layer mode (by example of ultrasonic material metallization). *Academic Proceedings of Physical Faculty of the Moscow State University*, 2014, issue 5, P. 145338.
12. Pavlovsky A.S., Semenova N.G. Properties of viscous plane and cylindrical one-dimensional waves in the free space and in gaps. *Academic Proceedings of Physical Faculty of the Moscow State University*, 2014, issue 5, P. 145307.
13. Pavlovsky A.S., Semenova N.G. Study of properties of one-dimensional plane and cylindrical viscous waves in problems with different boundary conditions. *Journal of Technical Physics*, 2015, Vol. 85, issue 3, P. 28-33.
14. Pavlovsky A.S., Semenova N.G. Acoustic hydrodynamic phenomena near a small acoustic dipole operation in a viscous incompressible liquid in a wide Reynolds number range. *Letters to Journal of Technical Physics*, 2014, Vol. 40, issue 8, P. 14-22.
15. Bulgakov V.I. Experimental and theoretical study of wood impregnation and painting process in the sonic field. Abstract of the thesis. M.: MLI, 1981.
16. Patent No 2378106 of the Russian Federation. Method for wood impregnation. [Text]. Shamaev V.A., Trubnikov N.A., Anuchin A.I., Nikulina N.S., Tkachev S.S. Published on 10.01.2010. Bulletin No 1.
17. Brief handbook of physical and chemical values. Ed. 10 Editors Ravdel A.A. and Ponomareva A.M. Saint Petersburg: Ivan Fedorov, 2003. P. 29.
18. Pernik A.D. Problems of cavitation. L.: Shipbuilding, 1966. 439 p.
19. Krasavina M.A., Kuvshinov G.I., Pugachev S.I., Semenova N.G. On selection of a clearance tool –specimen in ultrasonic metallization. *Physics and Chemistry of Material Treatment*, 1996, No 4, P. 100-107.
20. Dezhkunov N.V., Kuvshinov V.I. et al. Non-spherical cavitation bubble collapse between two solid walls. *Acoustic Journal*, 1980, Vol. 26, No 5, P. 695-699.
21. Prokhorenko P.P., Dezhkunov N.V., Konovalov E.G. Ultrasonic capillary effect. Minsk: Science and Technics, 1981. 136 p.
22. Brui E.A., Semenova N.G. Mass transfer in viscous compressible liquid in a narrow pipe caused by nonlinear waves on the wall. *Collected reports of the XXV Scientific Session of the Russian Academy of Education*. M.: HELIOS, 2012. P. 169-172.

УДК 629.5.017

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСЧЕРПАНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОРПУСАМИ МОРСКИХ СУДОВ

Москаленко Михаил Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры Теории и устройства судна
Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: asmsh@rambler.ru

Друзь Иван Борисович

доктор технических наук, профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов
Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: druz_i_b@mail.ru

Аннотация

Серьезные аварии связанные с переломом корпуса морских судов, становятся в последние годы актуальной проблемой для мирового судоходства. Причем, аварии происходят как на судах имеющих значительный срок эксплуатации, так и на относительно новых судах имеющих класс классификационных обществ членов МАКО. С развитием в международных морских перевозках линейной логистической «схемы по экономии издержек на эффекте масштаба» размеры судов и их вместимость постоянно увеличиваются. Корпуса судов становятся относительно более гибкими, с большим количеством прерывистых связей в составе перекрытий. Это в первую очередь связано с размерной перестройкой проектов и формальной оптимизацией водоизмещения по дедвейту за счет применения комбинированных систем набора без должного количества переходных элементов в продольных связях. В результате чего, корпуса современных морских судов стали относительно легче, новые суда не имеют в составе корпуса достаточных запасов уровня конструктивной безопасности, что при недооценке рисков резкого роста неравномерности между силами веса и поддержания по длине, способно привести к статическому излому даже при стоянке судна на тихой воде под грузовыми операциями. Отсутствие единообразного подхода к назначению стандартов общей продольной прочности (Международной конвенцией о грузовой марке 1966г. разрешено каждому классификационному обществу устанавливать свой стандарт прочности) потребовало от МАКО принятие новых общих правил (стандартов) по проектированию судов, что по мнению разработчиков, должно значительно повысить уровень конструктивной безопасности.

В статье изложены принципиальные выводы о конструктивной безопасности по результатам анализа тяжелых аварий морских судов, в том числе связанных с переломом корпуса.

Ключевые слова: судно, общая продольная прочность корпуса, конструктивная безопасность, перелом

SOME METHODOLOGICAL FINDINGS OF THE STRUCTURAL SAFETY ANALYSIS EXHAUSTION HULLS BEARING CAPACITY BY MARINE VESSELS

Mikhail A. Moskalenko

doctor of technical sciences, professor chair of the ship theory and arrangement
Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
Verhneportovaya 50a, St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: asmsh@rambler.ru

Ivan B. Druz

Doctor of technical sciences, professor chair of the theoretical mechanics&resistivity of materials
Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
Verhneportovaya 50a St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: druz_i_b@mail.ru

Abstract

A serious accident associated with fracture of the hulls of sea vessels have in recent years become an urgent problem for global shipping. Moreover, accidents occur on vessels having considerable lifetime, and relatively new vessels with a class of the classification societies IACS members.

With the development in international Maritime transport linear logistic schemes "saving of costs on the economies of scale", the size of the ships and their capacity are constantly increasing. Ship hulls are relatively more flexible, with a large number of broken links in the structure of the overlaps (this is primarily due to dimensional restructuring projects and formal optimization of tonnage by deadweight) due to the use of combined systems of a set without a proper amount of transition elements in a longitudinal plates. As a result, the hull of modern ships have become relatively easier, the new vessels does not have in the body adequate inventory level of the structural safety that the underestimation of the risks of a sharp rise in non-uniformity between the forces of weight and maintain for long, can lead to static fracture even when the berthing of a vessel in calm water under the cargo operations. The lack of a uniform approach to the appointment standards general longitudinal strength (the International Convention on load lines of 1966 allowed each classification society to establish your standard strength) demanded IACS the adoption of the new rules (standards) for design of the ships, according to developers, should significantly increase the level of structural safety.

The article presents the fundamental conclusions about of structural safety, according to the analysis of serious accidents with marine vessels, and associated with a fracture of the hull.

Key words: ship, overall longitudinal strength of the hull, structural safety, fracture.

Любое торговое судно следует рассматривать, как средство повышенной опасности с «неэкономической ответственностью», прежде чем проводить оптимизацию веса корпуса при проектировании поперечного сечения. Аварии такого объекта, как правило, приводят к серьезным последствиям связанным с загрязнением окружающей среды и непоправимым ущербом для экологии при разливах нефтепродуктов. С развитием судостроительной науки и внедрением новых технологий проектирования и постройки корпусов судов аварии, тем не менее, не перестали происходить, а напротив случаются с завидной регулярностью. По данным Ллойда на первом месте в качестве причин гибели судов стоит нарушение целостности и водонепроницаемости корпуса [1].

Основным видом повреждений связей корпуса судна продолжают оставаться трещины как хрупкого так и усталостно-хрупкого характера. Причем сами повреждения происходят при относительно низких уровнях действующих напряжений до 50% от предела текучести материала и положительных температурах окружающей среды.

Аварии судов с исчерпанием корпусами своей несущей способности и последующим переломом по схеме «статического излома» стали актуальными с самого начала развития цельносварного судостроения, как, например, было типично для серийных стандартных судов типа п/х «Либерти».

Японский специалист в области прочности судов Накаи Цунэо, изучавший в 1965 году случаи повреждений корпусов цельносварных судов,

указывал, что к апрелю 1946 года разрушения наблюдались более чем у 1000 судов построенных в США, 25 судов имели значительные разрушения палубы и наружной обшивки. Причиной разрушения Накаи Цунэо считал неправильную технологию сварки.

Аварии, как правило, происходили во время балластных переходов, на волнении и в холодное время года [2]. Согласно имеющимся данным Ховарда за десять лет (1943–1953гг.) на судах длиной более 100м наблюдалось 1450 случаев разрывов корпуса или переломов. Из них 231 аварию можно классифицировать как серьезную и связанную с опасностью перелома. В 19 случаях перелом произошел фактически как прогнозировалось. В 1943 году в северной Атлантике во время шторма переломился и затонул либерти п/х «Томас Хукер», у берегов Исландии п/х «Дж. Л.М. Карри», еще 2 судна переломились в Тихом океане. Переломилось и Советское судно п/х «Валерий Чкалов». Американской стороной было передано, в замен другое судно с одноименным названием, но и оно переломилось в Охотском море в 1951 году. Подобные аварии случились с п/х «Брянск» и п/х «Херсон». Тяжелые аварии с разрывами палуб и корпуса получали и другие либерти. Анализ аварийных случаев и проведенные научные исследования позволили сделать выводы о конструктивных недостатках проекта и недостаточных знаниях о концентрации напряжений в прерывистых связях цельносварных судов. Уменьшение уровня концентрации напряжений в конструкциях и углах люковых вырезов путем подкреплений принесли в дальнейшем положительные результаты.

Тем не менее, переломы корпусов судов продолжают происходить практически регулярно. Аварии навалочников «Ономичи-Мару», «Derbyshire» в 1980 году и танкера «Находка» в 1997 году (с экономическим ущербом экологии побережья Японии более 200 млн дол. США) закончились гибелью этих судов с истощением корпусом своей несущей способности, после перелома, в результате резкого увеличения волнового изгибающего момента при плавании на попутной волне. По схожей схеме в 2003 году переломились и затонули т/х «Славутич 7» и т/х «Славутич 16», т/х «Стрелец» (типа «Волжский»). Перелом в районе м. Херсонес в 2007 году т/х «Наj Ismail» произошел при плавании на 5 метровой попутной волне. Там же при посадке на мель переломился т/х «Вера Волошина» (типа «Сормовский»). Аналогична и недавняя катастрофа 19 апреля 2017 г. с переломом корпуса на 5 метровой волне т/х «Герои Арсенала» (типа «Волго-Балт») с грузом зерна. Достаточно много аварий произошло при перевозке тяжелых нефтепродуктов с танкерами типа «Волгонефть». Так в 2007 г. переломился корпус м/т «Волгонефть 139» в Керченском проливе, м/т «Волгонефть 123» был на грани разрушения корпуса, палуба и подпалубный набор потеряли устойчивость плоской формы изгиба с образованием поперечной трещины. От полного перелома спасло только то обстоятельство, что танкер находился в состоянии прогиба корпуса и днищевое перекрытие выдержало изгибающий момент. Можно говорить, что суда типа река-море имеют значительный возраст превышающий 30 лет, но полигон числа повреждений корпусных конструкций для судов различных возрастных групп, показывает пик повреждаемости корпуса только к середине срока службы судна [3] (см. рис. 1). При этом, наибольший процент повреждений составляют трещины, что зависит в основном от условий плавания и внутренних свойств конструкции. Образование трещин практически не зависит от возраста судна и не связано с коррозионным износом связей корпуса, что подтверждается испытаниями образцов вырезанных из палубы и борта судов после 30 лет эксплуатации [4].

Как правило, переломам корпусов судов предшествует образование протяженных поперечных трещин в растянутых пластинах палубы, что связано с повышенными уровнями эффективных коэффициентов концентрации напряжений в районах окончания прерывистых связей, при плавании на попутном волнении. В этой связи, в одинаково опасном состоянии могут находиться, как суда значительных размеров, так и суда с относительно малыми соотношениями по главным размерениям. В работе [5] описаны такие опасные повреждения, как протяженные трещины хрупкого характера в средней части корпуса, в

пластинах палубного стрингера и ширстречного пояса морских сухогрузов 1986 г постройки неограниченного района плавания с малой расчетной длиной 77,9 м. В феврале 2005 г. при плавании на попутной 4 х метровой волне переломился даже СТР «Кафор», после образования поперечной трещины в районе машинного отделения.

Аварии корпусов судов река-море типа «Волгонефть», по нашему мнению, заслуживают особого внимания, так как на данном типе судов впервые была применена однокритериальная оптимизация коэффициента утилизации веса корпуса, за счет применения высокопрочных судостроительных сталей с уменьшением толщин обшивки палубы и борта, 2 го дна и продольного набора. При этом шпация в 660 мм оставалась относительно большой при малой высоте 2 го дна 800/1000 мм, что отличалось от правил морского Регистра. Для оптимизации также была применена комбинированная система набора с большим количеством прерывистых связей в поперечных сечениях оконечностей. Последствия от такой модернизации в морских условиях проявились уже в первые 10 лет эксплуатации. На всех судах этого типа развивались опасные повреждения палубного перекрытия и каждое второе судно находилось в состоянии «предразрушения» корпуса, с фибровой текучестью в крайних связях эквивалентного бруса [6]. Аналогичные ошибки проектирования, по нашему мнению, как не странно, оказались заложенными в конструкции поперечного сечения многих современных морских судов.

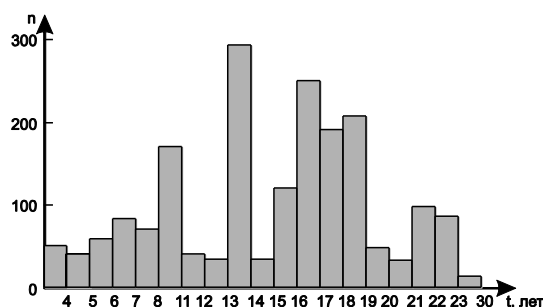


Рис. 1. Полигон числа n повреждений в зависимости от возраста корпусов судов t . [3]

К примеру, сюда можно отнести и нашумевшие экологические катастрофы, связанные с переломом корпусов танкеров м/т «Эрика» (1999 г.) и м/т «Престиж» (2002 г.). Перед специалистами была поставлена задача - обеспечить «конструктивную безопасность» судов как систем с «неэкономической ответственностью». Это требование вызвало соответствующую политическую реакцию со стороны ИМО и ЕС, связанную с

выводом из эксплуатации однокорпусных танкеров до конца 2015г.

На сегодняшний день с ростом мировой торговли постройка мега-корпусов, контейнеровозов, танкеров и навалочников, приняла настоящий бум. Так называемый «эффект масштаба» стал применяться в логистических схемах международных перевозок грузов морем повсеместно, как инструмент конкуренции, с целью получения большей экономии издержек на единицу перевозимого груза в отсутствие расширения рынка грузоотправителями. Сегодня в перевозках появляются суда длиной 488м. как например м/т «Prelude Fling», в 2015 г. был спущен на воду контейнеровоз «CSCL Globe2» и «Maersk Triple E» длиной 400м. на 18,000 TEU. Введены в эксплуатацию навалочники типа «Malaccamax» дедевейтом 300,000мт. и длиной 470м, супертанкера типа «VLCC» дедевейтом также 300,000мт. В апреле 2017 г. построен мега контейнеровоз «MOL Triumph» длиной 400м. и вместимостью 20150 TEU (ожидается сдача еще 5 судов данной серии). В мае 2017г. спущен на воду контейнеровоз «OOCL HONG KONG» вместимостью уже 21,413 TEU. Оптимизация веса корпуса похоже достигла своего предела и поперечное сечение должно работать в режиме полной утилизации материала продольных связей, что делает его максимально чувствительным к отказу по типу «слабого звена». Корпуса таких судов относительно гибкие. Нами были проанализированы отношения расчетной длины к высоте борта для судов различных типов «классических» ($L < 200m.$) и «мега размерений» ($200m. < L < 500m.$). Относительная жесткость последних оказалась в среднем на 28–32 % ниже чем у «классической» группы судов. Поэтому, крайние связи эквивалентного бруса корпусов судов «мега размерений» начинают при определенных условиях эксплуатации (неравномерности нагрузки по длине судна) работать уже в упруго-пластической области, например при неправильной эксплуатации в штормовых условиях, плавании на попутной волне или неправильной последовательности погрузочно-разгрузочных операций, что на порядок повышает риски истощения уровней конструктивной безопасности (как обобщенного запаса внутренних свойств конструкции).

Характерными примерами в этом смысле являются последние аварии контейнеровозов. Так в 2007 году произошел перелом корпуса в районе машинного отделения т/х «MSC Napoli» («пост-панамакс» на 4,734 TEU). Экспертный анализ, фактических обстоятельств перелома корпуса и уровня предельных нагрузок показал, что судно испытывало перегиб перед разрушением и первые трещины образовались в обшивке палубы и ширстречного пояса, в районе прерывистых связей палубы, при резком уменьшении площади поперечного сечения в районе монтажного

стыкового шва в нос от переборки машинного отделения (см. рис. 2).



Рис. 2. м/в «MSC Napoli»



Рис. 3 м/в «RENA»

Далее корпус, при выводе из работы эквивалентного бруса стенки и разделения бруса на 2 составляющие, в условиях перегиба переломился по типу «статического излома» в районе днищевое перекрытия. Устойчивость связей была достаточной в плоть до разрушения, деформация связей корпуса происходила по типу «плоского изгиба» без видимой потери устойчивости связей борта. Отдел расследования морских происшествий Великобритании по результатам расследования аварии [7] потребовал произвести подкрепление корпусов судов аналогичного проекта. Всего было подкреплено 52 судна, 10 судов были модернизированы, для 8 судов были введены ограничительные меры по загрузке. В октябре 2011г. в результате столкновения т/х «RENA» с подводным рифом у берегов Новой Зеландии, в результате воздействия волн, в бортовой обшивке и палубе образовались гигантские хрупкие трещины, что в последствие привело к перелому корпуса судна (см. рис. 3). Опасные повреждения были выявлены уже в

2013 году на контейнеровозе «MSC Monterey» («пост-панамакс» на 4,860 TEU) что потребовало его срочного вывода из эксплуатации. В главной палубе судна в районе надстройки образовалась трещина длиной около 1,5 м., которая при перегибе судна начала распространяться на борт в район ширстречного пояса и возникла реальная угроза перелома судна. Наиболее серьезной из аварий остается перелом в 2013 году «мега-контейнеровоза» т/х «MOL Comfort» 316м длиной (на 8,000 TEU). Здесь трещина образовалась вначале ниже ватерлинии в борту, ближе к средней части корпуса, по 6 ому отсеку (см. рис. 4). Далее, при перегибе на волне трещина распространилась по обшивке борта вверх вплоть до ширстречного пояса, после потери устойчивости пластин ширстречного пояса палуба и днищевое перекрытие исчерпали свою несущую способность.

В результате кораблекрушения было потеряно около 77 % всех утерянных в море контейнеров за 2013 г.



Рис. 4. m/v «MOL Comfort»

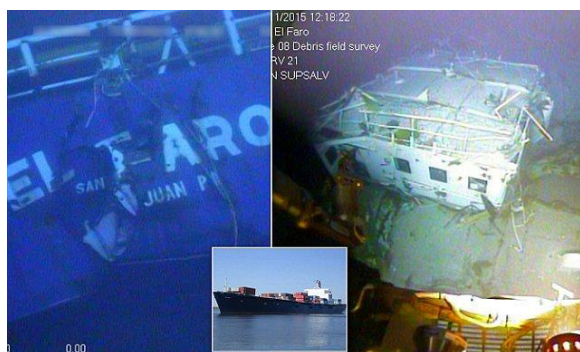


Рис. 5. m/v «El Faro»

Последовавшее расследование не выявило конструктивных недостатков судна. По результатам расследования в середине декабря 2013 г. совет международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) принял новые правила по конструкции нефтеналивных танкеров, балкеров и

судов класса «Post-Panamax». А 11 декабря 2014 г. МАКО приняло общие правила структурной безопасности для сухогрузных судов и нефтеналивных танкеров которые вступили в силу с 1 июня 2015 г. Были приняты унифицированные требования к прочности корпусов контейнеровозов, которые вступили в силу с 1 июля 2016 г. Была принята резолюция ИМО по обязательному взвешиванию (или декларированию веса) контейнеров перед погрузкой на судно. Тем не менее, переломы корпусов судов происходят с завидной регулярностью. В октябре 2015г. с грузом контейнеров переломился и затонул во время шторма ролкер «El Faro» 241м. длиной (см. рис. 5). Крушение судна принесло ущерб порядка 43 % от всех контейнеров потерянных в море за 2015 г. В марте 2016 г. переломился при посадке на мель относительно небольшой фидерный контейнеровоз «TS Taipei» (на 1,579 TEU) (см. рис. 6).



Рис. 6. m/v «TS Taipei»

Пока опыта эксплуатации судов, построенных по новым правилам, не существует, а в судоходную отрасль еще длительное время будет поступать значительное количество судов заказанных до введения новых правил. Введение новых стандартов прочности, при росте объемов морской торговли, не способно серьезно повлиять на заказы судов увеличенной вместимости с еще большими размерами корпусов. Уже заказаны суда вместимостью более 23,000 TEU. Поэтому, проблемы оценки обеспечения достаточного для эксплуатации уровня конструктивной безопасности будут постоянно стоять достаточно остро.

Кроме того, на практике следует учитывать и то обстоятельство, что с позиции судовладельца любое судно следует рассматривать как «инструмент для получения прибыли» и следовательно ни один судовладелец не откажется от прибыли в пользу перевозок необоснованно увеличенных запасов прочности, за счет увеличения массы корпуса и соответствующего уменьшения дедвейта.

Со своей стороны классификационные общества вынуждены снижать коэффициент запаса прочности, по мере развития судостроительной науки и необходимости привлечения под свой надзор потенциальных судовладельцев.

Современные мега-суда построенные с целью экономии издержек на масштабе размеров остаются и будут оставаться относительно «гибкими», с риском потерять несущую способность корпуса даже у причала при неправильном порядке выполнения грузовых работ (с ростом изгибающего момента в поперечном сечении за счет резкой неравномерности между силами веса и поддержания по длине судна) даже при наличии или отсутствии двухкорпусной конструкции. Надежды мирового сообщества на контроль «конструктивной безопасности» со стороны государства порта согласно резолюции ИМО А.787(19), по нашему мнению, не оправдывают, себя, так как конструктивная безопасность относится к пассивной (или скрытой) составляющей безопасности и может быть достаточно эффективно проконтролирована только во время освидетельствования подводной части и танков 2 го дна корпуса судна в доке.

Разумеется, введение единых стандартов прочности МАКО при проектировании и контроле судов является значительным прогрессом в области обеспечения конструктивной безопасности.

В этой связи наибольший интерес представляет стандарт S11A [8] общей продольной прочности для контейнеровозов с расчетной длиной корпуса равной или более 90 м. В стандарте используется теория предельного равновесия. В предельном состоянии эквивалентного бруса существенную роль играют перерезывающие силы, для оценки влияния которых используется условие текучести Мизеса и обобщенное суперэллиптическое уравнение предельной кривой с коэффициентами степени для широкополых балок. Коэффициенты запаса назначаются в форме уровней утилизации материала корпуса, а близость сечения к предельному состоянию оценивается по линейному критерию остаточной несущей способности (предложенному еще В.А. Курдюмовым в 1956 г.). Редуцирование связей рекомендовано производить общеизвестными способами.

Анализ стандарта показывает, что все находящиеся в эксплуатации конвенционные морские суда с легкостью подпадают под его требования без модернизации (по крайней мере до середины срока службы, когда поперечное сечение не имеет еще значительного уровня общего износа).

Выводы

1. Переломы корпусов судов практически не зависят от возраста судна.

Переломы могут происходить как на относительно длинных, так и коротких судах, при этом на момент перелома уровень внешних нагрузок не превосходит предельный для продольных связей вплоть до образования первых трещин. Это свидетельствует о

том, что материал в составе конструкции обладает значительно меньшими запасами пластичности и ударной вязкости чем в образцах, что связано со сложным напряженным состоянием при истощении конструкциями своей несущей способностью.

Данное обстоятельство необходимо учитывать при назначении уровней коэффициента использования материала, с целью исключения рисков переоценки свойств материала при оптимизации площади поперечного сечения корпуса судна (в частности при применении стандартов прочности МАКО).

2. Переломы корпусов судов типа река-море и судов построенных на класс морского регистра могут существенно различаться с точки зрения картины разрушения. Суда класса река-море обладая в несколько раз меньшей, чем морские суда, изгибной жесткостью корпуса, как правило исчерпывают свой уровень конструктивной безопасности при исключении из работы поперечного сечения, при общем продольном изгибе корпуса, связей теряющих устойчивость плоской формы изгиба. Следствием чего является дальнейшее пластическое членение эквивалентного бруса при отдельной работе широкополых поясков и перелом корпуса, который может произойти как при прогибе, так и при перегибе.

Морские суда как правило получают перелом корпуса при перегибе в условиях растяжения пластин палубы. При этом образование трещин и разрыв поперечного сечения всегда наступает раньше, чем продольные связи успевают потерять устойчивость, и форма изгиба остается плоской вплоть до разрушения стенки эквивалентного бруса. По нашему мнению, это свидетельствует о неправильном распределении материала по высоте поперечного сечения и смещению нейтральной оси ближе к днищевой полке, что программирует увеличение напряжений изгиба в связях палубы и рост эффективного коэффициента концентрации напряжений в районах установки прерывистых связей, что при приращении волнового изгибающего момента способно спровоцировать появление хрупких трещин и статический излом корпуса судна даже в сечениях где не действует наибольший изгибающий момент.

3. Современные суда за счет «экономии масштаба» при однокритериальной оптимизации поперечного сечения с минимизацией веса корпуса использующие для целей оптимизации, по формальным признакам, высокопрочные судостроительные стали и прерывистые связи, без учета их влияния на работу конструкции в целом, и уровень концентрации напряжений в отдельных поперечных сечениях по длине корпуса судна, могут получить поперечные трещины хрупкого характера в судовых пластинах по типу малоциклового усталости. Работа корпуса в упругопластической области при резком увеличении изгибающего момента в поперечном сечении, за счет сложения даже нескольких незначительных факторов увеличивающих неравномерность между силами веса и поддержания по длине судна, способна привести к истощению корпусом своей несущей способности по типу «статического излома», даже в сечениях вне средней

части со значительным уровнем концентрации напряжений в особых точках, способных спровоцировать образование начальных трещин в крайних связях эквивалентного бруса и разрушение корпуса по типу «слабого звена». Поэтому к проектированию прерывистых связей следует подходить с большой осторожностью назначая адекватные реальной работе связи коэффициенты редуцирования. Всегда следует предусматривать переходные продольные связи в комбинированных системах набора.

4. На современных судах значительных размеров, за счет сложных грузовых планов, изогнутая ось может менять свой знак (даже несколько раз при значительной длине корпуса судна). Часть продольных связей при этом не будет воспринимать изгибающий момент и за счет изменении знака изогнутой оси перейдет в состояние сжатия. При резком приращении волнового изгибающего момента, с учетом исключения из работы части продольных связей, возможно такое

явление (ранее никогда не наблюдавшееся на судах традиционных размерений) как возникновение «градиента жесткости» в поперечном сечении, резкого смещения нейтральной оси, и как следствие, мгновенного разрушения конструкции по типу слабого звена, за счет локального перенапряжения в крайнем пояске эквивалентного бруса. По нашему мнению данное явление нуждается в дополнительном изучении и учете при проектировании поперечного сечения судов с расчетной длиной более 200м.

5. С целью эффективного контроля уровня конструктивной безопасности для судов в эксплуатации, следует по нашему мнению дополнить стандарты прочности МАКО критериями максимально допустимой кривизны изогнутой оси корпуса, как комплексного критерия опасного состояния. Кривизну легко можно рассчитать замерив осадки судна при различных вариантах реальной загрузки.

Литература

1. Кацман, Ф. М. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства. // Ф. М. Кацман, А. А. Ершов. Транспорт Российской Федерации-СПБ. № 5, 2006 г. – С. 82–84
2. Булович О. Суда типа «Либерти» в истории флота. // Порты Украины, № 10(112) 2011 г. – С. 1–4
3. Москаленко, М. А. Основы обеспечения конструктивной безопасности морских судов. // М. А. Москаленко, – Владивосток: Дальнаука, 2005. –162 с.
4. Козляков, В. В. и др. Усталостные испытания образцов корродированной стали // В. В. Козляков, и др. Труды ЦНИИМФ. 1973. Вып. 169. – С. 99–102.
5. Горетый, О. А. Расчеты прочности и разработка рекомендаций по эксплуатации судна с широким раскрытием палубы // О. А. Горетый, В. А. Компанец, О. Э. Суров, Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 46/47. – С. 38–45
6. Егоров, Г. В. Риск переломов и надежность корпусов судов внутреннего плавания // Г. В. Егоров. Труды НТК по строительной механике корабля памяти акад. Ю. А. Шиманского – Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2001 – С. 31–32.
7. The Maritime Executive, January 18, 2017 (UK).
8. S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ships // URL:iacs.org.uk/media/3112/ur-S11a.pdf. (дата обращения 08.11.2017).

References

1. Katsman, F. M., Ershov A. A. *Avariinost' morskogo flota i problemy bezopasnosti sudokhodstva*, Transport Rossiiskoi Federatsii, SPB, No. 5, 2006, pp. 82–84
2. Bulovich O. *Suda tipa «Liberti» v istorii flota*, Porty Ukrainy, No. 10(112) 2011, pp. 1–4
3. Moskalenko, M. A. *Osnovy obespecheniya konstruktivnoi bezopasnosti morskikh sudov*, Vladivostok, Dal'nauka, 2005, 162 p.
4. Kozlyakov, V. V. *Ustalostnye ispytaniya obraztsov korrodirovannoi stali*, Trudy TsNIIMF, 1973, ed. 169, pp. 99–102.
5. Goretyi, O. A., Kompanets V. A., Surov O. E. *Raschety prochnosti i razrabotka rekomendatsii po ekspluatatsii sudna s shirokim raskrytiem paluby*, Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva, 2017, No. 46/47, pp. 38–45
6. Egorov, G. V. *Risk perelomov i nadezhnost' korpusov sudov vnutrennego plavaniya*, Trudy NTK po stroitel'ni mekhaniki korablya pamyati akad. Yu. A. Shimanskogo, St. Petersburg, TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2001, pp. 31–32.
7. *The Maritime Executive*, January 18, 2017 (UK).
8. *S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ships*, URL:iacs.org.uk/media/3112/ur-S11a.pdf (accessed 08.11.2017).

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

УДК 004.942

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ «BIRTH AND
DEATH» ДЛЯ ТРЕХ ТИПОВ ДЕФОРМАЦИИ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ****Ренев Сергей Андреевич**

аспирант кафедры детали машин
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская
e-mail: chevrole59@mail.ru

Шелофаст Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры детали машин
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская
e-mail: com@apm.ru

Аннотация

В работе рассматривается решение задач прочности и трещиностойкости методом конечных элементов с использованием модифицированной функции «Birth and Death». Для анализа прочности применяются инструменты линейной упругой механики разрушения и сопротивления материалов. Рассматривается хрупкое и квазихрупкое состояние материалов. Актуальность работы обусловлена следующими факторами: несовершенством математического аппарата для решения квазистатических задач линейной упругой механики разрушения; отсутствием инструментов для решения задач прочности и трещиностойкости в российских CAE-системах; большими издержками производства, связанными с проведением натуральных испытаний. В работе представлен математический аппарат для решения задач прочности и трещиностойкости в квазистатической постановке. Результаты, полученные методом конечных элементов с использованием модифицированной функции «Birth and Death» были сопоставлены с результатами натуральных испытаний. Положительные результаты верификации подтверждают работоспособность модифицированной функции «Birth and Death», что позволяет использовать ее для решения задач прочности и трещиностойкости.

Ключевые слова: трещиностойкость, трещина, CAE-система, метод конечных элементов, хрупкий, квазихрупкий, квазистатический.

**THE METHOD OF SOLVING THE PROBLEMS OF STRENGTH AND
FRACTURE TOUGHNESS USING THE MODIFIED FUNCTION "BIRTH AND
DEATH" FOR THREE MODES OF DEFORMATION AT THE TIP OF A CRACK****Sergej A. Renev**

postgraduate student of chair for machine elements,
Bauman Moscow State Technical University
Baumanskaya 2-ya, Moscow 105005, Russian Federation
e-mail: chevrole59@mail.ru

Vladimir V. Shelofast

Doctor of Engineering Science, Professor of chair for machine elements,
Bauman Moscow State Technical University
Baumanskaya 2-ya, Moscow 105005, Russian Federation
e-mail: com@apm.ru

Abstract

In this paper we consider the solution of the problems of strength and fracture toughness by the finite element method using the modified "Birth and Death" functions. For analysis of the strength we use tools of the linear elastic fracture mechanics and material resistance. Brittle and quasi-brittle materials state are considered. The actuality of work is caused by the following factors: imperfection of the mathematical apparatus for solving quasi-static problems of linear elastic fracture mechanics; lack of tools for solving the problems of strength and fracture toughness in

Russian CAE-systems; high production costs associated with conducting full-scale tests. In this paper we present a mathematical apparatus for solving the problems of strength and fracture toughness in a quasi-static formulation. The results obtained by the finite element method using the modified "Birth and Death" function were compared with the results of full-scale tests. Positive results of verification confirm the working capacity of the modified functions "Birth and Death", which allows using it for solving the problems of strength and fracture toughness.

Key words: fracture toughness. crack, CAE-system, finite element method, brittle, quasi-brittle, quasi-static.

Введение

Линейная упругая механика разрушения (ЛУМР) совместно с инструментами сопротивления материалов широко используется для анализа конструкции на прочность и трещиностойкость. Они позволяют:

- проектировать безопасные элементы конструкций;
- дать оценку трещиностойкости конструкции с трещиной;
- определить какие размеры трещины являются критическими для заданной нагрузки;
- выявить какая нагрузка является критической для текущих размеров трещины.

В данной работе представлен обновленный вариант модифицированной функций "Birth and Death" позволяющий одновременно учитывать все три типа деформаций у вершины трещины [1] (рис.1). Модифицированная функций "Birth and Death" уже рассматривалась в [2], где область ее применения ограничивается трещиной 1-го типа (Рис.1. а).

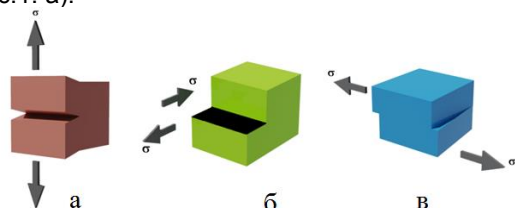


Рис. 1. Типы трещин а) трещина отрыва, б) трещина поперечного сдвига, в) трещина продольного сдвига

Модифицированная функция "Birth and Death" используется для решения задач прочности и трещиностойкости в квазистатической постановке с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Квазистатическая задача - это задача, где на каждой итераций решается статическая задача. Для получения адекватных результатов учитываются история предыдущих итерации. Данный подход позволяет моделировать процесс зарождения и распространения трещин в КЭ-модели.

Содержание работы состоит из четырех этапов. На первом этапе рассматриваются инструменты сопротивления материалов. Они используются для оценки прочности конструкций на первой итераций. На втором этапе рассматриваются инструменты ЛУМР. Данные инструменты используются для оценки трещиностойкости конструкции с трещиной. Третий этап посвящен модифицированной функций "Birth and Death". Рассматриваются принципы ее работы. На четвертом этапе, для подтверждения работоспособности модифицированной функций "Birth and Death", была

проведена верификация, целью которой было сравнение результатов, полученных МКЭ, с натурными.

1. Инструменты сопротивления материалов

На первом этапе анализа конструкции на прочность используются инструменты сопротивления материалов. На данном этапе можно рассматривать конструкцию как с трещиной, так и без. Выявить наличие трещины можно одним из методов диагностики образования и развития трещин, пример для пластин показан в работе [3]. Используются следующие критерии прочности [4]:

- теория Мора (пятая теория прочности);

$$S_{solve(V)} = S_1 - \frac{\sigma_+}{\sigma_-} S_3 \tag{1}$$

где S_1, S_3 - главные напряжения (МПа), σ_+ - предел прочности на растяжение (МПа), σ_- - предел прочности на сжатие (МПа).

- максимального касательного напряжения (третья теория прочности);

$$\tau_{solve(III)} = \frac{S_1 - S_3}{2} \tag{2}$$

- теория формоизменения (четвертая теория прочности).

$$S_{solve(IV)} = \sqrt{\frac{1}{2}((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_1 - S_3)^2)} \tag{3}$$

Выбранные теории охватывают хрупкое и пластичное (в частности квазихрупкое) состояние материала, широко используются и хорошо согласуются с экспериментальными данными [4].

Условие прочности запишется в следующем виде [4]:

$$S_{solve(V)} < S_{critical} \tag{4}$$

$$\tau_{solve(III)} < \tau_{critical} \tag{5}$$

$$S_{solve(IV)} < S_{critical} \tag{6}$$

где $S_{critical}$ - предел прочности на растяжение (МПа), $\tau_{critical}$ - предел текучести на сдвиг (МПа).

2. Инструменты линейной упругой механики разрушения

ЛУМР используется для анализа конструкции с трещиной на трещиностойкость. Результаты анализа покажут, будет дальнейшее развитие трещины при текущих условиях нагружения или же трещина остановиться и данную конструкцию можно считать безопасной.

В данной работе для анализа состояния материала у вершины/фронта трещины используются следующие критерии ЛУМР [5]:

- Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) (K_I, K_{II}, K_{III});
- Интенсивность выделения энергии (G_I, G_{II}, G_{III}).

Следует отметить, что применение перечисленных критериев разрушения ЛУМР оправдано в следующих случаях [6]:

- зона пластичности у вершины трещины не превышает 20% длины трещины;
- относительное удлинение образца после разрыва $\delta(\%)$ не превышает 20%;
- разрушающее напряжение в нетто-сечении образца не превышает 0.8 предела текучести материала, определенного на гладких образцах.

Один из параметров ЛУМР, отвечающий за дальнейшее развитие трещины, именуется как критический КИН. ГОСТ 25.506-85 предусматривает экспериментальное определение данного параметра только для трещины I-го типа (K_{IC}). Для некоторых материалов и сплавов критическое значение КИН содержится в зарубежной литературе и в электронной базе данных материалов Total Materia. Но, нахождение K_{IC} экспериментальным путем экономически невыгодно, а найденные значения относятся только к трещинам I-го типа, поэтому, альтернативным решением является вычисление условного критического значения КИН аналитическим путем [7]: Данный подход позволяет вычислить условное критическое значение КИН не только для трещин I-го типа, но также II-го и III-го типов:

$$K_{ICsolve} \cong 0.65\sigma_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (7)$$

$$K_{IICsolve} \cong 0.65\tau_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (8)$$

$$K_{IIICsolve} \cong 0.65\tau_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (9)$$

где σ_{yield} - предел текучести при растяжении (для хрупких - условный) (МПа), τ_{yield} - предел текучести по сдвигу (МПа), $area$ - поверхность трещины в плоскости $x - y$ (mm^2) (Рис.2).

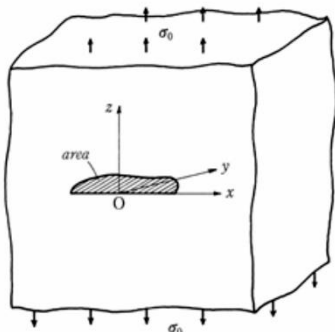


Рис. 2. Плоскость $x - y$ в произвольной трещине

Такой параметр ЛУМР, как критическое значение интенсивности выделения энергии, характеризует удельную (эффективную) работу разрушения, которую необходимо затратить на

образования новой поверхности единичной площади у вершины/фронта трещины. Данный параметр вычисляется следующим образом [8]:

$$G_C = \frac{1 - \mu^2}{E} (K_{ICsolve}^2 + K_{IIICsolve}^2) + \frac{1 - \mu}{E} K_{IIICsolve}^2 \quad (10)$$

где μ - коэффициент Пуассона, E - модуль упругости (МПа).

Путем вычисления (7), (8), (9) с последующей подстановкой в (10), мы получим количество энергии, необходимое для роста трещины площадью раскрытия равным параметру $area$.

Текущее количество энергии у вершины/фронта трещины находится с помощью теории формоизменения, адаптированной для применения в МКЭ:

$$U_C = \pi \left(\frac{1 + \mu}{6E} ((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_1 - S_3)^2) * V \right) / area \quad (11)$$

где V - суммарный объем КЭ у узла вершины трещины; $area$ - площадь поверхности раскрытия трещины. Коэффициент π используется для учета неоднородности материала и поля напряжений у вершины трещины.

Площадь поверхности раскрытия трещины определяется путем пересечения плоскости раскрытия трещины с ребрами КЭ. На рис. 3 показан пример определения площади поверхности раскрытия трещины для 4-х узлового КЭ в виде тетраэдра.

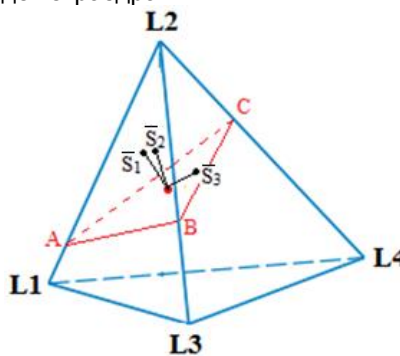


Рис. 3. Определение площади на примере 4-х узлового КЭ в форме тетраэдра ($area = S_{ABC}$, где S_{ABC} - площадь треугольника ABC)

Плоскость раскрытия трещины строится по двум векторам главных напряжений (\bar{S}_2 и \bar{S}_3) в узле вершины трещины.

Представленные формулы (7), (8), (9), (10), (11) и (12) используются на каждой итерации квазистатической задачи. Количество итерации может быть ограничено пользователем. Если такое ограничение отсутствует, то трещина будет расти до тех пор, пока выполняется условие (12) или конструкция не будет разрушена полностью.

$$\frac{U_c}{G_c} \geq 1 \tag{12}$$

На каждой итераций, при выполнении условия (12), будет происходить полное разрушение КЭ. Если условие (12) не выполняется, то КЭ будет разрушен частично и рост трещины прекратится.

3. Модифицированная функция «Birth and Death»

В САЕ-системах ANSYS и NASTRAN для решения задач прочности и трещиностойкости используется функция «Birth and Death». Если в узле КЭ напряжения и деформации превышают критическое значение, то данный элемент деактивируется (получает статус "Death") путем умножения его локальной матрицы жесткости на резко сокращающийся фактор (ESTIF). По умолчанию этот фактор имеет значение 1.0E-6. Напряжения и деформации в КЭ становятся равными нулю. Недостатком стандартной функций «Birth and Death» является отсутствие чувствительности к типу трещин.

Модифицированный вариант функций «Birth and Death» позволяет учитывать все три типа трещин. При этом параметр ESTIF не является постоянной величиной. Его значение определяется для каждого типа трещины отдельно. Каждый отдельный элемент локальной матрицы жесткости КЭ, отвечающий за перемещения в узле (вдоль осей X,Y,Z), умножается на характерный для этого перемещения параметр ESTIF. Данный подход позволяет повысить качество моделирования процессов разрушения.

3. Верификация

3.1 Образец №1

3.1.1 Натурные испытания

Натурные испытания на прочность при растяжении Образец №1 были проведены в МКБ «Факел» им. Грушина московской области. Образец №1 изготовлен из алюминиевого сплава В96Ц3. Данный материал является квазихрупким ($\delta=8\%$)[9]. На Рис. 4 показаны образцы после испытания.



Рис. 4. Опытные образцы после испытания

3.1.2 Численные испытания

Численные испытания на прочность при растяжении были выполнены в Structure3D. КЭ-

модель Образец №1 показана на Рис. 5. Тип нагружения - давление на объемные элементы $P = 13.5$ МПа. Тип закрепления - шарнирно-неподвижная опора.

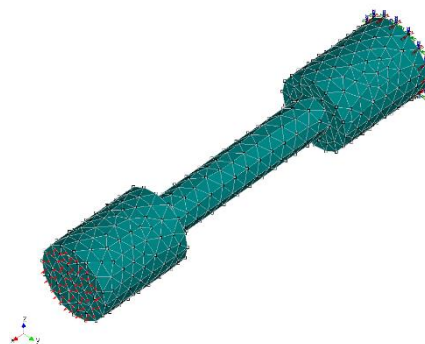


Рис. 5. КЭ - модель Образец №1

Карта результатов квазистатического расчета на первой итераций показана на Рисунок 6. Карта отображает результаты суммарного напряженного состояния по критерию Мизеса с усреднением в узлах. Максимальное напряжение $\sigma_{SVM} = 57,42$ МПа.

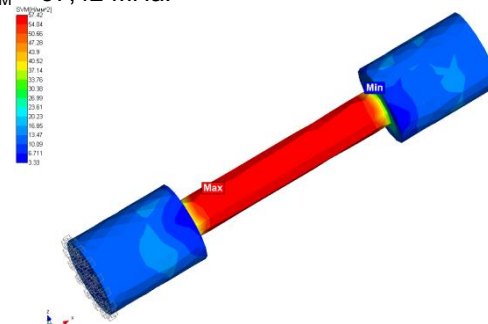


Рис. 6. Карта результатов суммарных напряжений по критерию Мизеса

В Табл. 1 показаны значения по каждой из теории прочности для первой итераций квазистатического расчета в Structure3D.

Таблица 1

Результаты по каждой из теории прочности

Теория прочности	Пятая	Третья	Четвертая
Напряжения, полученные в Structure3D (МПа)	56.93	28.46	56.76
Критические напряжения (МПа)	58,67	-	55
Условие (4), (5) или (6) выполняется?	Нет	Нет	Да

Вывод: условие (6) выполняется для (3), трещина зарождается.

Результат работы модифицированной функций "Birth and Death" показан на Рис. 7. КЭ, для которых было выполнено условие (12) имеют статус "Death".

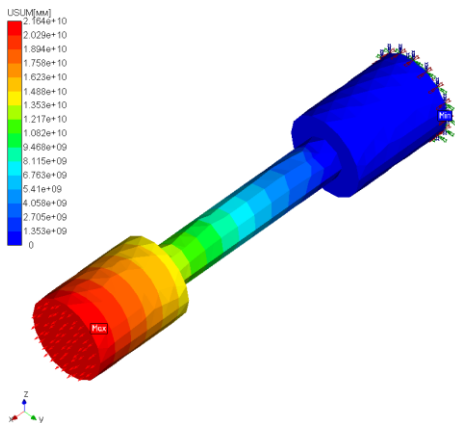


Рис. 7. Карта результатов суммарных перемещений после разрушения Образец №1

3.2 Образец №2

3.2.1 Натурные испытания

Натурные испытания на прочность при кручении Образец №2 были проведены в лабораторном корпусе кафедры РК5 по ГОСТ 3565-80. Образец №2 изготовлен из чугуна марки СЧ20. Данный материал является хрупким ($\delta < 5\%$)[10]. На Рис. 8 показан Образец №2 после испытаний.



Рис. 8. Опытный образец после испытаний

3.2.2 Численные испытания

Численные испытания на прочность при кручении были выполнены в Structure3D. КЭ - модель Образец №2 представлена на Рис. 9. Тип нагружения - крутящий момент $M_{кр} = 48.75$ Нм. Тип закрепления - шарнирно-неподвижная опора.

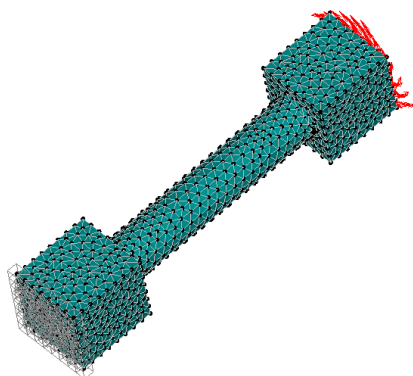


Рис. 9. КЭ - модель Образец №2

Карта результатов квазистатического расчета на первой итерации показана на Рис. 10. Карта отображает результаты суммарного напряженного состояния по критерию Мизеса с усреднением в узлах. Максимальное напряжение

$\sigma_{SVM} = 350,4$ МПа. Данное напряжение сосредоточено в области резкого изменения формы геометрии образца - в концентраторе напряжений.

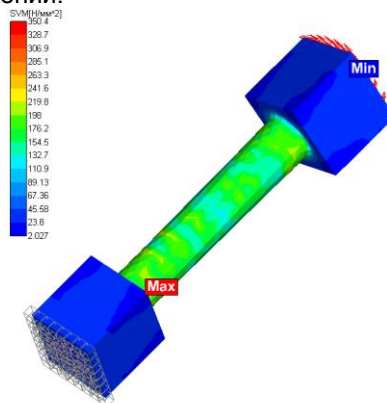


Рис. 10. Карта результатов суммарных напряжений по критерию Мизеса

В Табл. 2 показаны значения по каждой из теории прочности для первой итераций квазистатического расчета в Structure3D.

Таблица 2

Результаты по каждой из теории прочности

Теория прочности	Пятая	Третья	Четвертая
Напряжения, полученные в Structure3D (МПа)	195.40	146.62	254.03
Критические напряжения (МПа)	200	255	200
Условие (4), (5) или (6) выполняется?	Нет	Нет	Да

Вывод: условие (6) выполняется для (3), трещина зарождается.

Результат работы модифицированной функций "Birth and Death" показан на Рис. 11. КЭ, для которых было выполнено условие (12) имеют статус "Death".

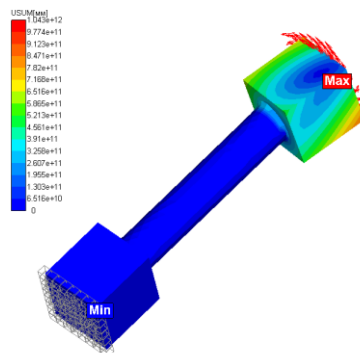


Рис. 11. Карта результатов суммарных перемещений после разрушения Образец №2

3.3 Образец №3

3.3.1 Натурные испытания

Натурные испытания на прочность при трехточечном изгибе Образец №3 были проведены в лабораторном корпусе кафедры РК5 по ГОСТ 25.506-85. Образец №3 изготовлен из чугуна марки СЧ15. Данный материал является хрупким ($\delta < 5\%$)[10]. На Рис. 12 показан Образец №3 после испытаний.



Рис. 12. Опытный образец изделия

3.3.2 Численные испытания

Численные испытания на прочность при трехточечном изгибе были выполнены в Structure3D. КЭ - модель Образец №3 представлена на Рис. 13. Тип нагружения - трехточечный изгиб с сосредоточенной силой $F = 2210$ Н. Тип закрепления - шарнирно-неподвижная опора.

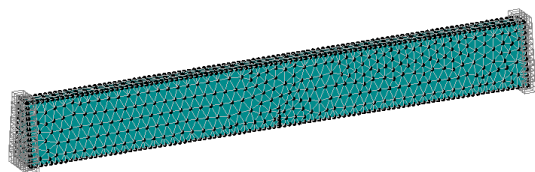


Рис. 13. КЭ - модель Образец №3

Карта результатов квазистатического расчета на первой итерации показана на Рис. 14. Карта отображает результаты суммарного напряженного состояния по критерию Мизеса с усреднением в узлах. Максимальное напряжение $\sigma_{SVM} = 314,3$ МПа. Данное напряжение сосредоточено в вершине трещины.

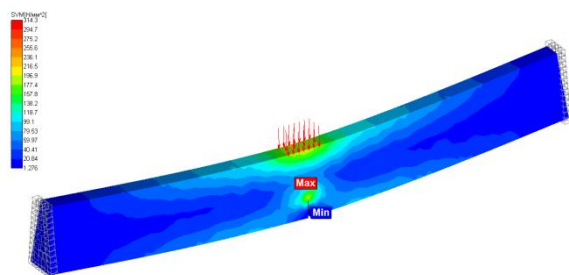


Рис. 14. Карта результатов суммарных напряжений по критерию Мизеса в Structure3D

В Табл. 3 показаны значения по каждой из теории прочности для первой итерации квазистатического расчета в Structure3D.

Таблица 3

Результаты по каждой из теории прочности

Теория прочности	Пятая	Третья	Четвертая
Напряжения, полученные в Structure3D (МПа)	173.68	79.55	137.81
Критические напряжения (МПа)	150	191.25	150
Условие (4), (5) или (6) выполняется?	Да	Нет	Нет

Вывод: условие (4) выполняется для (1), трещина продолжает развиваться.

Результат работы модифицированной функций "Birth and Death" показан на Рис. 15, для которых было выполнено условие (12) имеют статус "Death".

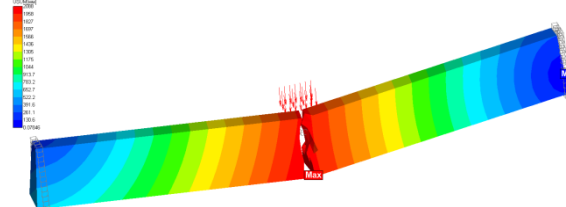


Рис. 15. Карта результатов суммарных перемещений после разрушения Образец №3

Заключение

В заключение следует отметить, что представленная в работе новая модификация функций "Birth and Death" позиционируется как один из методов решения задач прочности и трещиностойкости в МКЭ. Основным преимуществом данного метода является отсутствие необходимости локального перестроения сетки на каждой итерации, что существенно увеличивает скорость расчета и гарантирует сходимость решения.

Использование модифицированной функций в САЕ-системе позволит:

- Проектировать безопасные элементы конструкций;
- Проводить анализ на трещиностойкость конструкций с уже имеющимися дефектами в виде трещин;
- Сократить издержки производства, связанные с проведением натурных испытаний;
- Снизить зависимость от аналогичных импортных САЕ-систем.

В будущем планируется реализовать метод XFEM, который используется в таких мировых САЕ-системах как ANSYS и Abaqus. Достоинством метода XFEM является то, что он позволяет более точно спрогнозировать рост трещин. Данный метод не использует ослабление КЭ, а добавляет вспомогательные виртуальные узлы.

Литература

1. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. Изд. 3-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 256 с.
2. Renev S.A. The Method of Solving the Problems of Strength and Fracture Toughness in CAE-System Using the Modified Functions" Birth and Death"// Procedia Engineering
3. Андриенко Л.А., Брыкин К.И. Экспериментальное исследование развития усталостной трещины в прямоугольной пластине. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып.10(70)
4. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов: Учеб. для вузов. - 10-е изд. Том 2, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. 592 с.
5. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
6. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. Изд.3-е. М.: Издательство ЛКИ, 2010. 240 с.
7. Renev S.A., Prokopov V.S. Method of Analytical Calculation of Critical Stress Intensity Factor and its Application in CAE System // Indian Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 10(3) P.1-9.
8. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения: Пер. с японск. М.: Мир, 1986. 334 с.
9. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы: справочник. Под общей редакцией академика РАН И.Н.Фридляндера. К.: "КОМИНТЕХ", 2005. 365 с.
10. Шерман А.Д. Чугун: справочник. М.: Metallurgija, 1991. 575 с.

References

1. Renev S.A. The Method of Solving the Problems of Strength and Fracture Toughness in CAE-System Using the Modified Functions" Birth and Death"// Procedia Engineering
2. Renev S.A., Prokopov V.S. Method of Analytical Calculation of Critical Stress Intensity Factor and its Application in CAE System // Indian Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 10(3) P.1-9.
3. Andrienko L.A., Brykin K.I. Jeksperimental'noe issledovanie razvitija ustalostnoj treshhiny v prjamougol'noj plastine. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii, 2017, vyp.10(70)
4. Morozov E.M., Nikishkov G.P. Metod konechnyh jelementov v mehanike razrushenija. Izd. 3-e. М.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2010. 256 s.
5. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov: Ucheb. dlja vuzov. - 10-e izd. Том 2, pererab. i dop. М.: Izd-vo MGTU im. N.Je.Baumana, 1999. 592 с.
6. Broek D. Osnovy mehaniki razrushenija. М.: Vysshaja shkola, 1980. 368 s.
7. Parton V.Z. Mehanika razrushenija: Ot teorii k praktike. Izd.3-e. М.: Izdatel'stvo LKI, 2010. 240 s.
8. Siraatori M., Miesi T., Macusita H. Vychislitel'naja mehanika razrushenija: Per. s japonsk. М.:Mir, 1986. 334 s.
9. Beleckij V.M., Krivov G.A. Aljuminievye splavy:spravochnik. Pod obshhej redakciej akademika RAN I.N.Fridljandera. K.: "KOMINTEH", 2005. 365 s.
10. Sherman A.D. Chugun:spravochnik. М.: Metallurgija, 1991. 575 s.

УДК 656.61.052

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИВОДА АЭРОРУЛЯ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Андрей Геннадьевич Богданов

Заместитель директора закрытого акционерного общества
Центральный научно-исследовательский институт судового машиностроения
192029, Санкт-Петербург, ул.Дудко, д.3,
Тел. (812)6401-51, Факс: (812)640-10-52, E-mail: sudmash@sudmash.ru

Валерий Юрьевич Каминский

кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13
тел.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13
тел. 8(812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

Виктор Игоревич Черненко

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д.3
тел.: (812) 388-53-85, e-mail: chernenko@mtu.ru

Аннотация

Расчёт энергетических характеристик исполнительного привода аэроруля СВП по существующим методикам приводит к существенному завышению его мощности и, как следствие, к возможности заклинивания аэроруля на максимальном угле перекладки. Учёт подобной ситуации требует обеспечения дополнительных мер, предусматривающих ограничение перекладки руля системой управления и гидравлическими предохранительными клапанами.

Эксплуатация привода, рассчитанного по предлагаемой в статье методике, позволит исключить подобные инциденты, т.к., во-первых, при приближении к максимальному углу перекладки привод будет иметь незначительную скорость и, во-вторых, момент его стоянки немногим больше максимального момента при нагрузке. В этом случае исполнительный привод большую часть времени будет работать с максимальной эффективностью, обеспечивая перекладку аэроруля во всех режимах движения.

Расчёты показали, что энергетические характеристики исполнительного привода, удовлетворяют главному требованию к работе системы управления движением судна на воздушной подушке - обеспечению требуемого качества его стабилизации.

Ключевые слова: СВП, аэроруль, исполнительный привод, курс, мощность, перекладка, энергетические характеристики.

THE SELECTION OF KEY ENERGY CHARACTERISTICS OF THE EXECUTIVE DRIVE AIR WHEEL THE HOVERCRAFT

Andrey G. Bogdanov

Deputy Director of the closed joint-stock company
Central scientific research Institute of marine engineering
192029, Saint-Petersburg, street Dudko, d. 3,
phone: (812) 640-10-52, e-mail: sudmash@sudmash.ru

Valery Y. Kaminsky

Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Laboratory,

Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13
phone.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Dmitriy A. Skorokhodov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher Officer,
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13
phone: 8(812) 323-29-54, e-mail: skorohodda@mail.ru

Viktor I. Chernenko

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief of department,
Saint-Petersburg state marine technical University (SPbSMTU)
190008, St. Petersburg, Pilot St., 3
tel: (812) 388-53-85, e-mail: chernenko@mtu.ru

Abstract

The calculation of the energy characteristics of the actuator air wheel hovercraft according to the existing methods leads to a significant overestimation of its power and, as a consequence, the possibility of jamming air wheel at the maximum angle of the rudder. The light of such a situation requires the provision of additional measures for the limitation of the rudder control system and hydraulic relief valves.

Operation of the actuator calculated by the proposed method, will allow to exclude similar incidents because, firstly, when approaching the maximum angle of rudder actuator would have a slight speed and, secondly, the time it is parked slightly greater than the maximum torque under load. In this case, the actuator most of the time will work with maximum efficiency, providing relaying air wheel in all modes of motion.

The calculations showed that the energy characteristics of actuator satisfy the main requirement of the system control the movement of hovercraft - to ensure the required quality of stabilization.

Keywords: hovercraft, air wheel, executive drive, course, power, relining, power characteristics.

Введение

На судах на воздушной подушке (СВП) применяется электрогидравлический исполнительный привод (ИП) аэрорулей (АР). Обычно расчет его мощности производится исходя из максимальной нагрузки на валу, а так же скорости перекладки, обеспечивающей требуемое время перекладки с борта на борт СВП при маневрировании [1-9]. Как правило, при проектировании ИП даётся запас по максимальному моменту нагрузки в пределах 25% от его величины. Однако привод более 90% времени обеспечивает стабилизацию путевого или курсового угла СВП, при этом угол перекладки АР колеблется в пределах $\pm 5^\circ$, что составляет 17 % максимального значения. Назначенные по результатам традиционного проектирования характеристики исполнительного привода АР значительно превышают необходимые, что, в свою очередь, приводит к большому расходу рабочей жидкости, завышенным массогабаритным характеристикам ИП и увеличению вероятности заклинивания АР в крайнем положении.

Очевидно, актуальной проблемой становится расчёт характеристик исполнительного привода АР СВП, соответствующих реальным условиям эксплуатации, как в режиме стабилизации, так и в режиме маневрирования. С этой целью воспользуемся методом, разработанным в [10].

1. Определение моментов нагрузки на аэроруле

Уравнение моментов нагрузки на АР СВП можно представить следующим образом:

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_n - M_{BH}, \tag{1}$$

где: J – момент инерции АР с учетом присоединенных масс, (кг·м²); M_n – момент нагрузки на ИП, (н·м); M_{BH} – внешний аэродинамический момент АР, (н·м); δ - угол отклонения АР, (рад).

Преобразуем уравнение (1) с учётом особенностей работы АР СВП и получим выражение для момента нагрузки на валу ИП АР:

$$M_n(t) = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + M^\delta \frac{d\delta}{dt} + M^\alpha \delta \tag{2}$$

где: $M^\delta = C_m^\delta \frac{\rho V^2}{2} Sl$; $M^\alpha = C_\omega^\alpha \frac{\rho V^2}{2} Sl$;

ρ - массовая плотность воды, (кг·с²/м⁴); V – скорость движения судна, (м/с); l - плечо АР, (м); S – площадь АР (м²); C_m^δ - частная производная коэффициента момента по скорости

перемещения АР (с); $C_{ш}^{\alpha}$ – коэффициент шарнирного момента, являющийся функцией угла атаки α .

Запишем уравнение момента нагрузки в операторном виде:

$$M_n(p) = (Jp^2 + M^{\delta}p + M^{\alpha})\delta(p) \quad (3)$$

Выполним интерпретацию уравнения момента нагрузки. На объект с выходной координатой M_n и передаточной функцией $Jp^2 + M^{\delta}p + M^{\alpha}$ действует стационарное случайное внешнее возмущение $\delta(t)$. В этом случае вероятностные характеристики выходной координаты M_n определяются по известным правилам теории случайных функций:

$$S_{M_n}(\omega) = |W_{M_n}(j\omega)|^2 S_{\delta}(\omega), \quad (4)$$

где: $S_{M_n}(\omega)$ – спектральная плотность момента нагрузки; $S_{\delta}(\omega)$ – спектральная плотность угла отклонения АР; $|W_{M_n}(j\omega)|^2$ – квадрат модуля передаточной функции момента нагрузки.

Уравнение для дисперсий нагрузки будет иметь следующий вид:

$$D_{[M_n(t)]} = J^2 D_{[\delta(t)]} + \left[(M^{\delta})^2 - 2JM^{\alpha} \right] D_{[\delta(t)]} + (M^{\alpha})^2 D_{[\delta(t)]} \quad (5)$$

Тогда среднеквадратическое значение момента нагрузки запишется так:

$$\bar{M}_n(t) = \sqrt{J^2 D_{[\delta(t)]} + \left[(M^{\delta})^2 - 2JM^{\alpha} \right] D_{[\delta(t)]} + (M^{\alpha})^2 D_{[\delta(t)]}} \quad (6)$$

Сравнивая результаты, вычисленные по выражениям (6) и (2) при условии больших величин составляющих момента инерции, получим расхождение значений среднеквадратического момента нагрузки (6) и момента нагрузки (2).

Расчеты показали, что для органов управления СВП это расхождение несущественно, поэтому формулу (6) можно упростить:

$$\bar{M}_n(t) = \sqrt{J^2 D_{[\delta(t)]} - 2JM^{\alpha} D_{[\delta(t)]} + (M^{\alpha})^2 D_{\delta}} \quad (7)$$

В практике расчётов при незначительных величинах демпфирующего момента и момента инерции и можно воспользоваться упрощенным выражением для определения среднеквадратического момента нагрузки:

$$\bar{M}_n(t) = J\bar{\delta} + M^{\delta}\bar{\delta} + M^{\alpha}\bar{\delta}. \quad (8)$$

В подобных случаях для СВП необходимо учитывать не только режим стабилизации, но и режим маневрирования, который для случая циркуляции характеризуется перекадкой АР на максимальный угол δ_{pmax} . Перепишем выражение для момента нагрузки:

$$M_{HP}(t) = J \frac{d^2 \delta_p}{dt^2} + M^{\alpha} (\delta_{p0} + \delta_p) \quad (9)$$

Где: $\delta_{p0} = \delta_{pmax} - \delta_p$; δ_{pmax} – максимальный угол перекадки руля, равный 35° ; δ_p – среднеквадратическое значение угла перекадки АР, определяемое для режима стабилизации; δ_{p0} – постоянный угол перекадки руля, необходимый для обеспечения циркуляции судна.

2. Определение жёсткости механической характеристики

Уравнение механической характеристики исполнительного привода:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\delta_0}{dt} - \frac{1}{\beta} \left(J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + M^{\delta} \frac{d\delta}{dt} + M^{\alpha} \delta \right). \quad (10)$$

Применим преобразование Лапласа к уравнению (10):

$$p\delta = p\delta_0 - \frac{1}{\beta} (Jp^2\delta + M^{\delta}p\delta + M^{\alpha}\delta). \quad (11)$$

$$p\delta_0 = p\delta + \frac{1}{\beta} (Jp^2\delta + M^{\delta}p\delta + M^{\alpha}\delta). \quad (12)$$

В соответствии с уравнением (5) дисперсия скорости холостого хода будет определяться общим выражением:

$$D_{[\delta_0(t)]} = D_{[\delta(t)]} + \frac{1}{\beta} \left\{ J^2 D_{[\delta(t)]} + (M^\delta)^2 D_{[\delta(t)]} + (M^\alpha)^2 D_{[\delta(t)]} - 2JM^\alpha D_{[\delta(t)]} \right\}. \quad (13)$$

Запишем максимальную мощность привода с учётом выражения (6):

$$N_{\max} = \frac{1}{4} \beta \left\{ D_{[\delta(t)]} + \frac{J^2}{\beta} D_{[\delta(t)]} + \left[(M^\delta)^2 - 2JM^\alpha \right] D_{[\delta(t)]} + D_{[\delta(t)]} + (M^\alpha)^2 D_{[\delta(t)]} \right\}. \quad (14)$$

Оптимальная жесткость механической характеристики привода будет определяться зависимостью:

$$\beta = \sqrt{\frac{J^2 D_{[\delta(t)]} \cdot \left[(M^\delta)^2 - 2JM^\alpha \right] D_{[\delta(t)]} + (M^\alpha)^2 D_{[\delta(t)]}}{D_{[\delta(t)]}}}. \quad (15)$$

В предлагаемой методике расчет энергетических характеристик проводится для режима стабилизации и маневрирования.

По формуле (15) выполнены расчеты жесткости механической характеристики привода

Заключение

Методика выбора характеристики привода, предлагаемая в настоящей работе, позволяет получить экономичный исполнительный привод и существенно уменьшить его габариты или, при тех же габаритах, позволяет уменьшить давление рабочей жидкости в напорной магистрали привода. При этом максимально возможный расход жидкости уменьшается с 111 л/мин до 44,5 л/мин, средняя скорость перекадки АР с борта на борт составляет 15 град/с и обеспечивает требуемое качество маневрирования судна.

Кроме того, спроектированный по рассчитанным характеристикам привод позволяет исключить его заклинивание в крайнем положении, так как рулевая машина имеет большой запас по моменту нагрузки. Она рассчитана на максимальную мощность при нагрузке на баллере АР $M_n=2000$ кГм, при этом должна обеспечиваться скорость $\delta_p = 15$ град/с. Такой момент нагрузки возникает на баллере АР только при перекадке АР на борт ($\pm 30^\circ$). Для предотвращения аварии привода в подобной ситуации предусматривается ограничение перекадки руля системой

СВП, а по формуле (13) определена дисперсия скорости холостого хода.

В режиме стабилизации:

$$\beta_{pc} = 1185 \text{ кГм} \cdot \text{с};$$

$$D_{[\delta_{poc}(t)]} = 0,206 \frac{1}{\text{с}};$$

В режиме маневрирования:

$$\beta_{pm} = 4584 \text{ кГм} \cdot \text{с};$$

$$D_{[\delta_{pom}(t)]} = 0,206 \frac{1}{\text{с}}.$$

На основании вычисленных значений β и $D_{[\delta_{po}(t)]}$ в двух режимах определим максимальную потребляемую мощность привода.

Для режима стабилизации:

$$N_{\max c} = 0,51 \text{ кВт}, \text{ для режима маневрирования:}$$

$$N_{\max m} = 2,34 \text{ кВт}, \text{ т.е. мощность}$$

исполнительного привода, необходимая для обеспечения режима стабилизации в 4,6 раза меньше мощности, необходимой для обеспечения режима маневрирования. Расчет характеристик исполнительного привода АР должен проводиться для условий режима маневрирования.

управления и гидравлическими предохранительными клапанами.

Применение привода, выбранного по предлагаемой методике, позволит исключить указанную аварийную ситуацию, т.к., во-первых, при приближении к максимальному углу перекадки привод будет иметь незначительную скорость и, во-вторых, момент его стоянки немногим больше максимального момента нагрузки. В этом случае исполнительный привод большую часть времени будет работать с максимальным КПД, обеспечивая выполнения перекадки АР во всех режимах движения. Численный анализ показал, что энергетические характеристики исполнительного привода, выбранного по предлагаемой в настоящей статье методике, являются более приемлемыми, удовлетворяя при этом главному требованию к работе системы управления движением - обеспечению требуемого качества стабилизации СВП.

Литература

1. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V 6, Issue 2, June 2014, P. 323-332.
2. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V 7, Issue 2, March 2015, P. 364-374.
3. Rajmanovah, Beбето Sunle Raj, Jensin Joshua, Muthusamy, Air assisted directional control of a hovercraft, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, V 2, Issue 9, September 2014, P. 88-91.
4. M. Z. A. Rashid, M. S. M. Aras, M. A. Kassim, Z. Ibrahim, A. Jamali, Dynamic mathematical modeling and simulation study of small scale autonomous hovercraft, V 46, September 2012, P. 95-114.
5. Основы теории судов на воздушной подушке / Ю.Ю.Бенуа, В.К. Дьяченко, Б.А. Колызаев и др. Л.: Судостроение, 1970. 456 с.
6. Злобин Г.П. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке: (по материалам иностранной печати): Справ. пособие. Л.: Судостроение, 1976. 264 с.
7. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980. 472 с.
8. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. СПб.: Элмор, 2002. 360 с.
9. Макливи Рой. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке. Пер. с англ. Н.И. Слижевского. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
10. Каминский В.Ю., Лукомский Ю.А., Скороходов Д.А. Синтез оптимальных энергетических характеристик гидроприводов систем управления движением // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т. 1. № 2 (36). С. 30-34.

References

1. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V 6, Issue 2, June 2014, P. 323-332.
2. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V 7, Issue 2, March 2015, P. 364-374.
3. Rajmanovah, Beбето Sunle Raj, Jensin Joshua, Muthusamy, Air assisted directional control of a hovercraft, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, V 2, Issue 9, September 2014, P. 88-91.
4. M. Z. A. Rashid, M. S. M. Aras, M. A. Kassim, Z. Ibrahim, A. Jamali, Dynamic mathematical modeling and simulation study of small scale autonomous hovercraft, V 46, Sept. 2012, P. 95-114.
5. Osnovy teorii sudov na vozdushnoy podushke [Fundamentals of the theory of hovercraft] / Yu.Yu.Benua, V.K. D'yachenko, B.A. Kolyzaev i dr. L.: Sudostroenie, 1970. 456 p.
6. Zlobin G.P. Suda na podvodnykh kryl'yakh i vozdushnoy podushke [Hydrofoils and hovercraft]: (po materialam inostrannoy pechati): Sprav, posobie. L.: Sudostroenie, 1976. 264 p.
7. Kolyzaev B.A., Kosorukov A.I., Litvinenko V.A. Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya [The reference design ships with dynamic principles of maintenance]. L.: Sudostroenie, 1980. 472 p.
8. Lukomskiy Yu.A., Peshekhonov V.G., Skorokhodov D.A. Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov [Navigation and vessel traffic management]. SPb.: Elmor, 2002. 360 p.
9. Maklivi Roy. Suda na podvodnykh kryl'yakh i vozdushnoy podushke [Hydrofoils and hovercraft]. Per. s angl. N.I. Slizhevskogo. L.: Sudostroenie, 1981. 208 p.
10. Kaminskiy V.Yu., Lukomskiy Yu.A., Skorokhodov D.A. Sintez optimal'nykh energeticheskikh kharakteristik gidroprivodov sistem upravleniya dvizheniem [Synthesis of optimal energy characteristics of the hydraulic actuators of the motion control system] *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. Т. 1. № 2 (36). pp. 30-34.

656.61: 681.883. 42

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ МЕСТА СУДНА ПО ПОЛЮ ГЛУБИН НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Завьялов Виктор Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технические средства судовождения
Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: zavyalov@msun.ru

Клюева Светлана Федоровна

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических и информационных систем
Морской государственной университет имени адм. Г.И. Невельского
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: klueva@msun.ru

Аннотация

Основной целью работы является задача исследования возможности применения кластерного анализа в системах навигации по полю глубин морского дна и получение предварительных результатов оценки точности определения координат места судна на базе разработанного алгоритма. Кластеризация цифровой базы глубин проведена на базе такой метрики, которая позволяет оценить меру различия объектов по расстоянию и разности глубин между ними. В статье описана модель алгоритма оценивания координат места судна с использованием поля глубин морского дна. Выполнено программное моделирование с использованием разработанного алгоритма и сформированных кластеров реальных глубин. Новизна исследований заключается в применении кластерного анализа в оценивании координат места судна по полю глубин. Показаны преимущества использования кластерного анализа в системах навигации по глубинам морского дна по сравнению с алгоритмами на основе нечеткой логики и последовательного оптимального поиска.

Ключевые слова: системы навигации, поле глубин, цифровая модель рельефа, карта глубин, кластеризация, центры кластеров, эвристический алгоритм, нечеткие множества, метрика кластеризации.

IMPLEMENTATION OF ESTIMATION ALGORITHM IN PROBLEM OF TERRAIN AIDED NAVIGATION BASED CLUSTER ANALYSIS

Viktor V. Zavyalov

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of technical aids to navigation
Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoy
Verkhneportovaya 50a, St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: zavyalov@msun.ru

Svetlana F. Klueva

candidate of Technical Sciences,
assistant professor of department automatic and information systems
Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoy
Verkhneportovaya 50a, St. Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: klueva@msun.ru

Abstract

The main goal of this work is to study the possibility of applying cluster analysis to the navigation systems according to the field of the depths of the sea bottom and obtaining preliminary results of the accuracy of determining the vessel position on the basis of the developed algorithm. Clustering of depths digital base is carried out on the basis of such metric, which allows to evaluate the extent of differences of

objects in accordance with the distance and of depths between them. The article describes the model of the algorithm vessel position estimation using the field of the seabed depths. A software simulation using the algorithm developed and the clusters formed of the real depths has been made up. The novelty of the research lies in the application of cluster analysis in estimating the coordinates of the vessel position on the depths field. The advantages of using cluster analysis in navigation systems for the depths seabed have been shown in comparison with the algorithms based on fuzzy logic and optimal successive search.

Keywords: navigation systems, depth field, digital terrain model, the depth chart, clustering, centroids of the cluster, heuristic algorithm, fuzzy sets, clustering metric.

Введение

Для исследования возможности применения кластерного анализа в системах навигации по глубинам морского дна необходимо решить несколько задач:

1. Реализованный в настоящей работе алгоритм кластеризации данных цифровой базы глубин для гладких пространственных полей рельефа морского дна описан в работах [1–3]. Совершенствование алгоритма кластеризации выполнено для более сложных по структуре акваторий, имеющих острова, бухты, сложную береговую черту, наличие мелей и др.

2. Задача формирования однородных кластеров цифровой базы глубин, схожих не только на основе метрики «близости» по расстоянию и глубине, но и на основе погрешностей измерения глубин, и точности определения места судна по полю глубин.

3. Обработка исходных данных методами корреляционного анализа в системах навигации (КЭС) требует значительных вычислительных затрат. Как отмечают авторы работы [4] «вопрос синтеза эффективных алгоритмов и анализа их точности до сих пор остаётся актуальным».

В работе [5] рассмотрен алгоритм последовательного оптимального поиска. В настоящее время решается задача сокращения вычислительных затрат для разработанных алгоритмов в системах навигации по полю глубин. Здесь возможны два подхода: реализация алгоритмов на базе параллельных вычислительных методов [6] и оптимизации области поиска наиболее вероятных координат места судна по полю глубин. В этом направлении эффективен обобщенный метод определения координат места судна по глубинам морского дна на базе кластеризации данных цифровой карты глубин.

В поисковых КЭС для каждой проверяемой гипотезы на основе измерений поля и имеющейся карты этого поля рассчитываются значения функционала, являющегося мерой схожести измеряемых и эталонных значений [4, 5, 7, 8]. Экстремум функционала по всем гипотезам позволяет определить траекторию движения и

конечное значение вектора состояния объекта. Применимы различные способы достижения экстремума. Например, «слепой» поиск, когда значение функционала рассчитываются для всех возможных дискретных значений конечного местоположения движущегося объекта. Методы связанные с вычислением градиентов (или аналогов) функционала позволяют определить направление движения к экстремуму.

Для поиска экстремума применимы эвристические алгоритмы. Удачно найденная эвристика позволяет эффективно организовать реализацию поискового алгоритма в области максимума корреляционной функции.

В рамках данной проблемы ранее авторами реализованы два алгоритма.

Первый алгоритм – эвристический алгоритм последовательного поиска, выполняющий поиск наиболее вероятных координат местоположения в области максимума корреляционной функции. Алгоритм реализован программно и проверен экспериментально, описан в работе [5]. Параметры алгоритма зависят от среднего уровня глубин и сложности траекторий.

Второй алгоритм основан на теории нечетких множеств, реализован программно и описан в работе [9]. Кратко, суть метода заключается в следующем.

Для заданного интервала по времени и дискретных отметок местоположения проводится формирование нечетких множеств на основе функции принадлежности, позволяющей оценить меру сходства эталонных отметок глубин и измеренных по ходу движения. В результате формируется множество наиболее вероятных точек – дискретных значений конечного местоположения движущегося объекта. Дальнейшая проблема заключается в оценке координат подмножества наиболее вероятных точек. В разработанном алгоритме применялась эвристика, позволяющая формировать область, включающую экстремум функционала с наибольшей вероятностью. Эксперименты второго этапа показали приемлемые результаты. К недостаткам алгоритма следует отнести большой объем вычислительных операций реализуемых в

реальном времени, при этом алгоритмы требуют значительных объемов памяти бортового компьютера.

Предлагаемый к рассмотрению алгоритм реализуется на основе кластерного анализа. Суть реализуемого алгоритма – определить координаты места судна для заданного интервала времени, на основе сопоставления измеренных значений глубин и эталонных, используя предварительно сформированные кластеры глубин исходной цифровой модели рельефа дна.

Кластеризация поля глубин позволяет выполнить предварительный анализ поля глубин. Данная информация используется также для автоматизации формирования маршрута по полю глубин, выделения однородных областей глубин, или отличительных отметок глубин. На основе сформированных кластеров по карте заданных глубин и измеренных глубин по ходу движения судна при помощи судовых гидроакустических навигационных приборов осуществляется формирование области точек (траекторий), имеющих **наибольшую** схожесть.

В качестве меры близости или различия измеренных значений глубин и положений центров кластеров выбирается величина подобная введенной метрике на этапе кластеризации. Традиционно в качестве меры сходства используется оценка разности глубин для отметок исходной цифровой карты и отметок сформированных по ходу движения. В данном случае оцениваются разность глубин и предельное значение по расстоянию между центрами кластеров глубин и полученными отметками глубин.

1. Модель алгоритма оценивания координат места судна по полю глубин

Алгоритм оценивания координат места судна по полю глубин включает следующие основные этапы.

1. Первый этап расчетов реализует формирование кластеров глубин для исходной цифровой карты глубин – ЦКГ. Данный алгоритм подробно описан в работах [1-3].

Цифровая карта глубин (ЦКГ) представляет собой множество точек:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n \mid ai = (x_i, y_i, h_i), i = \overline{1, n}\},$$

где (x_i, y_i) – координаты точки a_i , $h_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i$ – значения глубин ЦКГ.

Множество формируемых кластеров

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_K \mid C_j \cap C_l = \emptyset\} \subset A$$

– включает все точки ЦКГ. Каждый кластер C_k образует

$$C_k = \{a_i, c_k \mid \mu(a_i, c_k) \rightarrow \min\} \subset C,$$

где $c_k \in C_k, c_k = (x_k, y_k, \bar{h}_k)$ – центр кластера, имеющий свои координаты и среднее значение глубины для данного кластера;

$\mu(a_i, c_k)$ – мера различия по разности глубин и расстоянию между точками ЦКГ и центрами кластера определяемой формулами:

$$\mu(a_i, c_k) = d_p \cdot \rho_k(a_i, c_k) + d_h |h_i - h_{c_k}|, \quad (1)$$

где d_p, d_h – вещественные коэффициенты, настраивающие чувствительность метрики к изменению глубин и к расстоянию между точками ЦКГ:

$$(d_p + d_h) \leq 1, d_p > 0, d_h > 0, \quad (2)$$

Критерий качества кластеризации формируется на основе внутрикластерной оценки качества F_0 – и оценки межкластерного качества F_1 [1-3], [9-11]:

$$F_0 = \sum_k \frac{1}{|C_k|} \sum_j \mu_{c_k}^2(a_j, c_k) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{1}{|C_k|} \sum_k \mu^2(c_k, q) \rightarrow \max, \quad (4)$$

где q – центр масс всей выборки, $\mu^2(c_k, q)$ – мера «различия» между центрами c_k кластеров C_k вычисляемая по формуле (1).

Отношение пары функционалов, учитывает межкластерные и внутрикластерные меры сходства:

$$F_2 = F_0 / F_1 \rightarrow \min. \quad (5)$$

В качестве критерия останова для выполнения итерационного процесса выбран фактор положения центров кластеров относительно точек кластеров, к которым они принадлежат. На первом шаге итерации положение центров кластеров определено начальными условиями описанными выше. На втором шаге положение центров кластеров смещаются в центр масс точек своего кластера. Значение критерия качества (5) уменьшается при правильном смещении центров кластеров. Для реализованного алгоритма смещение положения кластеров ограничено

заданным пороговым значением Δd (для регулярной сетки $\Delta d = \Delta d_c \cdot m$, Δd_c – шаг сетки, загружаемой из базы данных, m – число включаемых узлов сети для формирования новой сетки положения центров кластеров), [1-3].

Кластеризацию можно применять для нерегулярной базы данных глубин, в том случае если число точек невелико (пример показан ниже). Тогда на первом этапе алгоритма каждая точка образует свой кластер. И далее, в соответствии с предложенным алгоритмом происходит оптимизация положения кластеров по метрике (1).

В результате кластеризации формируются кластеры однородных областей моря. Причём для предварительного анализа больших областей глубин можно использовать «крупные кластеры» со средними величинами глубин более 500 м. Отношение коэффициентов расстояния и глубины d_p/d_h влияет на величину кластеров. С увеличением отношения d_p/d_h возрастает число кластеров, и уменьшаются размеры кластеров [1-3]. В соответствии с формулами (1) – (5) наиболее близки к оптимальным значениям по критерию качества кластеризации для заданного района плавания коэффициенты $d_p = 0,55$ и $d_h = 0,45$; $F_2 = 0,888$. Программные вычисления показывают, что данные результаты дают наилучшую по качеству кластеризацию. Но для целей навигации по полю глубин предпочтительнее иметь более мелкие кластеры для районов с небольшими глубинами от 10 м до 100 м. Соответственно для районов с глубинами от 500 м и выше 2000 м целесообразно применять более крупные кластеры.

При реализации алгоритма кластеризации для анализа глубин выбранного района плавания необходимо учитывать недостатки присущие кластеризации.

Во-первых, структура кластеров определена метрикой кластеризации. Во-вторых, представление исходных данных в виде кластеров может исказить исходные данные, за счет замены их характеристиками обобщенных значений параметров кластера [13].

Таким образом, кластерный анализ в системах навигации по глубинам позволяет выполнить первоначальную классификацию данных по среднему уровню глубин и выделить связанные однородные области глубин. На основе сформированных кластеров далее осуществляется сопоставление эталонных и измеренных данных (значений глубин) в корреляционно-экстремальной подсистеме бортовой вычислительной системы.

2. Второй этап оценивания реализует поисковый алгоритм относительно сформированных кластеров, используемых в

качестве карты заданных глубин (КЗГ) и измеряемых значений глубин (карты рабочих глубин – КРГ) по ходу движения судна при помощи судовых гидроакустических навигационных приборов.

Пространство состояний морского подвижного объекта – МПО (судно) представлено множеством $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$, где $S_m \in T(t)$ – точка траектории $T(t)$ движения МПО для m -го момента времени. Состояния МПО во все моменты времени есть:

$$S(t) = (S_1(t), S_2(t), \dots, S_m(t)).$$

Траектория движения судна $T_m(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_m(t)\}$ определена на интервале $[t_1, t_2, \dots, t_m]$. Вектор измеренных по ходу движения судна значений глубин: $h = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$.

По проведенным наблюдениям $z[m], m = \overline{0, M}$ необходимо оценить значение состояния $S[M]$, принадлежащего области $\Theta \subset R^n$. Область Θ задаётся множеством возможных значений $S_m^{(j)}, j = \overline{1, J}$, вектора состояния $S[M]$, $S_m^{(j)}$ – приближенная оценка положения места судна, определенная по счислению курса и скорости.

Проверяемые гипотезы $D^{(j)}$ соответствуют возможным значениям $S_m^{(j)}$. Гипотеза $D^{(j)}$ состоит в предположении, что $S[M] = S^{(j)}$.

$$\text{Множество } T_m^{(j)}(t) = \{S_1^{(j)}(t), S_2^{(j)}(t), \dots, S_m^{(j)}(t)\}$$

– множество расчетных траекторий движения МПО, соответствующих вектору $h = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$. Необходимо найти траекторию $T_m^*(t) = \{S_1^*(t), S_2^*(t), \dots, S_m^*(t)\}$ такую, что оценки

Ψ_m минимальны:

$$\Psi_m = |T_m^*(t) - T_m(t)| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для каждой из точек предполагаемой траектории $T_m^*(t)$ на заданном временном интервале определяются центры кластеров, для которых величина меры различия по разности глубин и расстоянию оказывается наименьшей величиной.

Условие выбора кластеров:

$$\Psi_1 = \mu^*(c_k, h_m) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $\mu^*(c_k, h_m)$ – мера различия между измеренными значениями глубин h_m и центрами кластеров $c_k \in C_k, k = \overline{1, K}$ определяемая по формулам (1)-(5).

В результате выполнения второго этапа найдены кластеры $C_q \subset C$ – область нахождения наиболее вероятных точек (НВТ) местоположения судна относительно КЗГ и измеряемой КРГ.

3. Третий этап алгоритма оценивания реализует поиск наиболее вероятных точек внутри каждого найденного кластера C_q . Условием поиска точек служит оценка

$$\Psi_2 = \mu^*(a_q^i, h_m) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $\mu^*(a_q^i, h_m)$ – мера различия между точками a_q^i выбранного кластера C_q и значением измеряемой глубины h_m для заданного интервала. Мера $\mu^*(a_q^i, h_m)$ определяется аналогично выражениям (1)-(5) для точек S_m^* траектории $T_m^*(t)$,

В результате выполнения этапа формируются возможные координаты местоположения МОП для заданно момента времени m .

4. Четвертый этап позволяет определить траекторию $T^*(t)$ движения МПО относительно ЦКГ на основе всей полученной информации на предыдущих этапах вычислений. В результате чего будет сформирована траектория с известными оценками координат места МОП относительно карты заданных глубин, такая что

$$\Psi_3(T(t), T^*(t)) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $T(t)$ – истинная траектория движения МПО.

2. Результаты программного моделирования

Вычислительный эксперимент выполнен для района «Бухта Соколовская», фрагмент цифровой ЦКГ и траектория движения судна в заданном районе показаны на рисунке 1.

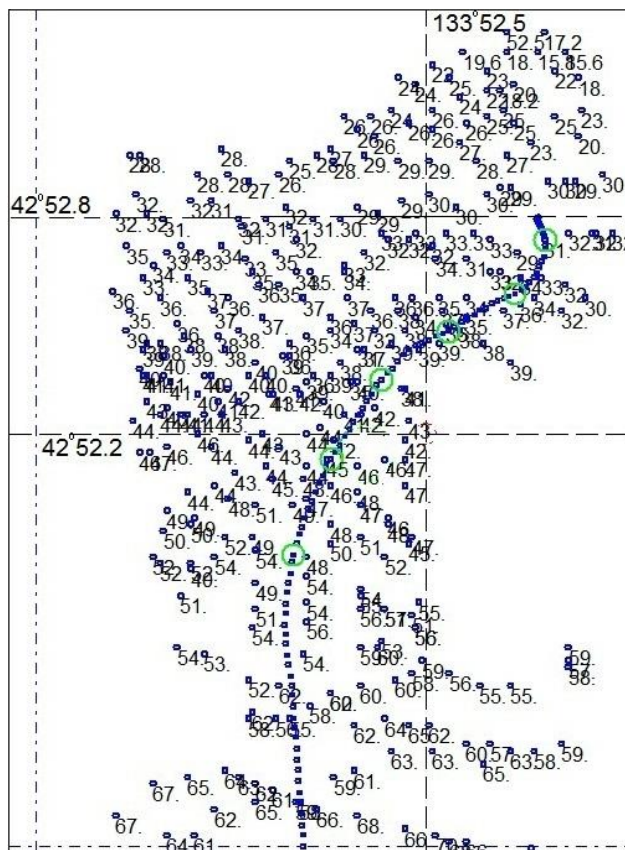


Рис. 1. Карта глубин бухты Соколовская, траектория судна

Для данного района выполнена кластеризация по алгоритму, описанному выше, результат кластеризации приведен на рисунке 2.

Параметры кластеризации: $dp = 0,45$; $dh = 0,55$, число кластеров $N = 11$; критерий качества $F2 = 1,09$.

Измеренные эхолотом глубины по ходу движения судна записываются в память бортового компьютера с заданной дискретностью. В каждом цикле вычислений последовательно считываются значения измеренных глубин для заданного временного интервала. Для каждой отметки интервала выбирается кластер ЦКГ, на основе величины меры различия. При этом число кластеров значительно меньше, чем точек в исходной ЦКГ,

что позволяет существенно упростить процесс поиска области, включающей наиболее вероятные точки местоположения судна для текущего момента времени.

Для расчетов выбраны точки траектории [k0, k11, k22, k33, k44, k55, k66], с интервалом времени $\Delta t = 99$ с. Для точки (измеренная глубина $h_{11} = 32,3$ м), выполнен поиск центров кластеров на основе меры сходства по разности глубин и расстоянию с параметрами кластеризации $d_r = 0,45$; $d_h = 0,55$. В результате поиска найден четвертый кластер, рисунок 3, (номера кластеров и отсчеты отмечены), причем результат определен однозначно.

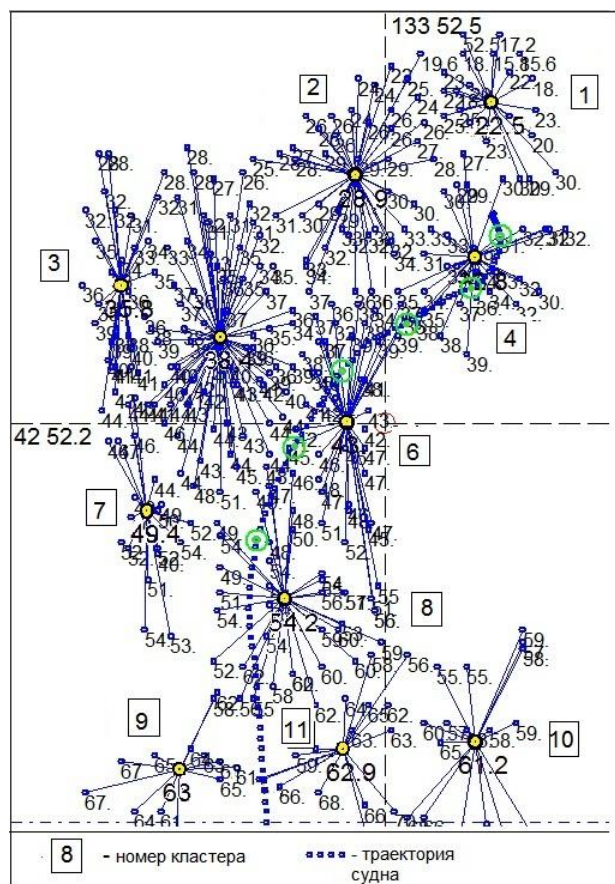


Рис. 2. Кластеризация глубин бухты Соколовская

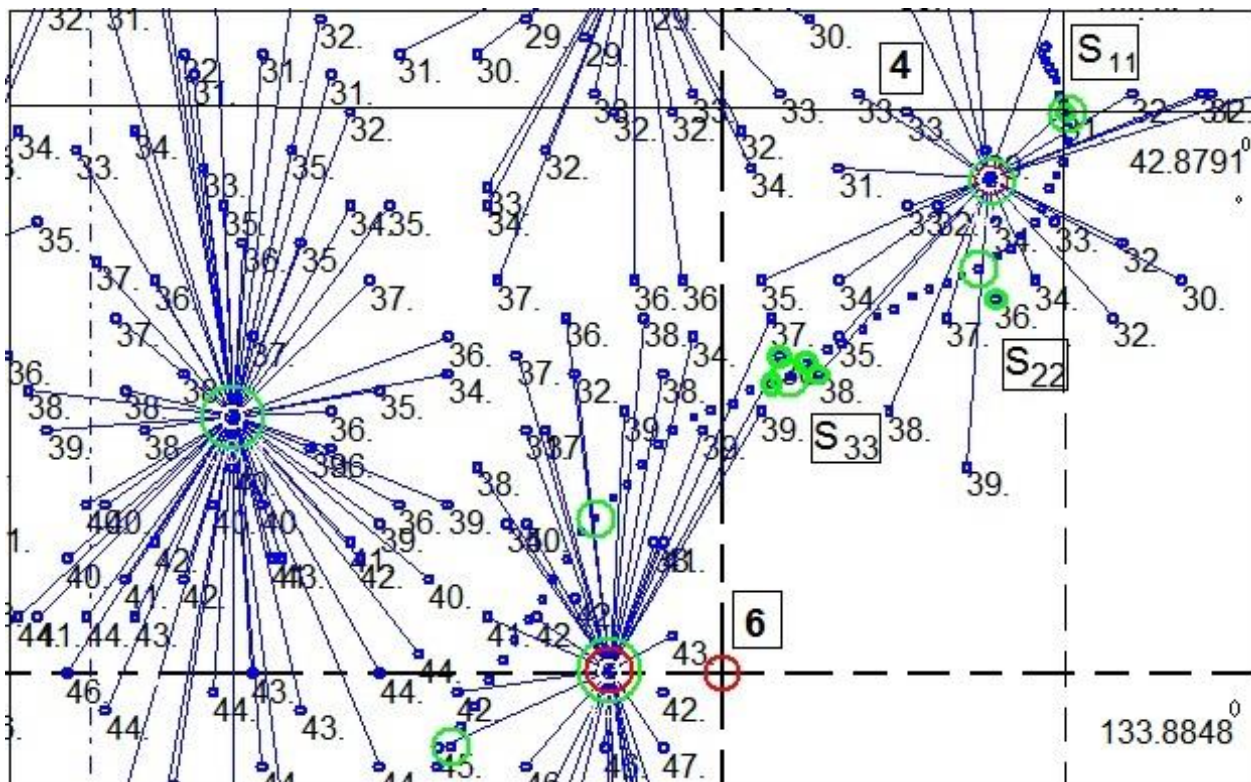


Рис. 3. Демонстрация работы алгоритма для первого отсчета, пример 1.

Для второй точки траектории $S_{k_{22}}$ также выделен кластер с номером 4. Для точки $S_{k_{33}}$ область наиболее вероятных точек образуют сразу два кластера с номерами 4 и 6.

Для сравнения приведен результат работы алгоритма для первых трех точек с параметрами кластеризации $d_p = 0,55$; $d_h = 0,45$, в этом случае сформировано 16 кластеров, радиус кластеров меньше в сравнении с первым примером, рисунок 4.

Результаты определены более точно, кластеры определены однозначно во втором случае и имеют меньшее количество точек выбора внутри кластеров.

Полученные варианты формируют ветви дерева решений. Задача – выбрать наиболее вероятное решение на последующих этапах вычислений.

Общий результат поиска координат места судна по полю глубин на основе кластеров показан на рисунке 5, сформированы кластеры с параметрами $d_p = 0,55$; $d_h = 0,45$.

Для каждой отметки траектории однозначно определен свой кластер, и внутри кластеров достаточно быстро вычисляются наиболее вероятные точки. Кластеризация с параметрами $d_p = 0,35$; $d_h = 0,65$; $F2 = 1,16$ формирует восемь кластеров, более крупного плана, что для выбранного района даёт худший результат по сравнению с приведенными примерами. Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 1.

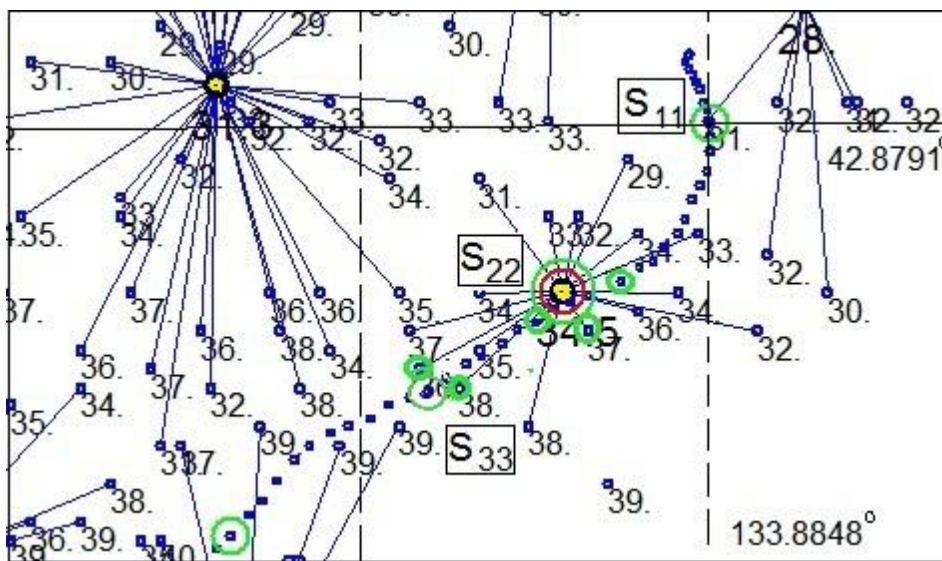


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма для трех первых отсчетов, пример 2.

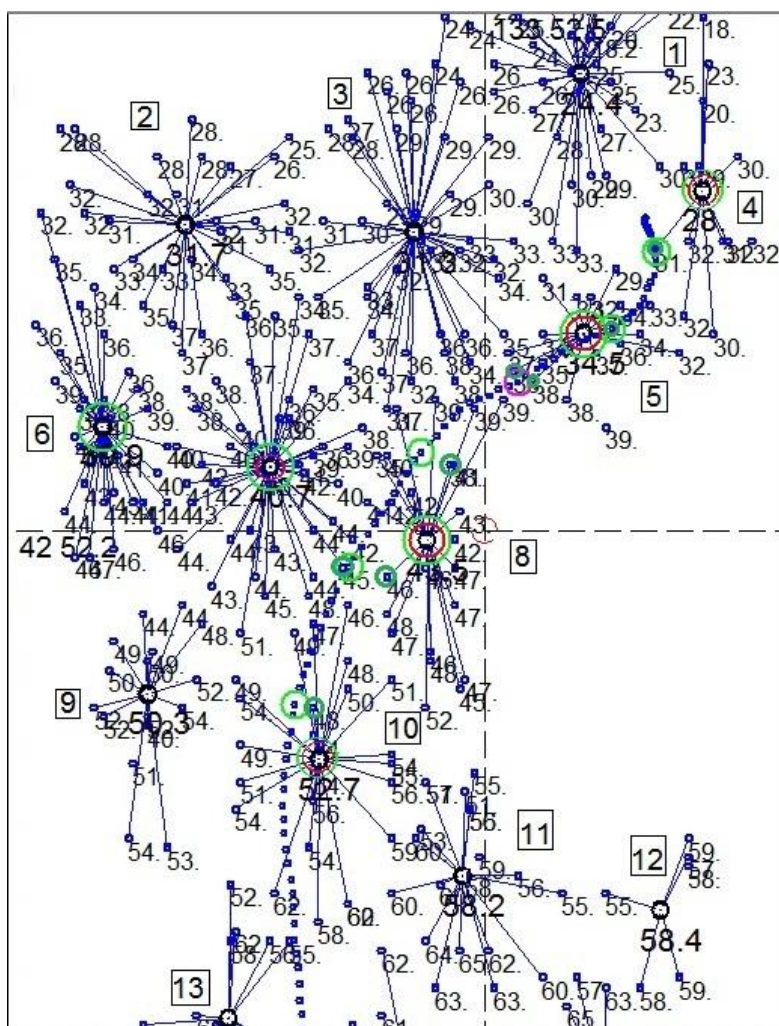


Рис. 5. Результат работы алгоритма для 16-ти кластеров

Таблица 1

Результаты работы алгоритма

Время, с (отсчет)	Траектория, отметка		Кластеры, параметры 0.45, 0.55, число кластеров 11			Кластеры параметры 0.55, 0.45, число кластеров 16		
	Глубина, м	Координаты, град	Номер	Глубина (центр), м	Координаты центра	Номер	Глубина (центр), м	Координаты центра
99 (11)	32.3	42.8791, 133.8848	4	32.8	42.8782, 133.8826	4	28	42.8809, 133.8874
198 (22)	33.9	42.88, 133.8823	4	32.8	42.8782, 133.8826	5	34.5	42.8766, 133.8806
297 (33)	39	42.8752, 133.8769	6	42.9	42.8708, 133.8718	5	34.5	42.8766, 133.8806
396 (44)	43	42.8731, 133.8714	6	42.9	42.8708, 133.8718	8	43.5	42.8705, 133.8717
495 (55)	47.5	42.8697, 133.8673	6	42.9	42.8708, 133.8718	8	43.5	42.8705, 133.8717
594 (66)	53.2	42.8656 133.8642	8	54.2	42.8630, 133.8666	10	52.7	42.8640, 133.8655

Заключение

Таким образом, проведены исследования возможности применения кластерного анализа в системах навигации по глубинам морского дна и получены результаты предварительных вычислений. Разработанный метод позволяет использовать исходную ЦКГ без регуляризации, тем самым исключаются дополнительные погрешности, связанные с интерполированием точек регулярной сети. Но вопрос оценки погрешностей определения координат места судна по полю глубин требует дальнейших исследований.

Другим преимуществом разрабатываемого метода является сокращение области поиска, так как первоначально поиск выполняется только среди сформированных центров кластеров, и затем выполняется поиск по точкам внутри кластера.

Анализ устойчивости разработанного алгоритма является также необходимым этапом дальнейших исследований. Необходимо выполнить сравнение

результатов работы и вычислительной сложности данного алгоритма с ранее реализованными алгоритмами на основе нечеткой логики [9], и последовательного оптимального поиска [5].

Алгоритм на основе нечеткой логики – требует большего объема вычислительных операций и памяти бортового компьютера. Алгоритм последовательного оптимального поиска неустойчив в случае больших отклонений при получении промежуточных решений, поэтому требует дополнительных вычислений, реализуемых за несколько проходов.

Вычислительные затраты алгоритма на основе кластеров минимальны, алгоритм имеет высокую эффективность. Массивы кластеров удобно хранить в памяти бортового компьютера и обрабатывать, объединяя группы кластеров в более крупные композиции кластеров для заданных районов плавания.

Литература

1. Завьялов, В. В. Исследование параметров кластеризации в системах навигации по глубинам морского дна / В. В. Завьялов, С. Ф. Ключева. // Морские интеллектуальные технологии. – 2016. – Т. 1. №3 (33). – С. 258-263.
2. Ключева, С. Ф. Применение алгоритмов кластеризации в задачах навигации по глубинам морского дна // Евразийское научное объединение. – 2016. – Т. 1, № 4(16). – С. 26-30.
3. Ключева, С.Ф. Алгоритм кластеризации цифровой карты глубин морского дна // Вестник морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. Вып. 75/2016. – Владивосток: МГУ им. Г. И. Невельского, 2016. – С. 14 – 20.
4. Степанов, О. А. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям / О. А. Степанов, А. Б. Торопов // Гироскопия и навигация. – 2015. – №4 (90). – С. 102-125.
5. Ключева, С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Ключева, В. В. Завьялов. – Владивосток: Мор. гос. ун-т. – 2013. –132 с.
6. Ключева, С. Ф. Методы параллельной обработки данных в системе навигации по полю глубин морского дна // Евразийское научное объединение. – 2016. – Т.1, № 4(16). – С.4-9.
7. Красовский, А. А. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А. А. Красовский, И. Н. Белоглазов, Г. П. Чигин. – М.: Наука. –1979. – 448 с.
8. Красовский, А. А. Справочник по теории автоматического управления / Под редакцией А. А. Красовского. – М.: Наука. –1987. – 712 с.
9. Завьялов, В. В., Анализ методов и алгоритмов поиска координат места судна по полю глубин на базе нечеткой логики / В. В. Завьялов, С. Ф. Ключева., Ф. И. Лабюк // Транспортное дело России. – 2015. – №6 (121). – С. 217-222.
10. Bilel Ben Ali, Youssef Massmoudi. K-Means clustering based on Gower Similarity Coefficient: A comparative study. Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference on. 2013. pp. 1-5.
11. Gower J.C. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. Biometrics. 1971. Vol. 27. No. 4. pp. 857-871.
12. Jain A.K., Flynn P. J. Data Clustering: A Review. ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31. No. 3. pp.264-323.
13. Савиных, В.П. Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В.П. Савиных, В.Я. Цветков. – М.: Картогеоцентр-Геодезиздат. – 2001. – 228 с.

References

1. Zav'yalov, V. V., Klyueva, S. F. (2016). Issledovanie parametrov klasterizacii v sistemah navigacii po glubinam morskogo dna. Morskie intellektual'nye tekhnologii. T. 1. №3 (33), pp. 258-263.
2. Klyueva, S.F. (2016). Primenenie algoritmov klasterizacii v zadachah navigacii po glubinam morskogo dna // Evrazijskoe nauchnoe ob"edinenie. T. 1, № 4(16), pp. 26-30.
3. Klyueva, S.F. (2016). Algoritm klasterizacii cifrovoj karty glubin morskogo dna // Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta im. adm. G. I. Nevel'skogo. Seriya: Avtomaticheskoe upravlenie, matematicheskoe modelirovanie i informacionnye tekhnologii. Vyp. 75/2016. – Vladivostok: MGU im. G. I. Nevel'skogo, 2016., pp. 14 – 20.
4. Stepanov, O. A. (2015). Metody nelinejnoj fil'tracii v zadache navigacii po geofizicheskim polyam. Giroskopiya i navigaciya. №4 (90), pp. 102-125.
5. Klyueva, S. F., Zav'yalov. V.V, (2015). Sintez algoritmov batimetriceskih sistem navigacii. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 132 p.
6. Klyueva, S. F. (2016). Metody parallel'noj obrabotki dannyh v sisteme navigacii po polyu glubin morskogo dna. Evrazijskoe nauchnoe ob"edinenie. T.1, № 4(16), pp.4-9.
7. Krasovskij, A. A., Beloglazov, I.N., CHigin, G.P. (1979). Teoriya korrelyacionno-ehkstremal'nyh navigacionnyh system. Moscow, Nauka, 448 p.
8. Krasovskij, A. A. (1987). Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / Pod redakciej A. A. Krasovskogo. Moscow, Nauka, 712 p.
9. Zav'yalov, V. V., Klyueva., S.F., Labyuk F.I. (2015). Analiz metodov i algoritmov poiska koordinat mesta sudna po polyu glubin na baze nechetkoj logiki. Transportnoe delo Rossii. №6 (121), pp. 217-222.
10. Bilel Ben Ali, Youssef Massmoudi. (2013). K-Means clustering based on Gower Similarity Coefficient: A compara-tive study. Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 5th International Conference on 2013, pp. 1-5.
11. Gower J.C. (1971). A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. Biometrics. Vol. 27. No. 4. pp. 857-871.
12. Jain A.K., Flynn P. J. (1999). Data Clustering: A Review. ACM Computing Surveys. Vol. 31. No. 3. pp.264-323.
13. Savinyh, V.P. Cvetkov V.YA. (2001). Geoinformacionnyj analiz dannyh distancionnogo zondi-rovaniya. Moscow, Kartgeocentr-Geodezizdat, 228 p.

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

КОНСТРУКЦИЯ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ С ЧАСТИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА В СОПЛОВОЙ АППАРАТ (05.08.05)

Андрей Юрьевич Фершалов

кандидат технических наук, доцент кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Юрий Яковлевич Фершалов

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Виктор Владимирович Поршкевич

аспирант кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Николай Александрович Камаев

студент кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Аннотация

Работа посвящена задаче повышения эффективности микротурбин, используемых в судовых главных и вспомогательных механизмах. В статье рассмотрены особенности функционирования микротурбин. Проведен анализ причин их низкой эффективности. Выявлены причины низкой эффективности осевых микротурбин: большие относительные зазоры между элементами проточной части, большая кривизна каналов, внезапное расширение потока на выходе из соплового аппарата и большие потери на трение потока о поверхность проточной части. Опираясь на выдвинутые гипотезы низкой эффективности была предложена конструкция ступени осевой микротурбины, особенности которой заключается в том, что рабочее колесо снабжено периферийным и корневым уплотняющими козырьками, которые частично размещены в проточной части соплового аппарата. Проведен анализ возможности повышения эффективности ступеней микротурбин при внедрении конструкции с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловый аппарат.

Ключевые слова: эффективность, судовая энергетическая установка, микротурбина, сопло, рабочее колесо, турбинная ступень, лопадки, газодинамика.

DESIGN OF THE AXIAL TURBINE STAGE WITH PARTIAL INTEGRATION OF THE ROTOR IN THE NOZZLES

Andrey Yu. Fershalov

Cand.Sci.Tech., the assistant professor of department of ship power engineering and automation
Far Eastern Federal University
Suhanova, 8, Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Yuriy Ya. Fershalov

the assistant professor, Dr.Sci.Tech., the professor of department of ship power engineering and automation
Far Eastern Federal University
Suhanova, 8, Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Viktor V. Porshkevich

graduate student of department of ship power engineering and automation
Far Eastern Federal University
Suhanova, 8, Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Nikolay Aleksandrovich Kamaev

student of department of ship power engineering and automation
Far Eastern Federal University
Suhanova, 8, Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Abstract

The paper is devoted to the task of increasing the efficiency of microturbines, which used in ship main and auxiliary mechanisms. Features of microturbine functioning are considered. The reasons for their low efficiency are analyzed. The reasons of the low efficiency of axial microturbines are large relative gaps between the elements of the flowing part, large curvature of nozzles and rotor blades channels, sudden expansion of the flow at the outlet from the nozzles and large losses on the friction of the flow on the surface of the flowing part. According to the hypothesis of low efficiency, the authors of the article proposed the design of the stage of an axial microturbine: the feature of the design is a rotor, that has peripheral and root sealing caps, which partially located in the flowing part of the nozzles. The possibility of increasing the efficiency of microturbine stages during the introduction of a design with partial integration of the rotor into the nozzles is analyzed.

Keywords: efficiency, ship power plant, microturbine, nozzle, rotor, turbine stage, blades, gasodynamic.

Введение

До настоящего времени остается актуальной задача повышения экономичности судового главного и вспомогательного оборудования. Одним из путей повышения экономичности паровых и газовых турбинных установок является совершенствование их проточной части [1, 2]. Это возможно при оценке потерь кинетической энергии потока газа. В судовой энергетике существует ряд задач, решение которых возможно при использовании микротурбин. К таким задачам относятся:

- привод главных двигателей на автономных подводных аппаратах малого водоизмещения;
- привод двигателей генераторов и насосов;
- привод компрессоров для наддува дизелей и турбодетандеров.

Для такой области судовой энергетике, как подводные аппараты, эффективность энергоустановки определяет важнейший показатель – автономность.

К микротурбинам, работающим в вышеуказанных областях предъявляется ряд требований, а именно:

- ограниченные масса и габариты установки;
- высокая моментная характеристика на валу турбины;
- малый расход рабочего тела.

Учитывая ограничения в габаритах турбины, наиболее приемлемым оказывается использование осевых турбин. В которых, в свою очередь, малый радиальный размер обуславливает малый момент на валу. В случае ограниченного расхода рабочего тела обеспечение требуемой мощности возможно за счет повышения параметров газа перед турбиной, что обуславливает сверхкритическое истечения газа из сопел. В свою очередь снижаются площади проходных сечений проточной части турбин и использование в них

ступеней с полным подводом рабочего тела требует применения недопустимо малых высот рабочих лопаток. Это вынуждает применять сопловые аппараты с парциальным (частичным) подводом рабочего тела к рабочему колесу. В результате появляются дополнительные потери энергии на вентиляцию в зоне неактивной дуги и на краях дуги подвода рабочего тела.

Для исключения указанных негативных факторов, было принято решение уменьшать угол выхода сопел и, соответственно, увеличивать угол поворота потока в лопатках рабочего колеса [3, 4]. Это приводит к улучшению моментной характеристики осевых микротурбин за счет увеличения окружной составляющей скорости, а также к увеличению степени парциальности за счет удлинения косога срез сопел [5].

Проведенные исследования [6] показали, уровень КПД микротурбин значительно меньше полноразмерных турбин. Однако при детальном анализе эффективности элементов проточной части микротурбин было выяснено, что эффективность сопловых аппаратов с малым углом выхода может достигать значения 0,97 [7], а эффективность рабочих колес с большим углом поворота потока может достигать 0,93 [8, 9]. Учитывая малые расходы рабочего тела и габариты микротурбин, были выдвинуты следующие гипотезы, обуславливающие их низкую эффективность:

1. Большие относительные зазоры в проточной части вызывают увеличение диссипации энергии с пассивным рабочим телом, в области между рабочим колесом и сопловым аппаратом;

2. Малые диаметры ступеней микротурбин обуславливают большую кривизну каналов проточной части, которая приводит к повышенным радиальным перетеканиям потока рабочего тела;

3. При выходе рабочего тела из сопел соплового аппарата происходит «внезапное» расширение потока, сопровождающееся большими потерями кинетической энергии;

4. Большая скорость потока в сверхзвуковой части сопел приводит к большим потерям на трение газа о поверхность сопла.

Указанные гипотезы стали основой для разработки конструкции ступени осевой микротурбины [10], позволяющей нивелировать причины низкой эффективности.

1. Конструкция ступени микротурбины

По мнению авторов статьи, повышение эффективности может быть достигнуто тем, что ступень осевой турбины, включающая в себя сопловой аппарат, рабочее колесо, бандаж рабочего колеса, снабженный уплотняющим козырьком, отличается тем, что козырек бандажа рабочего колеса выполнен как продолжение периферийной поверхности выходной части сопла и его косо́го среза, при этом названный козырек, по меньшей мере, частично размещен в проточной части соплового аппарата, кроме того, рабочее колесо снабжено дополнительным козырьком, выполненным как продолжение корневой поверхности выходной части сопла, при этом дополнительный козырек, по меньшей мере, частично размещен в проточной части соплового аппарата (рис. 1).

Ступень осевой турбины включает сопловой аппарат 1, рабочее колесо 2, бандаж рабочего колеса 3. Сопловой аппарат 1 имеет две кольцевые проточки: периферийную проточку 4 и корневую проточку 5. У периферийной проточки 4 минимальный диаметр равен диаметру периферийной поверхности проточной части сопел 6 с некоторым минимальным зазором относительно козырька 7, который выполнен на бандаже 3. У корневой проточки 5 максимальный диаметр равен диаметру корневой поверхности сопел 6 с некоторым минимальным зазором относительно козырька 8, который выполнен на рабочем колесе 2. Зазоры необходимы для обеспечения вращения рабочего колеса относительно лопаток неподвижного соплового аппарата.

Рабочее колесо 2 имеет два козырька, первый 7 выполнен на бандаже 3, причем диаметр его внутренней поверхности должен быть равен диаметру периферийной поверхности проточной части сопел 6. Второй козырек 8 выполнен на рабочем колесе 2, причем диаметр его внешней поверхности должен быть равен диаметру корневой поверхности сопел 6. Остальные поверхности обоих козырьков 7 и 8 должны соответствовать поверхностям проточек соплового аппарата 1 с некоторым минимально возможным зазором, чтобы не препятствовать вращению рабочего колеса относительно соплового аппарата. В составе турбины ступени внутренняя поверхность первого козырька 7, выполненного на бандаже 3 заменяет

поверхность периферийной части косо́го среза и выходного (разгонного) участка (целиком или частично) сопел 6, а наружная поверхность второго козырька 8, выполненного на рабочем колесе 2, заменяет поверхность корневой части косо́го среза и выходной части (целиком или частично) сопел 6. При этом остальные поверхности на выходе сопел 6 и в его косо́м срезе повторяют форму козырьков 7 и 8 с некоторым зазором. Проточная часть сопел 6 с косо́м срезом остается расчетной.

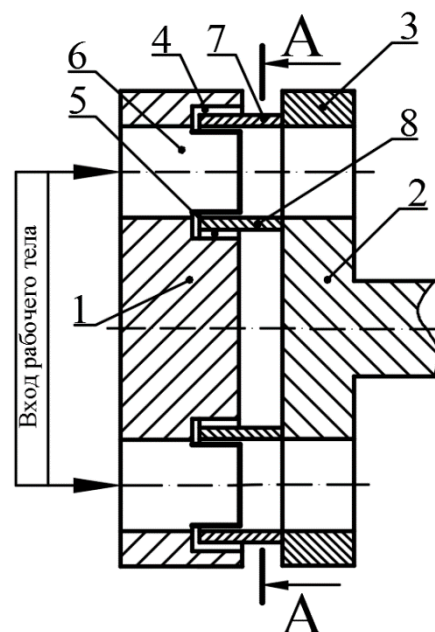


Рис. 1. Конструкция ступени осевой микротурбины
1 - сопловой аппарат; 2 - рабочее колесо; 3 - бандаж рабочего колеса; 4 - периферийная проточка; 5 - корневая проточка; 6 – поверхность сопла; 7 – периферийный козырек рабочего колеса; 8 – корневой козырек рабочего колеса.

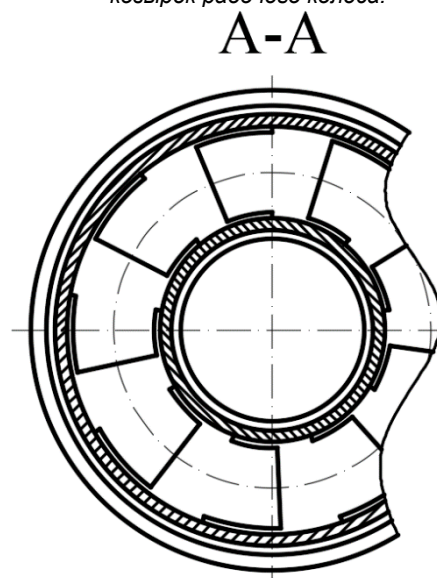


Рис. 2. Профильный разрез ступени осевой микротурбины

Ступень осевой турбины работает следующим образом:

Поток рабочего тела разгоняется в соплах 6 соплового аппарата 1, выходными (периферийными и корневыми) поверхностями которых являются вращающиеся поверхности козырьков 7, расположенного на бандаже 3 и 8 - на рабочем колесе 2. В отличие от традиционных ступеней в предлагаемой конструкции трение о стенки не является потерей энергии. Это происходит из-за того, что, вращаясь вместе с рабочим колесом 2, козырьки 7 и 8 используют энергию потока рабочего тела, летящего под углом в направлении вращения рабочего колеса 2. Таким образом, благодаря трению появляется сила, подкручивающая рабочее колесо 2. Кроме того, вращение поверхностей козырьков препятствует отрыву потока от них (который негативно сказывается на эффективности ступени) за счет снижения скорости потока рабочего тела относительно вращающихся поверхностей. Внедрение козырьков 7 и 8 в сопловой аппарат 1 позволяет устранить «дросселирование» потока при выходе его из сопел в зазор между рабочим колесом и сопловым аппаратом. После этого поток рабочего тела попадает в проточную часть каналов рабочего колеса 2. В связи с тем, что в предлагаемой конструкции "перекрыша" отсутствует, это исключает радиальные течения газа, которые снижают эффективность турбины.

В предлагаемой конструкции проточная часть, начиная с входа рабочего тела в сопла 6 соплового аппарата 1 и заканчивая выходом его из рабочего колеса 2, является единым целым для потока рабочего тела, что позволяет организовать его движение оптимальным образом.

2. Прогнозирование уровня повышения эффективности ступени микротурбины

Учитывая предложенную конструкцию ступени микротурбины можно констатировать, что возможный рост эффективности будет связан с нивелированием потерь, связанных с:

- большими относительными зазорами за счет того, что поток, соприкасаясь с периферийной и корневой поверхностью козырьков, являющихся частью рабочего колеса, участвует в совершении полезной работы;

- малыми диаметрами и, как следствие, повышенным радиальным перетеканием потока рабочего тела за счет того, что в предлагаемой конструкции отсутствует "перекрыша";

- внезапным расширением потока, так как в ступени отсутствует осевой зазор. Это связано с тем, что начиная с входа рабочего тела в сопла и заканчивая выходом его из рабочего колеса проточная часть является единым целым для потока рабочего тела;

- большой скоростью потока и, следовательно, с большими потерями на трение газа о поверхность сопла. В предложенной конструкции корневая и периферийная поверхность

сверхзвуковой части сопла, где имеют место быть значительные потери на трение, являются частью рабочего колеса. Так как рабочее колесо вращается в направлении окружной составляющей скорости потока в выходной части сопла, скорость течения газа относительно подвижной корневой и периферийной части меньше, чем в традиционных соплах. Из этого следует, что и потери на трение также будут меньше.

Заключение

На основе выдвинутых гипотез, обуславливающих низкую эффективность микротурбин, была разработана конструкция ступени осевой микротурбины. Особенность ступени заключается в том, что рабочее колесо снабжено уплотняющими козырьками, выполненными как продолжение периферийной и корневой поверхности выходной части сопла и его косоугольного среза. При этом названные козырьки, по меньшей мере, частично размещены в проточной части соплового аппарата.

Дополнительная информация

Работа выполнена при поддержке Фонда Целевого Капитала Дальневосточного федерального университета.

Литература

1. Фершалов, Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Дальневосточной государственной технической университет, Владивосток, 2000, 153 с.
2. Фершалов, А.Ю. Повышение эффективности рабочих колес судовых осевых малорасходных турбин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 2011, 125 с.
3. Кириллов, И.И. Патент на изобретение № 857512 (СССР). Осевая турбина / Ленинградский политехнический институт, 1981.
4. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, А.Ю., Симашов, Р.Р. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока в составе осевой малорасходной турбины // Судостроение. 2009. № 6. С. 56-59.
5. Фершалов, Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Дальневосточной федеральной университет, Владивосток, 2015, 355 с.
6. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, А.Ю., Акуленко, В.М., Фершалов, М.Ю., Цыганкова, Л.П. Перспективность исследований и области применения малорасходных турбин // Вологодские чтения. 2010. № 78. С. 159-164.
7. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, А.Ю. Сопловой аппарат осевой малорасходной турбины // Судостроение. 2010. № 3. С. 46-47.
8. Фершалов, А.Ю., Грибиниченко, М.В., Фершалов, Ю.Я. Газодинамические характеристики рабочих колес осевых турбин с большим углом поворота проточной части // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. № 1. С. 88-98.
9. Фершалов, А.Ю., Фершалов, М.Ю. Методика определения газодинамических и конструктивных характеристик проточной части большешаговых рабочих колес малорасходных турбин // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 29-31.
10. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, М.Ю., Фершалов, А.Ю. Патент на изобретение №2338887. Ступень осевой турбины / Дальневосточный федеральный университет, 2007.

References

1. Fershalov, Yu.Ya. Sovershenstvovaniye sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnoy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet, Vladivostok, 2000, 153 s.*
2. Fershalov, A.Yu. Povysheniye effektivnosti rabochikh koles sudovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, Vladivostok, 2011, 125 s.*
3. Kirillov, I.I. Patent na izobreteniyе № 857512 (SSSR). *Osevaya turbine. Leningradskiy politekhnicheskoy institut, 1981.*
4. Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, A.Yu., Simashov, R.R. (2009). *Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov s malymi uglami vykhoda potoka v sostave osevoy maloraskhodnoy turbiny. Sudostroenie, № 6, s. 56-59.*
5. Fershalov, Yu.Ya. Modelirovaniye, analiz i sovershenstvovaniye gazodinamicheskikh kharakteristik sudovykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupeney. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk, Dal'nevostochnoy federal'nyy universitet, Vladivostok, 2015, 355 s.*
6. Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, A.Yu., Akulenko, V.M., Fershalov, M.Yu., Tsigankova, L.P. (2010) *Perspektivnost' issledovaniy i oblasti primeneniya maloraskhodnykh turbin. Vologdinskie chteniya. №78. s. 159-164.*
7. Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, A.Yu. (2010) *Soplovyoy apparat osevoy maloraskhodnoy turbiny. Sudostroenie, №3, s. 46-47.*
8. Fershalov, A.Yu., Gribinichenko, M.V., Fershalov, Yu.Ya. (2012) *Gazodinamicheskie kharakteristiki rabochikh koles osevykh turbin s bol'shim uglom povorota protochnoy chasti. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroeniye, №1, s. 88-98.*
9. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu. (2014) *Metodika opredeleniya gazodinamicheskikh i konstruktivnykh kharakteristik protochnoy chasti bol'sheshagovykh rabochikh koles maloraskhodnykh turbin. Vestnik mashinostroeniya, №10, s. 29-31.*
10. Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, M.Yu., Fershalov, A.Yu. Patent na izobreteniyе №2338887. *Stupen' osevoy turbiny. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, 2007.*

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

УДК 629.12.001.2: 656.66

**ОЦЕНКА ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА
ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ****Кузьмичёв Игорь Константинович**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: rector@vgavt-nn.ru

Лукина Евгения Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности
судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: evair@yandex.ru

Митрошин Сергей Григорьевич

кандидат технических наук, начальник Управления научных исследований и инновационной деятельности
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: mitroshin@vsawt.com

Чебан Егор Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности
судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Аннотация

В работе произведена оценка критерия допустимого волнообразования нового типа судна для внутренних водных путей.

Создание нового типа судов связано с необходимостью обеспечить сочетание высокого значения показателя площади палубы на тонну грузоподъёмности и высокой скорости речного судна. При этом должно быть учтено экологическое воздействие большегрузного скоростного судна на водные пути. Выдвинута гипотеза об экологическом резерве катамарана по сравнению с однокорпусными грузовыми судами близкого водоизмещения.

Для её подтверждения и оценки критерия допустимого волнообразования проведены буксировочные испытания моделей существующих проектов однокорпусных грузовых судов и проектируемого катамарана в опытовом бассейне на глубокой воде.

В качестве результатов эксперимента получены графики зависимости высот волн при различных скоростях движения судов, кривая остаточного сопротивления катамарана в диапазоне докритических скоростей на глубокой воде, а также значения полного сопротивления и буксировочной мощности.

По полученным результатам сделан вывод о подтверждении гипотезы об экологическом резерве катамарана. Установлено, что при значениях чисел Фруда $Fr_L > 0,20$ высота волны от большегрузного катамарана не превышает высоты волны от находящихся в эксплуатации грузовых судов при соответственных значениях числа Фруда. Проектный диапазон чисел Фруда для нового типа судов соответствует интерференционному минимуму кривой остаточного сопротивления на глубокой воде, что обеспечивает определённое снижение полного сопротивления и буксировочной мощности.

Выявлена целесообразность проведения исследований сопротивления катамаранов в зоне докритических чисел Фруда на мелководье.

Ключевые слова: катамаран, экологический резерв, эксперимент, число Фруда, высота волны, сопротивление.

EVALUATION OF WAVE FORMATION OF A LARGE CARGO CATAMARAN FOR INLAND WATERWAYS

Igor' K. Kuzmichev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Transport
Volga state university of water transport
Nesterova,5, St. Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: rector@vgavt-nn.ru

Evgeniya A. Lukina

Cand. Sci. Tech., associate professor of department of hydrodynamics, theory of ship and environmental safety of navigation
Volga state university of water transport
Nesterova,5, St. Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: evair@yandex.ru

Sergey G. Mitroshin

Cand. Sci. Tech., head of Department of Scientific Research and Innovation Activities
Volga state university of water transport
Nesterova,5, St. Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: mitroshin@vsawt.com

Egor Y. Cheban

Cand. Sci. Tech., associate professor of department of hydrodynamics, theory of ship and environmental safety of navigation
Volga state university of water transport
Nesterova,5, St. Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Abstract

The estimation of admissible wave characteristics for a new internal waterways type vessel is given.

Creation of a new type of vessels is requires to ensure a combination of high deck area per tonne of cargo capacity and high speed of a river vessel. At the same time, the ecological impact of a heavy-duty high-speed vessel for inland waterways must be taken into account. A hypothesis is advanced about the ecological reserve for the catamaran in comparison with single-hull cargo vessels of a close displacement.

To confirm and evaluate the criterion of admissible wave characteristics, towing tests of models of existing single-hulled cargo vessels and a projected catamaran in an experimental basin on deep water were carried out.

In the model experiments dependence of wave heights from the different vessel speeds was received for the catamaran and single-hulled vessels. The catamaran residual resistance curve in the range of subcritical rates in deep water, as well as the values of water resistance and towing power were received.

Experimental results allowed making an assumption about the "ecological reserve" of the catamaran. It is established that for Froude numbers $Fr_L > 0.20$, the height of the wave from the catamaran does not exceed the height of the waves from the single-hull cargo vessels in operation with the corresponding values of the Froude number. The value of Froude numbers for large river catamarans corresponds to an interference minimum of the residual drag curve in deep water, which provides a certain reduction in drag and towrope power. The additional studies of the catamarans waves in the zone of subcritical Froude numbers in shallow water are needed.

Key words: catamaran, ecological reserve, towing test experiment, Froude number, wave height, drag.

Введение

Создание логистической системы паромно-транспортных перевозок на ВВП предполагает перевозку мультимодулей (автопоезда, фургоны, полуприцепы, контейнеры) с высокой транзитной скоростью [1 - 4]. Исследования показывают, что

существующие в настоящее время речные суда имеют значения эксплуатационных показателей недостаточные для эффективной организации данных перевозок на ВВП [5], что вызывает необходимость исследований в области проектирования нового типа судов для обеспечения скоростных мультимодальных перевозок на внутренних линиях [6]. К

особенностям таких речных большегрузных судов относится их эксплуатация со скоростью около 30 км/ч. В ранее выполненных работах было показано, что наилучшими значениями требуемых эксплуатационных показателей в рассматриваемом случае могут обладать суда-катамараны [3, 4].

Для обеспечения экологической безопасности современных скоростных судов необходимо учесть их волнообразование с точки зрения их энергетического воздействия на водные пути. При оценке волнообразования можно предположить, что катамараны обладают экологическим резервом, который заключается в том, что двухкорпусные суда могут иметь большую скорость по сравнению с однокорпусными судами близкой грузоподъёмности при одинаковом волнообразовании.

Исследованиям мореходности катамаранов посвящены работы Костюкова А.А., Ляховицкого А.Г., Дубровского В.Г. [7], М.Я. Алферьева [8]. Современные зарубежные исследования характеристик многокорпусных судов посвящены, в основном, высокоскоростным судам [9-13].

Несмотря на большое количество исследований, необходимо отметить, что они проведены для корпусов с меньшими размерами, движущихся при значениях чисел Фруда $F_{rL} > 0,3$, и посвящены проблемам оптимизации корпусов катамаранов с целью снижения сопротивления. Область чисел Фруда $0,15...0,3$ исследована недостаточно подробно, т.к. колебания значений гидродинамических характеристик в этом диапазоне малы по сравнению с их максимальными значениями при $F_{rL} = 0,4...0,5$. Однако при отработке параметров большегрузных катамаранов для ВВП, значения чисел Фруда которых ограничены узким диапазоном $0,20...0,22$, даже небольшие отличия в гидродинамических характеристиках могут привести к уменьшению эксплуатационных затрат. В то же время нельзя не учитывать важность волнообразования с точки зрения экологического воздействия судна на водные пути и объекты малого судоходства.

1. Постановка задачи оценки допустимого волнообразования скоростного большегрузного катамарана

В силу своих характеристик катамараны для мультимодальных перевозок на ВВП не относятся к высокоскоростным судам (по классификации ИМО). При их проектировании следует выдерживать значения чисел Фруда из докритических скоростей, учитывая при этом значения, соответствующие благоприятной интерференции.

Относительные характеристики проектируемого катамарана:

- значения числа Фруда по длине $F_{rL} = 0,20...0,22$;
- относительная длина $L/B = 14...17$;

- относительная ширина одного корпуса $V/T = 3,57$;
- отношение расстояния между ДП корпусов к длине судна $S/L = 0,10...0,13$;
- отношение глубины фарватера к осадке $H_{ф}/T = 3,2...4,0$.

Для большегрузных катамаранов внутреннего плавания необходимость обеспечения высоких показателей площади палубы при ограничении ширины судна камерами шлюзов определяет очень малые значения отношения $S/L < 0,2$. Это побуждает тщательно учитывать зоны благоприятной интерференции между корпусами в диапазоне докритических скоростей.

Значение допустимой высоты волны может быть определено с использованием различных подходов [14]. В качестве критерия допустимой скорости большегрузных накатных судов можно принять ту практически достижимую и экономически обоснованную скорость, при которой их волнообразование не будет превышать волнообразование от эксплуатирующихся в настоящее время судов.

Для сравнительной оценки высот волн от существующих однокорпусных большегрузных судов и волн от катамарана с указанными выше размерениями, был проведён модельный эксперимент, в рамках которого также были определены значения коэффициента остаточного сопротивления, полное сопротивление и буксировочная мощность, необходимые для обеспечения скорости рассмотренных судов в диапазоне исследований.

2. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследования выполнялись в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ВГУВТ» с размерами 35 x 4 м при уровне воды 1,1 м на гравитационной буксировочной системе (ГБС). Испытания проводились с буксируемыми моделями, параметры которых представлены в таблице 1. Из однокорпусных были выбраны модели судов серийной постройки, широко эксплуатирующихся на ВВП России. Модели были выбраны с учётом условия равенства их длин.

Условия проведения эксперимента соответствовали движению моделей судов на глубокой воде $H_{ф}/T > 15$.

Таблица 1
Основные характеристики моделей судов

№ модели	Водоизмещение модели D, кг	Относительная длина L/B	Относительная ширина V/T	Кэф-т общей полноты δ	Масштаб λ	
Однокорпусные суда	1	38,16	6,68	4,28	0,833	1:50
	2	40,48	6,28	4,71	0,826	1:50

катамаран	3	51,68	8,18	4,65	0,845	1:50
	4	25,84	7,09	5,92	0,831	1:50
	5	12,56	15,0	3,51	0,630	1:75

Замеры высот волн производились в диапазоне скоростей натуральных однокорпусных судов 17-31 км/ч и диапазоне скоростей 23-36 км/ч двухкорпусного судна, что обусловлено технической возможностью ГБС. Минимальные значения скоростей буксировки соответствуют пределу точности ГБС и регистрирующих приборов при использовании буксировочных грузов минимальной массы.

Высоты волн измерялись поплавковым волнографом резисторного типа. После оцифровки, сигнал обрабатывался программой PowerGraf в виде записи в реальном времени высот волн, измеряемых в точке установки поплавка волнографа (на 50% расстояния от борта судна до стенки бассейна).

Буксировочные характеристики пересчитаны на основании гипотезы Фруда о равенстве коэффициентов остаточного сопротивления модели и натурального судна при равных значениях Fr_L .

Соотношение между скоростями модели и натурального судна равно

$$V_n = V_m \cdot \sqrt{\lambda},$$

где λ – масштаб модели.

Пересчёт натуральных значений высот волн h_n производился исходя из геометрического масштаба:

$$h_n = h_m \cdot \lambda,$$

где h_m – высота волны, возникающая при движении модели, м.

Значения коэффициентов остаточного сопротивления, а также значения полного сопротивления и буксировочной мощности натуральных судов были получены по классической методике пересчёта данных буксировочных испытаний моделей судов [8].

3. Результаты модельных испытаний и выводы

В качестве результатов испытаний были получены высоты волн при различных скоростях движения судов. Графики данных зависимостей представлены на рисунке 1.

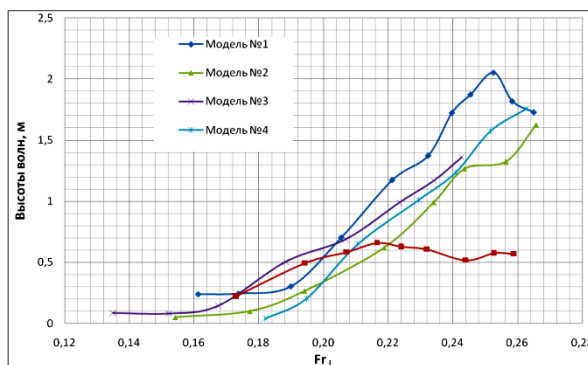


Рис. 1. Графики зависимости высот корабельных волн (в пересчёте на натуру) от относительной скорости судов

В таблице 2 выборочные результаты испытаний представлены в виде, позволяющем сравнить волнообразование от катамарана и однокорпусных судов при их движении с проектными скоростями и при их движении со скоростью 30 км/ч.

Из результатов испытаний, представленных в таблице 2 видно, что высота волны от катамарана при скорости 30 км/ч в 1,7 – 3,1 раза меньше, чем от однокорпусных судов, движущихся с той же скоростью. Это хорошо совпадает с результатами ранее выполненной приближенной оценки волнообразования расчётным способом с использованием метода, позволяющего вычислить высоты расходящихся и поперечных волн от корпусов водоизмещающих судов с учётом ограниченной глубины водоёма [6]. Результаты тех расчётов показали, что высота волны от катамарана будет в 2-3 раза меньше высот волн эксплуатирующихся на ВВП судов.

Таблица 2

Высоты волн от судов, движущихся при проектных скоростях и скорости 30 км/ч

№ модели судна	Проектная скорость натурального судна, км/ч	Число Фруда Fr_L для проектной скорости	Высота волны при проектной скорости, м	Число Фруда Fr_L для скорости 30 км/ч	Высота волны при скорости 30 км/ч, м
1	22	0,192	0,37	0,262	1,78
2	21	0,183	0,16	0,261	1,48
3	20,7	0,158	0,12	0,229	1,10
4	22	0,190	0,15	0,260	1,70
5	30	0,217	0,63	0,217	0,63

Следует отметить, что скорость 30 км/ч соответствует значениям чисел Фруда 0,23...0,27 для однокорпусных грузовых судов, которые с данной скоростью не эксплуатируются

Ограничение проектной скорости существующих однокорпусных судов обусловлено не воздействием их волн на ложе и берега водных путей, а техническими возможностями и экономической эффективностью работы грузовых судов на ВВП. При перевозке высокотарифицированных грузов мощность СЭУ и топливные затраты не являются сдерживающим фактором в пределах обозначенных значений скорости [1 - 3]. Поэтому, подход ограничения допустимой высоты волны от большегрузных катамаранов, движущихся со скоростью 30 км/ч, на основании оценки высот волн от существующих однокорпусных судов при их проектных скоростях является необоснованным. Сравнение волнообразования должно быть проведено при равных значениях числа Фруда. Таким образом, критерием оценки допустимости волнообразования большегрузного катамарана является не превышение высоты его волны над высотой волн однокорпусных судов близкого водоизмещения при равных числах Фруда.

Из графиков рисунка 1 видно, что для катамаранов высота расходящейся волны при $Fr_L = 0,217$ находится в пределах высот волн от эксплуатирующихся в настоящее время грузовых судов при таком же значении числа Фруда. Волна катамарана при числах Фруда $Fr_L > 0,20$ не превышает высоты волны от находящихся в эксплуатации грузовых судов при соответственных значениях числа Фруда.

Число Фруда $Fr_L = 0,217$ в условиях эксперимента соответствует первой впадине кривой коэффициента остаточного сопротивления катамарана (см. рисунок 2). Это свидетельствует о правильном выборе соотношения длины и скорости судна с точки зрения его ходкости.

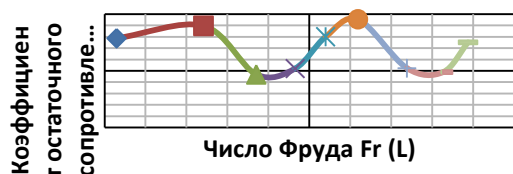


Рис. 2. График коэффициента остаточного сопротивления катамарана по данным буксировочных испытаний

Поэтому, можно сделать вывод о том, что движение катамарана в диапазоне чисел Фруда $Fr_L = 0,20...0,22$ соответствует первому интерференционному минимуму кривой остаточного сопротивления, следовательно, при выбранных соотношениях характеристик катамаран будет иметь приемлемые для организации перевозок высокотарифицированных грузов значения полного сопротивления и буксировочной мощности, приведённые на рис.3.

Соответствие проектного значения числа Фруда первому интерференционному минимуму кривой остаточного сопротивления позволяет

получить выигрыш в значениях полного сопротивления и буксировочной мощности в 4% даже при условиях проведённого эксперимента на глубокой воде.

При рассмотрении максимального значения кривой высот корабельных волн катамарана, приходящегося на скорость именно в 30 км/ч ($Fr_L = 0,217$), можно предположить, что оно может быть снижено обработкой обводов погруженной части корпусов катамарана, или сдвинуто в сторону меньших значений при учёте мелководья.

Влияние мелководья на волновое сопротивление катамаранов начинается со значений $H_f/T=6$ и менее [8]. Так как для большегрузных катамаранов внутреннего плавания водоизмещением более 5000 тонн нет возможности соблюдать значения $H_f/T > 6$, то при их проектировании следует учитывать глубины на конкретных линиях эксплуатации и ориентироваться на данные исследований, которые свидетельствуют о сдвиге зоны докритических скоростей в меньшую сторону чисел Фруда с уменьшением значения H_f/T .

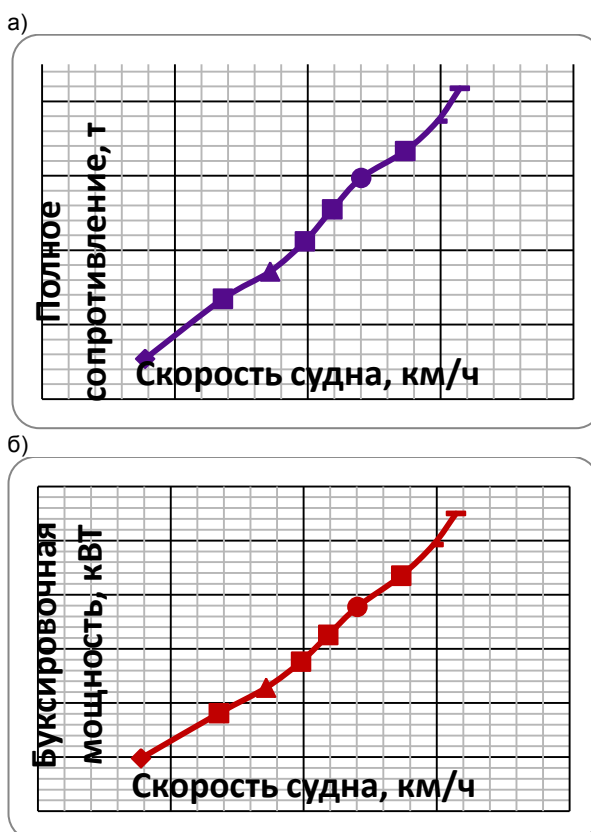


Рис. 3. Кривая полного сопротивления (а) и буксировочной мощности (б) катамарана по данным буксировочных испытаний

Для решения задач снижения полного сопротивления и изменения максимума кривой высоты волны необходимо проведение специальных буксировочных испытаний моделей проектируемого катамарана с учётом мелководья.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволили определить критерий оценки допустимого волнообразования скоростного большегрузного катамарана.

Подтверждено предположение об экологическом резерве использования катамаранных

судов по сравнению с типовыми однокорпусными грузовыми судами.

Выявлены предпосылки о целесообразности исследований сопротивления нового типа катамаранов в зоне докритических чисел Фруда с использованием буксировочных испытаний на мелководье.

Благодарности

В основу данной работы положены научные идеи профессора, д.т.н., академика Российской академии транспорта Владимира Львовича Этина (1939 – 2016 г.г.).

Авторы благодарят заведующего лабораторией «Опытный бассейн» ВГУВТ Евгения Михайловича Сироткина за помощь при выполнении модельных испытаний.

Литература

1. Ефремов Н.А., Костров В.Н., Этин В.Л., Митрошин С.Г. «РАЗВИТИЕ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА В XXI ВЕКЕ - НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Вестник транспорта Поволжья. 2008. № 4. С. 56-62
2. Минеев В.И., Митрошин С.Г., Ефремов Н.А., Костров В.Н., Этин В.Л. Инновационные технологии - основа развития речного транспорта в XXI веке. Речной транспорт (XXI век). 2009. Т. 4. № 6. С. 34.
3. Этин В.Л., Лукина Е.А., Милавин С.А. «Проектирование речных скоростных грузовых накатных судов катамаранного типа». / 12-ый междунар. научно-промышленный форум "Великие реки-2010": Труды конгресса. Т.2. Н. Новгород, Нижегород. госуд. архит.-строит. ун-т - Н. Новгород: НГАСУ, 2011. – С.37-44.
4. Костров В.Н., Телегин А.И., Митрошин С.Г. Моделирование и продвижение новых технологий в паромно-транспортной логистической системе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008. № 24. С. 132-136.
5. Этин В.Л., Лукина Е.А., Битков Д.А. Оценка пригодности эксплуатирующихся в Волжско-Камском бассейне судов для выполнения паромно-транспортных перевозок. / Вестник ВГАВТ. - Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. -Вып.27. - С.159-164.
6. Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне». / Вестник ВГАВТ. Вып.28.- Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С.56-62.
7. Многокорпусные суда / А.Н. Алексеев [и др.]; под ред. В.А. Дубровского. – Л.: Судостроение, 1978. – 304 с.
8. Алферьев М.Я. Транспортные катамараны внутреннего плавания / М.Я. Алферьев, Г.С. Мадорский. – М.: Транспорт, 1976. – 336с.
9. Волновое сопротивление для высокоскоростных катамаранов : пер. с англ. / Г. Морас, Д. Васконселлос, Л. Латорре. [электронный ресурс]. / Государственный университет Рио-де-Жанейро, Бразилия; Нью-Орлеанский университет, США, 2004. – Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.
10. A. Souto-Iglesias, R. Zamora-Rodriguez, D. Fernandez-Gutierrez и L. Perez-Rojas. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. *Experimental Fluids* (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
11. Md Shahjada Tarafdera, Kazuo Suzuki. Computation of wave-making resistance of a catamaran in deep water using a potential-based panel method. *Ocean Engineering* 34 (2007) 1892–1900.
12. Riccardo Brogna, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *J Mar Sci Technol* (2011) 16:254–269. / DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
13. Millward, A., Sproston, J.L., 1988. The prediction of the resistance of fast displacement hull in shallow water. Royal Institution of Naval Architects, Maritime Technology Monograph, No. 4.
14. Этин В.Л., Лукина Е.А., Битков Д.А. «Постановка задачи оценки допустимой скорости большегрузных накатных судов катамаранного типа». / 12-ый междунар. научно-промышленный форум "Великие реки-2010": Труды конгресса. Т.2. Н. Новгород, Нижегород. госуд. архит.-строит. ун-т - Н. Новгород: НГАСУ, 2011. - С.276-278.

References

1. Efremov N.A., Kostrov V.N., Jetin V.L., Mitroshin S.G. (2008) RAZVITIE RECHNOGO TRANSPORTA V XXI VEKE - NOVYE TEHNOLOGII. Vestnik transporta Povolzh'ja, № 4, 56-62
2. Mineev V.I., Mitroshin S.G., Efremov N.A., Kostrov V.N., Jetin V.L. Innovacionnye tehnologii - osnova razvitiya rechnogo transporta v XXI veke. Rechnoj transport (XXI vek), 4(6), 34.
3. Jetin V.L., Lukina E.A., Milavin S.A. (2011) Proektirovanie rechnyh skorostnyh gruzovyh nakatnyh su-dov katamarannogo tipa. 12-yj mezhdunar. nauchno-promyshlennyj forum "Velikie reki-2010": Trudy kongressa, T.2, pp.37-44.
4. Kostrov V.N., Telegin A.I., Mitroshin S.G. (2008) Modelirovanie i prodvizhenie novyh tehnologij v pa-romno-transportnoj logisticheskoj sisteme. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 24, 132-136.
5. Jetin V.L., Lukina E.A., Bitkov D.A. (2009) Ocenka prigodnosti jekspluatirujushihhsja v Volzhsko-Kamskom bassejne sudov dlja vypolnenija paromno-transportnyh perevozok. Vestnik VГАVТ, 27, 159-164.

6. Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. (2009) Obosnovanie primeneniya nakatnogo sudna dlja paromno-transportnyh gruzovyh perevozok v Volzhsko-Kamskom bassejne. Vestnik VGAVT, 28, 56-62.
7. *Mnogokorpusnye suda* / A.N. Alekseev [i dr.]; pod red. V.A. Dubrovskogo. – L.: Sudostroenie, 1978. – 304 s.
8. Alfer'ev M.Ja. Transportnye katamarany vnutrennego plavanija. M.Ja. Alfer'ev, G.S. Madorskij. – M.: Transport, 1976. – 336p.
9. H.B. Moraes, J.M. Vasconcellos, R.G. Latorre. Wave resistance for high-speed catamarans. *Ocean Engineering* 31 (2004), 2253–2282.
10. A. Souto-Iglesias, R. Zamora-Rodriguez, D. Fernandez-Gutierrez и L. Perez-Rojas. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. *Experimental Fluids* (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
11. Md Shahjada Tarafdera, Kazuo Suzuki. Computation of wave-making resistance of a catamaran in deep water using a potential-based panel method. *Ocean Engineering* 34 (2007), 1892–1900.
12. Riccardo Broglia, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *J Mar Sci Technol* (2011) 16:254–269. DOI 10.1007/s00773-011-0132-3.
13. Millward, A., Sproston, J.L., 1988. The prediction of the resistance of fast displacement hull in shallow water. Royal Institution of Naval Architects, Maritime Technology Monograph, No. 4.
14. Jetin V.L., Lukina Ye.A., Bitkov D.A. (2011). Postanovka zadachi otsenki dopustimoy skorosti bol'shegruznykh nakatnykh sudov katamarannogo tipa. 12-yy mezhdunar. nauchno-promyshlenny forum "Velikiye reki-2010": Trudy kongressa. T.2, pp. 276-278.

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 656.61.052

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ НАБЛЮДАЕМОЙ ЦЕЛИ НА МОРЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА****Седова Нелли Алексеевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических и информационных систем
ФГБОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского»
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а
e-mail: nellyfish81@mail.ru

Седов Виктор Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники
ФГБОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского»
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а
e-mail: sedov@msun.ru

Левченко Наталья Георгиевна

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических и информационных систем
ФГБОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского»
Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 а,
e-mail: levchenko@msun.ru

Аннотация

В статье рассматривается задача определения степени опасности столкновения морских судов, находящихся в зоне чрезмерного сближения. Для осуществления оценки степени опасности столкновения создана интеллектуальная система, базирующаяся на нейросетевых технологиях и теории нечётких множеств. Такая система способна в автоматическом режиме по информации о пеленге, курсе судна-оператора, курсе наблюдаемой цели и относительной скорости судна-оператора и наблюдаемой цели выдавать степень опасности столкновения. В работе представлена структурная схема нейро-нечёткой сети, описана методика её построения. Также в работе описана методика формирования обучающей выборки, необходимой для обучения нейро-нечёткой сети. Представленные в статье результаты проведённого имитационного моделирования предложенной интеллектуальной системы, обученной по методу решетки без кластеризации, а также методом субкластеризации, продемонстрировало её работоспособность и адекватность тестовым примерам.

Ключевые слова: опасность столкновения, зона чрезмерного сближения, пеленг, курс судна, нейро-нечёткая сеть, обучающая выборка, метод решетки без кластеризации, метод субкластеризации.

**RISK ASSESSMENT OF THE OBSERVED TARGET ON SEA
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM****Nelly A. Sedova**

associate professor, candidate of technical sciences,
the associate professor of automatic and information systems department
Maritime state university named after G.I. Nevelskoy
Verkhneportovaya str. 50A, Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: nellyfish81@mail.ru

Viktor A. Sedov

associate professor, candidate of physic and math sciences,
the head of electrician theoretical bases department
Maritime state university named after G.I. Nevelskoy
Verkhneportovaya str. 50A, Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: sedov@msun.ru

Natalia G. Levchenko

Cand. Sci. Tech, associate professor of automatic and information systems
Admiral Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,
e-mail: levchenko@msun.ru

Abstract

The problem of determining of risk of ships collision in a heavy traffic zone is considered in this article. The intelligent system based on neural network technology and the theory of fuzzy sets is created for assessment the degree of risk of ships collision. Such system is capable to give the ships collision risk rating automatically, using data of bearing of observed target, the course of operator ship, the course of observed target and the relative speed between operator ship and observed target. The block diagram of a neuro-fuzzy network is presented and its construction method is described. Also in the paper the method of forming training samples, required for learning neuro-fuzzy network is detailed. Such method is assume the use of a full set of situations for the position of the operator ship and observed target, followed by the layout of these situations on the maneuverable plane-table and determining the degree of risk of ship collision on the scale in the range [0, 1]. Thus, for the described task, a sample of 525 training pairs was formed. The results of simulation proposed intelligent system, trained by the lattice method without clustering and by subclustering method are demonstrates its efficiency and adequacy of test cases.

Keywords: ships collision, heavy traffic zone, bearing, course of the ship, neuro-fuzzy network, learning sample, the lattice method without clustering, subclustering method.

Для обеспечения безопасности судоходства в настоящее время разрабатываются автоматические или автоматизированные системы, предназначенные для расчета степени опасности (риска, возможной области опасности или зоны безопасности) столкновения судна (именуемого судном-оператором) с различными наблюдаемыми целями, т.е. объектами различной природы и/или другими судами. Такие системы позволяют предупреждать лицо, принимающее решение на судне-операторе, о возможных опасностях с целью оперативного вмешательства, направленного на предотвращение столкновения. Ранее авторами в работах [1]-[4] были предложены и исследованы системы на базе теории нечётких множеств, определяющие степень опасности столкновения судов, в частности, по характеру изменения наблюдаемых полярных координат [1], по взаимному расположению двух судов [2], а также по вычисляемому дистанции и времени сближения судна-оператора с наблюдаемой целью [3]. Указанные системы предназначены для первичной оценки степени опасности наблюдаемой цели в случаях, когда такие цели располагаются на достаточной для принятия решений дистанции от судна-оператора. В работе [4] предложена и исследована система на базе теории нечётких множеств, предназначенная для определения степени опасности наблюдаемой цели в зоне чрезмерного сближения, при этом рассчитаны такие оценки качества, как средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error – MAE), средне-квадратическая ошибка (Root Mean Square Error – RMSE) и симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (Symmetric Mean Absolute Percentage Error – SMAPE), которые для

указанной системы показали результаты, равные MAE = 0.1235, RMSE = 0.1366, SMAPE = 0.3599 соответственно, т.е. результаты демонстрируют удовлетворительное качество определения степени опасности наблюдаемой цели. При этом естественным стремлением является желание улучшить показатели качества, что возможно осуществить путем модификации системы принятия решений, а именно добавлением нейросетевых технологий [5], обращение к которым позволяет системе обучаться на имеющемся опыте, «обобщать знания на новые случаи и извлекать существенные свойства из поступающей информации» [6]. В работе [7] А.А. Кузькин отмечает, что гибридизация элементов теории нечётких множеств с нейронными сетями существенно повышает эффективность работы за счет того, что «недостатки, присущие одной из технологий, компенсируются преимуществами другой» [7]. Таким образом, в настоящей работе предложена нейро-нечёткая сеть (ННС) оценки степени опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения, а также представлены результаты исследования результативности предложенной модели.

Структурная схема нейро-нечёткой сети оценки степени опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения, представляет собой многослойную нейронную сеть прямого распространения (рис.1), параметрами которой являются параметры нечёткого логического вывода, а алгоритмом принятия решения нейронной сети является алгоритм нечёткого логического вывода, базирующийся на модели нечёткого вывода Такаги-Сугено.

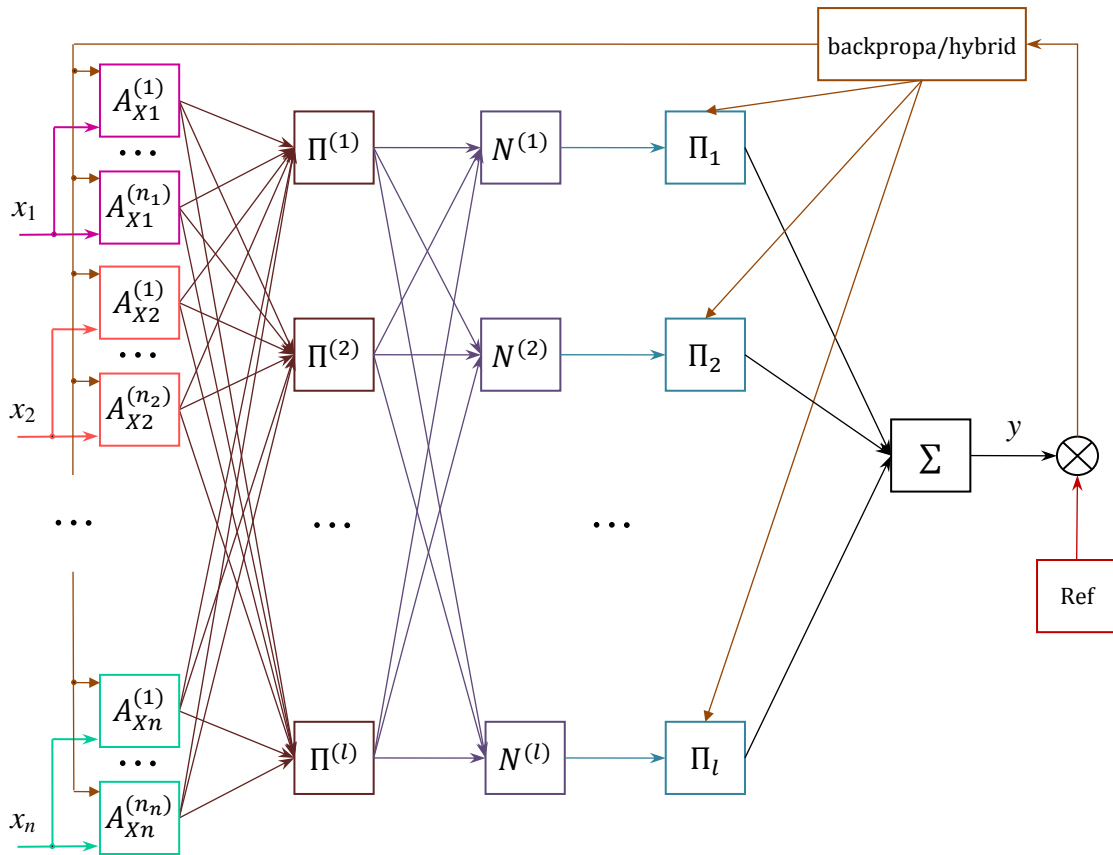


Рисунок 1 – Структурная схема ННС

Для ННС правила базы правил нечётких продукций выражаются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 : \text{if } x_1 \text{ is } A_{x_1}^{(1)} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{x_2}^{(1)} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{x_n}^{(1)}, \text{ then } y = a_{10} + a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n, \\ R_2 : \text{if } x_1 \text{ is } A_{x_1}^{(2)} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{x_2}^{(1)} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{x_n}^{(1)}, \text{ then } y = a_{20} + a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n, \\ \dots \\ R_l : \text{if } x_1 \text{ is } A_{x_1}^{(n_1)} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{x_2}^{(n_2)} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{x_n}^{(n_n)}, \text{ then } y = a_{l0} + a_{l1}x_1 + \dots + a_{ln}x_n, \end{array} \right.$$

где $l = n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_n$, R_1, R_2, \dots, R_l – обозначение правила нечёткой продукции,

x_1, x_2, \dots, x_n – входные переменные ННС,

$A_{x_1}^{(1)}, A_{x_1}^{(2)}, \dots, A_{x_2}^{(1)}, A_{x_2}^{(2)}, \dots, A_{x_n}^{(n_1)}, A_{x_n}^{(n_2)}, \dots, A_{x_n}^{(n_n)}$ – термы входных переменных,

n_1, n_2, \dots, n_n – число термов 1, 2, ..., n-ой входной переменной соответственно,

y – выходная переменная нейро-нечёткой сети,

a_{ln} – коэффициенты, получаемые в процессе обучения ННС.

Построение ННС требует выполнения следующих шести этапов.

- Этап 1. Формулировка задачи определения степени опасности наблюдаемой цели в нейро-нечётком базисе.

- Этап 2. Процедура формирования обучающей выборки для обучения ННС, в которой содержатся неявные знания, выявляющиеся в результате обучения.

- Этап 3. Выбор параметров нечёткого логического вывода, т.е. подбор функций принадлежности, аппроксимируемых нейронной сетью из обучающих данных [8]; нечётких правил продукций; метода дефаззификации.

- Этап 4. Выбор алгоритма обучения и настройки параметров нейро-нечёткой сети.

- Этап 5. Проведение обучения с применением обучающей выборки, полученной на втором этапе, для настройки параметров ННС.

- Этап 6. Оптимизация и проверка результативности обучения ННС.

В настоящей работе решаемая задача в нейро-нечётком базисе формулируется следующим образом: необходимо установить в классе функций, реализуемых нейронной сетью, функцию зависимости между входными параметрами, которыми являются пеленг, курс

судна-оператора, курс наблюдаемой цели и значение отношения скорости наблюдаемой цели к скорости судна-оператора, и выходным параметром, характеризующим степень опасности наблюдаемой цели. Такая функция будет каждому входному вектору {пеленг, курс судна-оператора, курс наблюдаемой цели, относительная скорость} ставить в соответствие значение из интервала от нуля до единицы, характеризующее степень опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения, при этом, чем ближе степень к единице, тем выше степень опасности.

Процедура формирования обучающей выборки заключалась в следующей последовательности шагов.

- Шаг 1. Формируется полный набор различных ситуаций расположения судна-оператора и наблюдаемой цели (с некоторым шагом для каждого множества, пробегаемого соответствующей компонентой входного вектора).

- Шаг 2. Каждая отдельная ситуация расположения судна-оператора и наблюдаемой цели раскладывается на маневренном планшете.

- Шаг 3. Для каждой ситуации расположения судна-оператора и наблюдаемой цели, разложенной на маневренном планшете, с учётом Международных правил предупреждения столкновений судов в море, комментариев к ним, а также рекомендаций так называемой «хорошей морской практики», определяется степень наличия опасности столкновения в числовом эквиваленте из отрезка [0, 1].

- Шаг 4. В обучающую выборку заносятся значения компонент входного вектора и

соответствующего числового эквивалента из отрезка [0, 1], характеризующего степень опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения.

Таким образом, принимая на вооружение вышеуказанную последовательность шагов, сформирована обучающая выборка, состоящая из 525 обучающих пар «вход-выход».

Для выполнения этапов 3-5 проведено имитационное моделирование с использованием адаптивной системы нейро-нечёткого вывода ANFIS (от Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [9], [10], реализованной в среде Matlab [11] – [13]. Для выбора оптимальных параметров нечёткого логического вывода осуществлён подбор функций принадлежности (ФП), в качестве которых воспользовались следующими функциями принадлежности в виде разности между двумя сигмоидными функциями, gauss2mf – двухсторонняя гауссовская функция принадлежности, gaussmf – гауссовская функция принадлежности, gbellmf – обобщенная колокообразная функция принадлежности, pимf – П-образная функция принадлежности, psigmf – произведение двух сигмоидных функций принадлежности, trapmf – трапециевидная функция принадлежности, trimf – треугольная функция принадлежности. В результате непосредственного проведения имитационного моделирования определены основные параметры ННС (рис. 2), позволяющие однозначно определять степень опасности наблюдаемой цели в зоне чрезмерного сближения, получена зависимость между выходом и параметрами нейро-нечёткой четвертого слоя нейро-нечёткой сети:

$$\begin{aligned}
 y^{\text{DofC}} &= \\
 &= \overline{w_1 a_{10}} + \overline{w_1 a_{11}} x^{\text{B}} + \overline{w_1 a_{12}} x^{\text{COS}} + \overline{w_1 a_{13}} x^{\text{CTS}} + \overline{w_1 a_{14}} x^{\text{RS}} + \overline{w_2 a_{20}} + \overline{w_2 a_{21}} x^{\text{B}} + \overline{w_2 a_{22}} x^{\text{COS}} + \\
 &+ \overline{w_2 a_{23}} x^{\text{CTS}} + \overline{w_2 a_{24}} x^{\text{RS}} + \dots + \overline{w_l a_{l0}} + \overline{w_l a_{l1}} x^{\text{B}} + \overline{w_l a_{l2}} x^{\text{COS}} + \overline{w_l a_{l3}} x^{\text{CTS}} + \overline{w_l a_{l4}} x^{\text{RS}} = \\
 &= x^{\text{B}} (\overline{w_1 a_{11}} + \overline{w_2 a_{21}} + \dots + \overline{w_l a_{l1}}) + x^{\text{COS}} (\overline{w_1 a_{12}} + \overline{w_2 a_{22}} + \dots + \overline{w_l a_{l2}}) + \\
 &+ x^{\text{CTS}} (\overline{w_1 a_{13}} + \overline{w_2 a_{23}} + \dots + \overline{w_l a_{l3}}) + x^{\text{RS}} (\overline{w_1 a_{14}} + \overline{w_2 a_{24}} + \dots + \overline{w_l a_{l4}}) + \\
 &+ (\overline{w_1 a_{10}} + \overline{w_2 a_{20}} + \dots + \overline{w_l a_{l0}}),
 \end{aligned}$$

где y^{DofC} – выходное значение, соответствующее значению, характеризующему степень опасности наблюдаемой цели, x^{B} – информация о пеленге на наблюдаемую цель, x^{COS} – значение курса судна-оператора, x^{CTS} – значение курса наблюдаемой цели, x^{RS} – значение относительной скорости судна-оператора и наблюдаемой цели, a_{ln} – коэффициенты, получаемые в процессе обучения нейро-нечёткой сети, \overline{w}_ν , $\nu = \overline{1, l}$ – нормированные относительные степени (веса) правил нечётких продукций ННС.

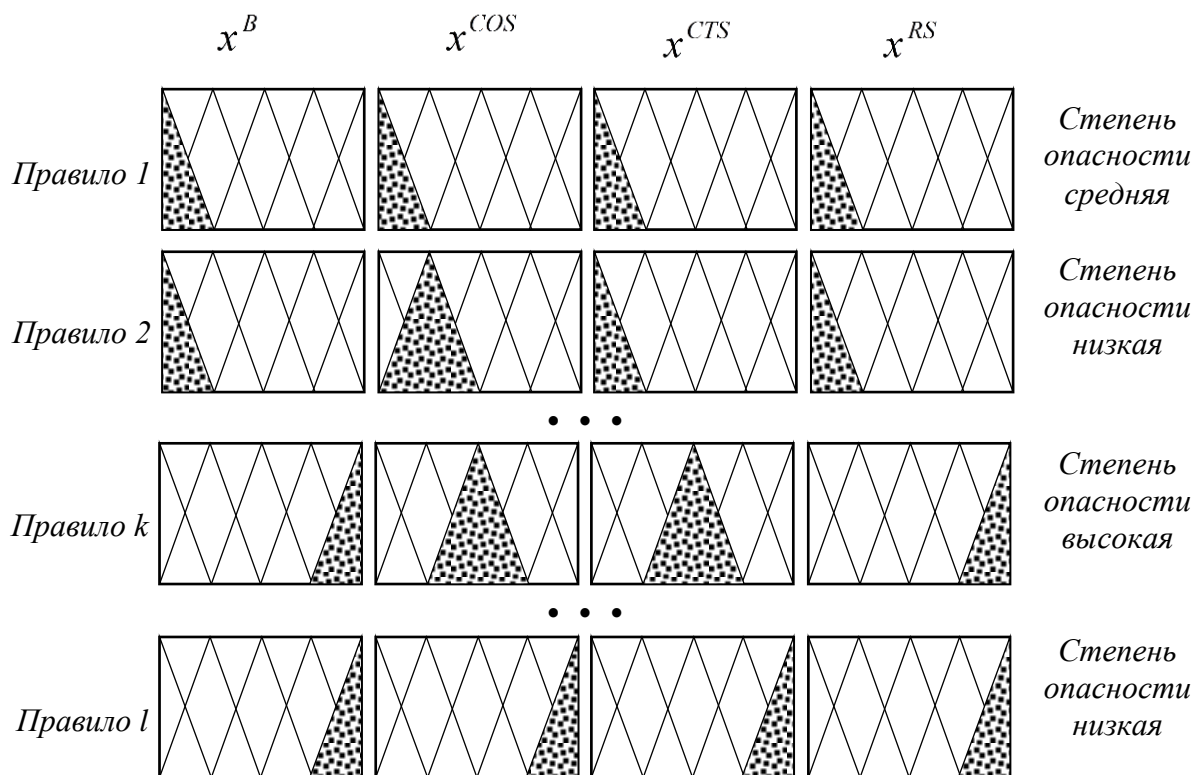


Рисунок 2 – Правила нечётких продукций, сформированные нейро-нечёткой сетью

В качестве алгоритмов обучения и настройки параметров ННС применены метод оптимизации «backprogra», т.е. алгоритм обратного распространения ошибки, а также метод оптимизации «hibrid», т.е. гибридный метод [14], являющийся модификацией алгоритма обратного распространения ошибки. Генерирование ННС происходило по методу решетки без кластеризации, а также методом субкластеризации.

В результате проведённого имитационного моделирования при генерировании по методу решетки без кластеризации были обучены 192

различные ННС, имеющие по пять термов в каждой из четырёх переменных входного вектора, употребив при этом постоянные (constant) или линейные (linear) коэффициенты для формирования выходной переменной. Из обученных ННС были выбраны шесть, показавшие наименьшие значения средне-квадратического отклонения обучения ННС, результаты занесены в таблицу 1 и отражены на рисунке 3, в котором для наглядности сравнения представлена разность величин в процентном соотношении, т.к. значения расходятся между собой на несколько порядков.

Таблица 1
Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу решетки без кластеризации

MF Type для INPUT	MF Type для OUTPUT	Optim, Methods	Epochs	Ошибка обучения	RMSE	MAE	SMAPE
dsigmf	constant	hibrid	100	2.9235E-07	3.2762E-10	1.4308E-10	6.1073E-10
psigmf	constant	hibrid	100	2.9236E-07	3.0146E-08	1.4582E-09	6.2241E-09
dsigmf	constant	hibrid	200	2.92E-07	7.1287E-02	3.1112E-03	1.3106E-02
psigmf	constant	hibrid	200	2.92E-07	1.9350E-09	1.3538E-10	5.7784E-10
pimf	constant	hibrid	200	2.95E-07	7.4516E-09	1.1228E-09	4.7923E-09
trapmf	constant	hibrid	600	2.92E-07	1.6522E-10	2.4894E-11	1.0626E-10

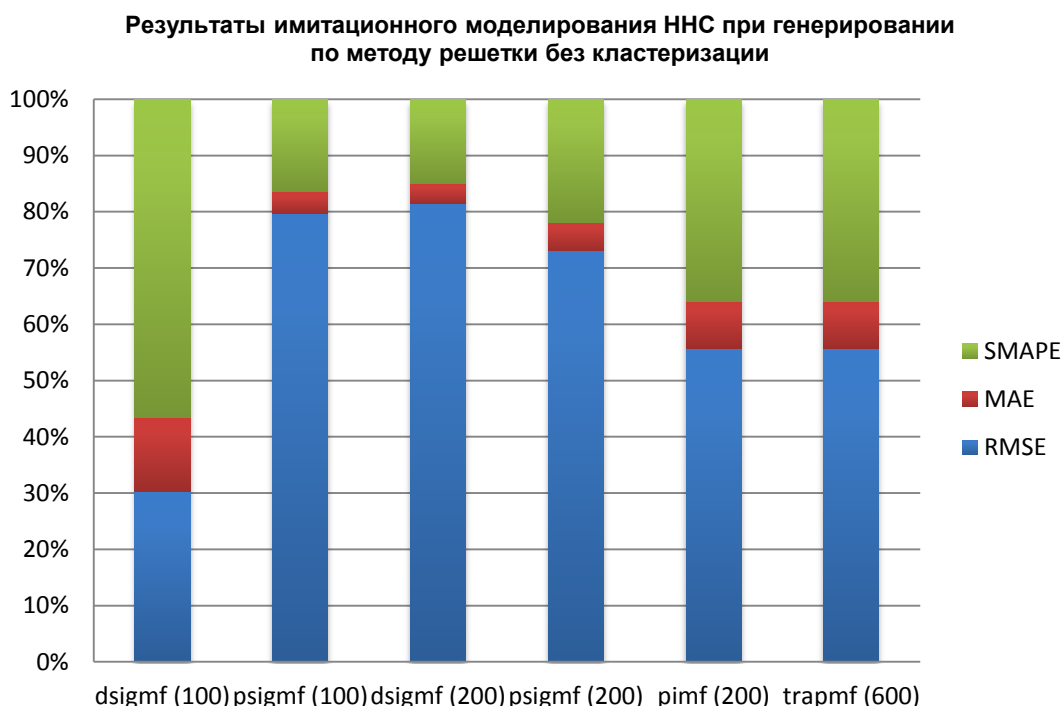


Рисунок 3 – Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу решетки без кластеризации

В результате проведенного имитационного моделирования при генерировании по методу субкластеризации были обучены методом «backproga» 144 различные ННС, а также 144 различные ННС – гибридным методом оптимизации, таким образом, общее число различных ННС, участвующих в моделировании, – 288. Параметры метода субкластеризации варьировались следующим образом: параметр «Range of influence», т.е. уровень влияния входных лингвистических переменных – от 0.2 до 0.5 с шагом 0.1, параметр «Squash factor», т.е. коэффициент подавления – от 1 до 1.375 с шагом 0.125, параметр «Accept ratio», т.е. «параметр,

определяющий, насколько потенциал указанной точки выше потенциала центра первого кластера» [15] – от 0 до 0.4 с шагом 0.2, а параметр «Reject Ratio», т.е. «параметр, определяющий, насколько потенциал указанной точки ниже потенциала центра первого кластера, чтобы рассматриваемая точка была исключена из возможных центров кластеров» [15] – от 0 до 0.3 с шагом 0.15. Обучение всех 288 ННС занимало 100 эпох.

Из этих ННС также выбраны шесть, имеющие наименьшее значение средне-квадратического отклонения обучения ННС, результаты занесены в таблицу 2 и выведены на диаграммы 4 и 5.

Таблица 2

Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу субкластеризации

Range of infl.	Squash factor	Accept ratio	Reject Ratio	Optim. Methods	Error	RMSE	MAE	SMAPE
0.3	1	0	0.3	backpropa	1.293E-01	0.1301	0.0375	0.1905
0.3	1	0	0	backpropa	1.335E-01	0.1303	0.0376	0.1909
0.3	1	0	0.15	backpropa	1.335E-01	0.1277	0.0358	0.1467
0.3	1	0.2	0	hibrid	8.2205E-06	7.8154E-06	2.2182E-06	9.4679E-06
0.3	1.125	0.2	0.15	hibrid	8.2205E-06	8.8958E-06	2.3147E-06	9.8798E-06
0.3	1.125	0.2	0.3	hibrid	8.2205E-06	8.8958E-06	2.3147E-06	9.8798E-06

Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу субкластеризации. Метод оптимизации «backgrora»

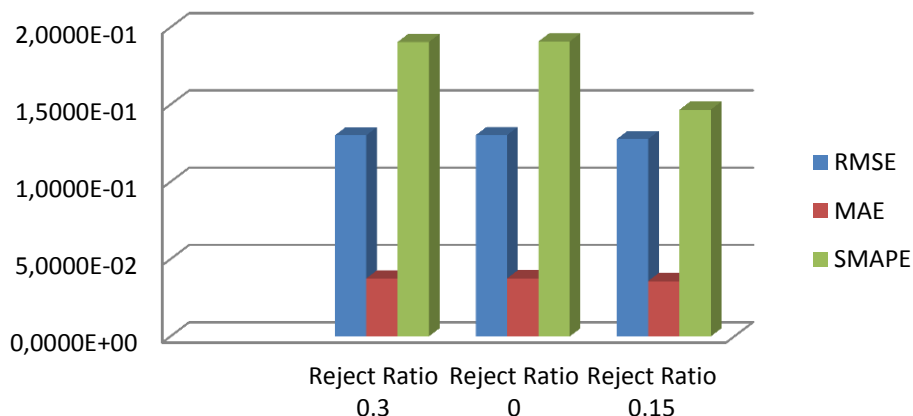


Рисунок 4 – Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу субкластеризации. Метод оптимизации «backgrora»

Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу субкластеризации. Метод оптимизации «hibrid»

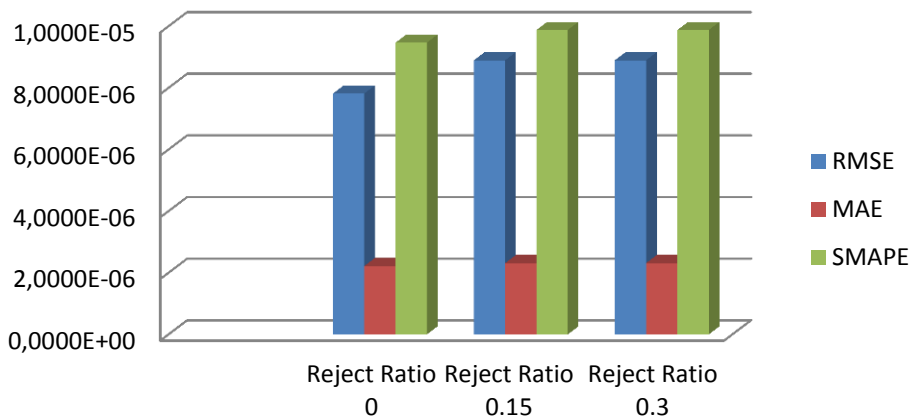


Рисунок 5 – Результаты имитационного моделирования ННС при генерировании по методу субкластеризации. Метод оптимизации «hibrid»

Анализ результатов проведенного имитационного моделирования, включая результаты, представленные в таблице 1 и таблице 2, позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, для решения задачи оценки степени опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения, использование ННС даёт значительно лучшие результаты, нежели система на базе теории нечётких множеств, представленная в работе [4]. Во-вторых, генерирование ННС по методу решетки без кластеризации позволяет определять степень опасности наблюдаемой цели в разы лучше, чем по методу субкластеризации. В-третьих, гибридный метод оптимизации позволяет получить результаты

значительно лучшие, чем алгоритм обратного распространения ошибки как с методом решетки без кластеризации, так и с методом субкластеризации. В-четвёртых, тип задействованной функции принадлежности существенно не влияет на результат обучения ННС при решении задачи оценки степени опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения.

Таким образом, проведено имитационное моделирование 192 различных ННС, генерирование которых проходило по методу решетки без кластеризации, а также 288 ННС, где генерирование нейро-нечётких сетей проходило по методу субкластеризации, в результате которого получено, что наилучшие

результаты показывает гибридный метод оптимизации. Проведённое тестирование наилучших нейро-нечётких сетей продемонстрировало адекватность предлагаемым тестовым примерам. Дальнейшие исследования

будут направлены на разработку программно-аппаратной реализации системы определения степени опасности наблюдаемой цели, находящейся в зоне чрезмерного сближения.

Литература

1. Седов В.А., Седова Н.А. Определение степени опасности столкновения судов по характеру изменения наблюдаемых полярных координат с помощью теории нечётких множеств // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2014. Т. 1. С. 103-105.
2. Седова Н.А., Седов В.А. Использование теории нечётких множеств для оценки опасности столкновения судов по их взаимному расположению // В сборнике: Международная научная школа «Парадигма». Лето-2015 сборник научных статей в 8 томах. ВАРНА, 2015. С. 273-279.
3. Седова Н.А. Нечёткая производственная модель первичной оценки опасности столкновения судов // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2 (57). С. 200-206.
4. Седова Н.А., Сясин Д.Ю. Логико-лингвистическая модель определения степени опасности столкновения судов в зоне чрезмерного сближения // Бюллетень транспортной информации. – 2014. – №. 12 (234), с. 23-26.
5. Крашенинников А.В., Земцов А.Н. Нейронные сети, их применение в задачах распознавания речи, идентификации человека // В сборнике: Городу Камышину – творческую молодежь Материалы IV региональной научно-практической студенческой конференции. 2010. С. 110-112.
6. Амаева Л.А. Применение нейро-нечёткого подхода для построения модели студента // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 109-111.
7. Кузькин А.А. Оценивание показателей эффективности и результативности ИТ-процессов с использованием гибридных нейро-нечётких сетей // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 1 (20). С. 67. <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN114.pdf>.
8. Андриевская Н.В., Резников А.С., Черанев А.А. Особенности применения нейро-нечётких моделей для задач синтеза систем автоматического управления // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-7. С. 1445-1449.
9. Безруков Н.С., Ермакова Е.В., Колосов В.П., Перельман Ю.М. Система поддержки принятия решений для диагностики бронхиальной астмы по нейрофизиологическим параметрам на основе адаптивной нейро-нечёткой сети // Информатика и системы управления. 2006. № 2 (12). С. 29-36.
10. Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А. О некоторых свойствах моделирования адаптивных нейро-нечётких систем на основе упрощённого нечётко-логического вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 5. С. 4-12.
11. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Разработка блока автонастройки АРЧМ на основе нечёткой логики // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 91-95.
12. Лавров Е.А., Барченко Н.Л. Эргономика электронного обучения. Подход к моделированию элементов человеко-машинного взаимодействия в обучающих средах // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2013. № 9. С. 244-249.
13. Соколова М.Л., Чернов В.Г. Выбор вида транспорта для построения логической системы с учетом факторов неопределенности // Vojnotekhnicki glasnik. 2016. Т. 64. № 2. С. 431-446
14. Найханова Л.В., Дышенов Б.А. Применение нейро-нечёткой системы вывода для установления дисциплин, соответствующих компетенции образовательного стандарта // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 5-1. – С. 47-52; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40248> (дата обращения: 24.07.2016).
15. Штовба С.Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

References

1. Sedov V.A., Sedova N.A. Opredelenie stepeni opasnosti stolknovenija sudov po harakteru izmenenija nabljudajemyh poljarnyh koordinat s pomoshh'ju teorii nechjotkih mnozhestv // Mezhdunarodnaja konferencija po mjagkim vychislenijam i izmerenijam. 2014. T. 1. S. 103-105.
2. Sedova N.A., Sedov V.A. Ispol'zovanie teorii nechjotkih mnozhestv dlja ocenki opasnosti stolknovenija sudov po ih vzaimnomu raspolozheniju // V sbornike: Mezhdunarodna nauchna shkola «Paradigma». Ljato-2015 sbornik nauchni statii v 8 toma. VARNA, 2015. S. 273-279.
3. Sedova N.A. Nechjotkaja produkcionnaja model' pervichnoj ocenki opasnosti stolknovenija sudov // Mir transporta. 2015. T. 13. № 2 (57). S. 200-206.
4. Sedova N.A., Sjasin D.Ju. Logiko-lingvisticheskaja model' opredelenija stepeni opasnosti stolknovenija sudov v zone chrezmernogo sblizhenija // Bjulleten' transportnoj informacii. – 2014. – №. 12 (234), s. 23-26.
5. Krasheninnikov A.V., Zemcov A.N. Nejrornyie seti, ih primenenie v zadachah raspoznavanija rechi, identifikacii cheloveka // V sbornike: Gorodu Kamyshinu – tvorcheskuju molodezh' Materialy IV regional'noj nauchno-prakticheskoj studencheskoj konferencii. 2010. S. 110-112.
6. Amaeva L.A. Primenenie nejro-nechjotkogo podhoda dlja postroenija modeli studenta // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2016. T. 19. № 4. S. 109-111.
7. Kuz'kin A.A. Ocenivanie pokazatelej jeffektivnosti i rezul'tativnosti IT-processov s ispol'zovaniem gibridnyh nejro-nechjotkih setej // Internet-zhurnal Naukovedenie. 2014. № 1 (20). S. 67. <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN114.pdf>.
8. Andrievskaja N.V., Reznikov A.S., Cheranev A.A. Osobennosti primenenija nejro-nechjotkih modelej dlja zadach sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija // Fundamental'nye issledovanija. 2014. № 11-7. S. 1445-1449.

-
9. Bezrukov N.S., Ermakova E.V., Kolosov V.P., Perel'man Ju.M. Sistema podderzhki prinjatija reshenij dlja diagnostiki bronhial'noj astmy po nejrofiziologicheskim parametram na osnove adaptivnoj nejro-nechjotkoj seti // Informatika i sistemy upravlenija. 2006. № 2 (12). S. 29-36.
 10. Bobyr' M.V., Emel'janov S.G., Milostnaja N.A. O nekotoryh svojstvah modelirovanija adaptivnyh nejro-nechjotkih sistem na osnove uproshhjonogo nechjotko-logicheskogo vyvoda // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. 2014. T. 12. № 5. S. 4-12.
 11. Prihod'ko M.A., Bulatov Ju.N., Ignat'ev I.V. Razrabotka bloka avtonastrojki ARChM na osnove nechjotkoj logiki // Sistemy. Metody. Tehnologii. 2010. № 6. S. 91-95.
 12. Lavrov E.A., Barchenko N.L. Jergonomika jelektronogo obuchenija. Podhod k modelirovaniju jelementov cheloveko-mashinnogo vzaimodejstvija v obuchajushhijh sredah // Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. 2013. № 9. S. 244-249.
 13. Sokolova M.L., Chernov V.G. Vybor vida transporta dlja postroenija logicheskoi sistemy s uchetom faktorov neopredelennosti // Vojnotehnicky glasnik. 2016. T. 64. № 2. S. 431-446
 14. Najhanova L.V., Dyshenov B.A. Primenenie nejro-nechjotkoj sistemy vyvoda dlja ustanovlenija disciplin, sootvetstvujushhijh kompetencii obrazovatel'nogo standarta // Fundamental'nye issledovanija. – 2016. – № 5-1. – S. 47-52;
URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40248> (data obrashhenija: 24.07.2016).
 15. Shtovba S.D. Proektirovanie nechjotkih sistem sredstvami MATLAB. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2007. – 288 s.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 656; 004.8, 004.942, 007.5, 51-7, 510.67

**О РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ
РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ВОЛГО-
БАЛТИЙСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА****Лукомская Ольга Юрьевна**

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

Селиверстов Святослав Александрович

Кандидат технических наук, научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Селиверстов Ярослав Александрович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Шаталова Наталья Викторовна

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
e-mail: shatillen@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке и тестированию алгоритма планирования расписания движения судов через систему судопропуска Волго-Балтийского судоходного канала. Результатами работы являются разработка блок-схем формирования предварительного расписания и расширенного алгоритма расписания прохождения судов по Волго-Балтийскому судоходному каналу, а так же алгоритм организации информационных потоков. Результаты тестирования представлены в виде матриц значений времен прохождения судов и графиков планируемого движения судов по Волго-Балтийскому судоходному каналу. Актуальность задачи подтверждается существующими стратегиями развития в области транспорта и сохранением устойчивого спроса на данные перевозки. Произведен анализ отечественных и зарубежных методов повышения качества планирования и управления движением судов по водным путям. Представлена характеристика Волго-Балтийского судоходного канала и ее особенности. Осуществлена разработка алгоритмов планирования расписания движения и произведено их тестирование. Описаны достоинства разработанной программной модели.

Ключевые слова: внутренний водный транспорт, управление движением судов по шлюзованным каналам, алгоритм планирования расписания, имитационное моделирование.

**ABOUT DEVELOPMENT AND TESTING OF THE SCHEDULE PLANNING
ALGORITHM ON THE VESSEL TRAFFIC VIA THE SYSTEM OF THE VOLGO-
BALTIC SHIPPING CHANNEL****OI'ga Yu. Lukomskaia**

Phd, Leading researcher,

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

Svyatoslav A. Seliverstov

Phd, Senior researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Yaroslav A. Seliverstov

Phd, Senior researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Natal'ya V. Shatalova

Phd, Leading researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel. (812) 321-95-68, e-mail: shatillen@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the development and testing of the schedule scheduling algorithm for vessels through the system of the passage of the Volga-Baltic Shipping Channel. The results of the work are the development of flowcharts for the formation of a preliminary schedule and an extended algorithm for the formation of a schedule of passage of vessels along the Volga-Baltic Shipping Canal, as well as an algorithm for organizing the flow of information flows. The results of the testing are presented in the form of matrices of the values of the passage times of vessels and schedules of the planned traffic of vessels along the Volga-Baltic Shipping Canal. The urgency of the task is confirmed by the existing development strategies in the field of transport and the preservation of a stable demand for these transportations. The analysis of domestic and foreign methods of improving the quality of planning and management of vessel traffic along waterways has been made. The characteristics of the Volga-Baltic Shipping Channel and its features are presented. Development of algorithms of planning of the schedule of the movement is carried out and their testing is made. The advantages of the developed software model are described.

Key words: inland waterway transport, ship traffic control through the gated channels, an algorithm of planning of the schedule, imitating modeling.

Введение

Внутренний водный транспорт (ВВТ) способствовал развитию зрелых экономик в мире на протяжении многих веков и создал множество торговых мостов между странами. В этом столетии он может помочь развивающимся странам достичь целей в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия [1], то есть выступить драйвером устойчивого развития. В частности в [2] отмечается, что ВВТ может помочь в достижении таких целей как: 1) искоренение крайней нищеты и голода посредством эффективного использования водных ресурсов и освоения транзитных транспортных систем; 2) обеспечение экологической устойчивости, так как из всех видов транспорта ВВТ оказывает наименьшее влияние на изменение климата и наименьшее воздействие на окружающую среду, имея при этом высокую энергоэффективность перевозок; 3) разработка Глобального партнерства в целях развития - посредством развития открытой, предсказуемой, основанной на правилах, справедливой торговой экономической системы. Таким образом, ВВТ обеспечивает безопасную, экологически устойчивую форму транспорта, которая является

ключевым элементом устойчивого экономического развития, а эффективное использование внутренних водных путей (ВВП) для перевозки пассажиров и грузов может снизить не только транспортную нагрузку на железнодорожные и автомобильные коммуникации [3, 4, 5], но и уровень парниковых газов [6].

Сегодня ведущие страны Европы и Азии, обладающие ресурсом ВВП, приступили к их ускоренному освоению и разработке региональных инициатив поддержки этой инфраструктурной области [7, 8, 9].

Согласно [10, 11] общая протяженность ВВП в мире приблизительно равна 550 тыс. км., а именно: Китай (110 тыс.), Россия (101,6 тыс.км), США (41 тыс.км), Бразилия (31 тыс. км). Однако уровень развития ВВТ определяется не столько протяженностью ВВП, сколько качеством их функционирования и размерами грузооборота.

Материалы Евростата [12, 13] указывают на устойчивый спрос перевозок по ВВП, данные о котором представлены в (табл. 1).

Таблица 1
Объем перевозок ВВТ по странам ЕС (млн. т.км.)

		2014			
		Q1	Q2	Q3	Q4
EU-28		37 126	36 021	38 353	38 492
Бельгия	BE	2 481	2 583	2 652	2 734
Болгария	BG	1 258	1 050	1 317	1 448
Чехия	CZ	8	5	7	7
Германия	DE	14 541	14 202	15 328	15 022
Франция	FR	2 107	2 209	2 154	2 333
Хорватия	HR	12	9	9	12
Люксембург	LU	77	65	71	70
Венгрия	HU	499	401	472	439
Нидерланды	NL	12 499	12 333	12 269	12 353
Австрия	AT	568	543	568	498
Польша	PL	18	27	34	30
Румыния	RO	2 816	2 367	3 247	3 330
Словакия	SK	240	227	224	215

Также нельзя не заметить актуальные планы стран Евросоюза по развитию инфраструктуры ВВП, о чем свидетельствуют последние исследования [14].

В России ВВТ является одной из важнейших частей транспортной системы, связывающей более 60 субъектов РФ, а также обеспечивающей экспортно-импортные транспортно-логистические сообщения в более чем 675 портов 45 стран Евросоюза, Африки и Азии. Актуальность развития ВВТ отмечена с приоритетом в существующих государственных стратегиях развития транспорта, таких как [15, 16].

В европейской части России активно функционирует Единая глубоководная система (ЕГС), длина которой составляет 6,5 тыс. км.

В соответствии с [17] к водным путям международного значения отнесены: Е-50, Е-60 и Е-90 к Российским водным путям международного значения также относятся Волго-Донской канал, Беломорско-Балтийский канал и Волго-Балтийский судоходный канал.

Ключевым элементом единой ЕГС Европейской части России принято считать [5, 15] Волго-Балтийский канал, ввиду своего географического и геоэкономического расположения, которое обеспечивает соединение водных путей, выходящих к Балтийскому, Белому, Каспийскому, Чёрному и Азовскому морям.

Территориальное положение и общая схема Волго-Балтийского судоходного канала представлена на (рис. 1).



Рис. 1. Схема Волго-Балтийского судоходного канала, согласно данным [18]
Динамика грузопотоков по Волго-Балтийскому водному пути в 2009–2013 гг., согласно [19] представлена в (табл. 2), положительна.

Таблица 2
Динамика объемов перевезенных грузов по Волго-Балтийскому водному пути, (млн. т.)

Объем перевезенных грузов	2009	2010	2011	2012	2013
От р.Волги к Балтике	9,9	11,6	12,2	10,9	10,5
От Балтики к р.Волге	6,8	6,8	9,9	11,5	11,4
Всего	16,7	18,4	22,1	22,4	21,9

Материалы программы развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020 года [19] указывают, что прирост судооборота за последние пять лет составил 31,1%, (рис.2).

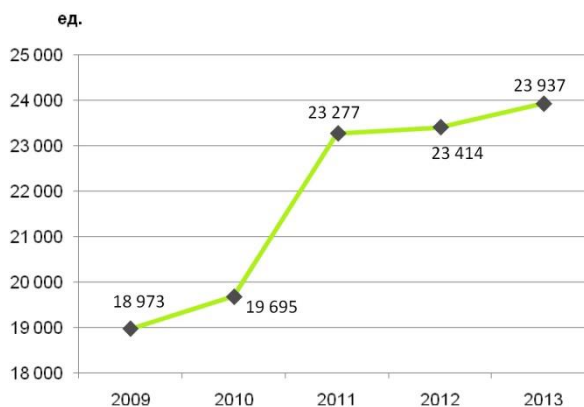


Рис. 2. Прирост судооборота

Таким образом, вышеизложенное позволяет сделать вывод, что задача повышения эффективности прохождения судов через Волго-Балтийский канал является актуальной.

Решение предлагается достичь за счет совершенствования алгоритмов регулирования, посредством которых реализуется судопропуск через Волго-Балтийский канал.

1. Анализ предметной области

Проблемам повышения качества планирования и управления движением судов по водным путям посвящено множество трудов российских и зарубежных ученых [20-27].

В [20] проанализированы факторы, оказывающие влияние на показатели безопасности движения судов при их прохождении по шлюзовым каналам.

Планирование расписания шлюзований, в зависимости от интенсивности движения судов, и принципы построения автоматической идентификационной системы для шлюзуемых судов рассмотрены в [21].

В [22] на примере паромного сообщения в заливе Сан-Франциско, показана имитационная модель для поддержки системы управления маршрутизацией судов и их взаимодействий с учетом увеличения численности последних. Данная модель так же позволяет повысить качество управления движением высокоскоростных паромов в условиях ограниченной видимости.

В [23] предложен подход к разработке технологии управления движением транспортных потоков в различных транспортных системах и произведена формализация таких базовых операций, как планирование, измерение и регулирование. Позднее в [24], с использованием данного подхода, осуществлена разработка имитационной модели оптимальной организации движения регулярных транспортных потоков в линейных транспортных коммуникациях.

Развитие метода планирования двунаправленного движения судов на Кильском канале посредством разработки комбинаторного алгоритма бесконфликтной маршрутизации представлено в [25].

В [26] разработан метод на основе Генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации и планирования движения судов с временным окном при осуществлении грузовых и промышленных перевозок. Данный метод решает проблему загрузки грузов с использованием судов различного типа в условиях большого числа клиентов и производит оптимизацию с учетом метода «поиск с запретами».

В [27] рассмотрена задача по совершенствованию системы управления движением транзитных судов в Стамбульском проливе в сложных условиях и разработана математическая модель планирования расписания, учитывающая тип судна и степень от риска перевозимого груза. Предложенный алгоритм позволяет планировать проход судов через пролив с наибольшим временем ожидания, в первую очередь, отдавая приоритет крупным судам, перевозящим опасный груз.

Таким образом, проведенный анализ подчеркивает высокую актуальность задач, связанных с совершенствованием методов и алгоритмов построения и регулирования расписаний движения судов по ВВП.

Сложность подобных задач во многом определяется географическими и технологическими особенностями ВВП и сопутствующей транспортной инфраструктурой, к числу которых относится и рассматриваемая в данной статье задача.

2. Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка и тестирование алгоритма планирования расписания обеспечивающего оптимальный процесс движения судов по Волго-Балтийскому судоходному каналу. Объектами управления являются суда, а параметром управления – время движения судов на всей протяженности водного пути, с учетом его особенностей.

Разрабатываемый алгоритмический комплекс, предполагает моделирование транспортных потоков по линейным коммуникациям с учетом сбережения временного ресурса и целевой функцией организации судопропуска в границах возможностей системы и минимизации материальных и финансовых вложений, а также позволяет решать задачи анализа, обработки и регулирования транспортного процесса.

Осуществим декомпозицию задач:

- 1) Сбор исходных данных.
- 2) Определение характеристик Волго-Балтийского судоходного канала.
- 3) Определение планируемого процесса движения судов с регламентированными допустимыми скоростями.
- 4) Разработка алгоритма предварительного расписания прохода судов.

5) Разработка алгоритма формирования расписания транспортного процесса для прохождения судов по трассе судопропуска.

6) Регулирование движения при возникновении различных конфликтных ситуаций.

7) Моделирование процесса движения судов (имитаций) с разными скоростями:

- выявление специфичности при создании динамического изображения транспортных потоков;

- задачи имитационного моделирования;

- программа визуализации транспортного процесса.

3. Характеристика Волго-Балтийского судоходного канала

Волго-Балтийский судоходный канал представляет собой сложный комплекс гидротехнических и инженерных объектов, включающий в себя, по данным [28], 4900 км. эксплуатируемых водных путей, 5 гидроэлектростанций, 11 шлюзов, 25 земляных плотин и дамб, 12 паромных переправ, 9 мостовых переходов, 8 маяков и 5000 знаков судоходной обстановки.

Трасса ВБСК как объект моделирования характеризуется следующими данными:

- 1) общей длиной трассы = 848 км;
- 2) количеством шлюзов (узлов обслуживания) = 9;
- 3) количеством фарватеров = 11;
- 3) расстоянием между шлюзами (км);
- 4) значениями допустимых скоростей движения судов на отдельных участках (км/ч);
- 5) среднестатистическим временем шлюзования = 45 мин;
- 6) интенсивностью движения;
- 7) пропускной способностью системы.

Основные сведения о трассе ВБСК приведены в (табл.3)

Таблица 3

Основные сведения о трассе Волго-Балтийского судоходного канала	
Название водомерных постов:	
Горный институт	
Ивановское	
Петрокрепость	
Свирица	
Лодейное поле	
Нижнесвирицкий шлюз нижний бьеф	
Нижнесвирицкий шлюз верхний бьеф	
Верхнесвирицкий шлюз нижний бьеф	
Верхнесвирицкий шлюз верхний бьеф	
Нимпелда	
Вознесенье	
Усть-Вытегра	
Шлюз №1 верхний бьеф	
Шлюз №2 верхний бьеф	
Шлюз №3 верхний бьеф	
Шлюз №4 верхний бьеф	
Шлюз №5 верхний бьеф	
Шлюз №6 нижний бьеф	
Шлюз №6 верхний бьеф	

Аненский мост Крохино Иванов Бор Шлюз №7 нижний бьеф Шлюз №7 верхний бьеф Череповец
Порты: С. -Петербург Череповец Важины
Пристани: Петрокрепость Свирица Лодейное Поле Подпорожье Вознесенье Вытегра Белозёрск
Мосты: река Малая Нева Тучков Строителей река Большая Нева Лейтенанта Шмидта Дворцовый. река Нева Кировский Литейный Охтинский Александра Невского Финляндский Володарский Кузьминский Ладожский. река Свирь Лодейнопольский Подпорожский.

Схема продольного профиля ВБСК с расположением гидротехнических объектов представлена на (рис. 3).

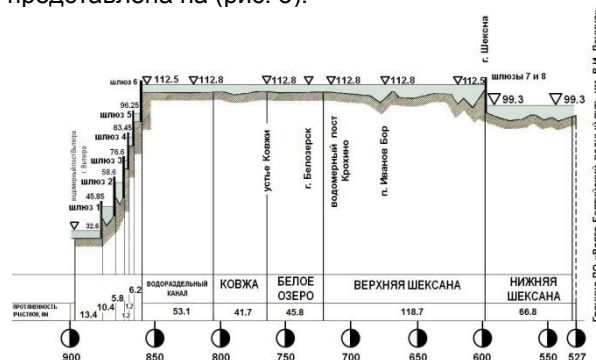


Рис. 3 Продольный профиль Волго-Балтийского канала

Особенностями данной трассы являются резкие изменения метеорологической обстановки на всей ее протяженности и сложные гидрологические условия в том числе: наличие стеснённых каменистых участков рек, сильные свальные течения, наличие узких мест при движении по каналам и фарватерам, наличие шлюзов и мостов (могут находиться в

наведённом и разведённом состоянии), что в конечном счете влечет за собой низкую скорость хода судов.

Наиболее затруднительными участками трассы являются мосты Санкт-Петербурга, перекаты «Кривое колено» и «Ивановские пороги», Кошкинский фарватер и Свирская губа Ладожского озера.

4. Разработка алгоритмов планирования

В основе алгоритма планирования согласованного движения лежит дискретно-линейная временная аппроксимация процесса движения судов по трассе ВБСК [23] по периоду квантования $T_0 = 45$ мин. (см. таблицу 4).

Таблица 4.

Время движения судов от шлюза к шлюзу по ВБСК

Название узла	$T_{\text{quant}} = T_0$	L_{ij}	V	T_{ij}
Речной вокзал	0:00			
1	0:00	18,00	8,00	2:15
Ивановские пороги	1:30	15,00	10,00	1:30
2	0:00	16,00	10,70	1:30
Кошкин фарватер	1:30	13,50	9,00	1:30
3	0:00	132,90	17,70	7:30
Чембовский фарватер	1:30	7,10	4,70	1:30
4	0:00	19,20	12,80	1:30
Томикский фарватер	1:30	4,50	3,00	1:30
5	0:00	37,90	12,60	3:00
Лодейно-Польский фарватер	1:30	2,00	1,30	1:30
6	0:00	13,70	9,10	1:30
Нижнесвирский шлюз	0:45			0:45
7	0:00	20,00	8,90	2:15
Толстовский фарватер	0:45	1,70	2,30	0:45
8	0:00	10,50	7,00	1:30
Важинский фарватер	0:45	1,50	2,00	0:45
9	0:00	2,50	3,30	0:45
Никольский фарватер	1:30	10,20	6,80	1:30
10	0:00	1,80	2,40	0:45

Название узла	$T_{\text{quant}} = T_0$	L_{ij}	V	T_{ij}
Верхнесвирский шлюз	0:45			0:45
11	0:00	5,80	7,70	0:45
Медведецкий фарватер	0:45	2,00	2,70	0:45
12	0:00	49,70	11,00	4:30
Пронинский фарватер	0:45	1,00	1,30	0:45
13	0:00	12,00	8,00	1:30
Затонный фарватер	0:45	1,50	2,00	0:45
14	0:00	5,00	6,70	0:45
Сухие пороги	0:45	3,00	4,00	0:45
15	0:00	10,00	6,70	1:30
Вознесенский фарватер	0:45	3,00	4,00	0:45
16 (Вытегорский буй)	0:00	54,20	18,10	3:00
17	0:00	15,30	10,20	1:30
(Шлюз 1)	0:45			0:45
18	0:00	10,50	7,00	1:30
(Шлюз 2)	0:45			0:45
19	0:00	5,80	7,70	0:45
(Шлюз 3)	0:45			0:45
20	0:00	1,20	1,60	0:45
(Шлюз 4)	0:45			0:45
21	0:00	1,20	1,60	0:45
(Шлюз 5)	0:45			0:45
22	0:00	6,00	8,00	0:45
(Шлюз 6)	0:45			0:45
23	0:00	263,10	11,70	22:30
(Шлюз 7)	0:45			0:45
24	0:00	67,80	11,30	6:00
М(в канал "Москва")	0:00			

В таблице 4: L – общая длина трассы = 848 км.; n – количество шлюзов = 9; i – участок шлюза; L_{ij} – расстояние до следующего шлюза, км; T_{quant} – среднестатистическое время шлюзования судов (шаг дискретизации) – $T_{\text{quant}} = T_0 = 45$ мин.; V – скорость движения на данном участке, км/ч; T – время движения, мин.; T_{ij} –

время движения судна до следующего шлюза, мин.

В диспетчерскую службу поступают заявки на прохождение трассы судопропуска. По ним составляется предварительное расписание движения судов, которое определяет квантованные временные точки входа в ВБСК – входные данные объекта моделирования. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 7. Тестирование алгоритма на рис. 10а и рис. 10б.

Блок-схемы, поясняющие решение задачи планирования транспортного процесса по ВБСК, представлены на рисунках 7–9

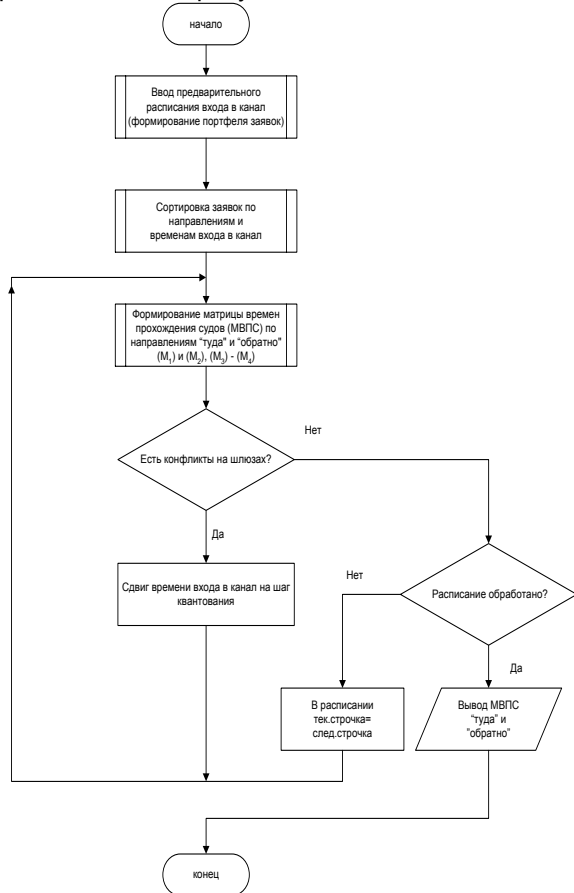


Рис. 7. Блок-схема формирования предварительного расписания прохода судов по ВБСК.

На рисунках 7-9: j – индекс шлюзов; $t \in [0, 24]$ – время движения судов по каналу, мин.; T_0 – шаг квантования (дискретизации), мин.; T_1 – таблица-расписание начала движения судов; T_2 – таблица-справочник времен прохождения судов от шлюза к шлюзу по ВБСК; P_1, P_2 – вспомогательные таблицы расписания времен выхода судов в канал; M_1, M_2 – матрицы квантованных значений времен прохождения судов через шлюзы, фарватеры, пороги и буи ВБСК по направлению, соответственно индекс “1” – направление движения “туда” «СПб–Москва» (→), “2” – “обратно” «Москва–СПб» (←); M_3 – матрица

значений времен свободности шлюзов; M_4 – матрица корреспонденции судов; Γ_1, Γ_2 – графики исполненного (планируемого) движения судов по направлениям.

Уже на этапе планирования можно представить схему организации движения информационных потоков в разрабатываемой имитационной модели (рисунок 9).

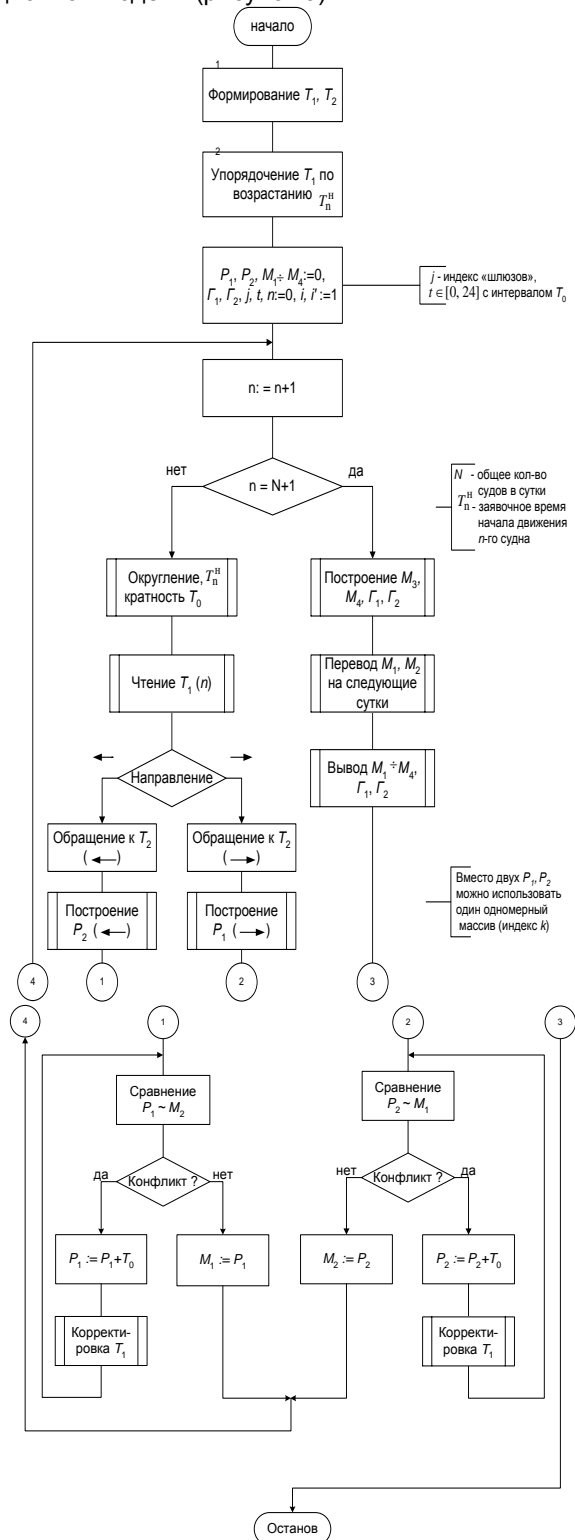
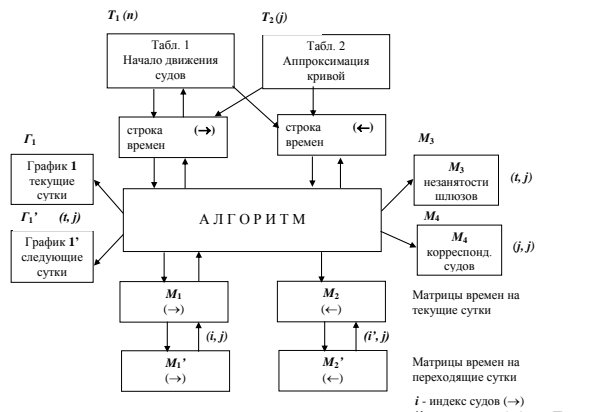


Рис.8. Блок-схема расширенного алгоритма формирования расписания транспортного процесса прохождения судов по ВБСК.



9. Схема движения информационных потоков в модели.

5. Результаты тестирования

Результатами тестирования являются рассчитанные на вторые сутки после начала навигации матрицы значений времен прохождения судов по направлению: а) Санкт-Петербург-Москва, б) Москва-Санкт-Петербург. Общий вид матриц представлен в виде скриншотов на (рис.10 а) и (рис. 10 б).

Имя судна	Имя судна								Имя судна								Имя судна												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
ИВ Шидана	0	3:15	8:15	13:15	18:15	23:15	28:15	33:15	38:15	43:15	48:15	53:15	58:15	63:15	68:15	73:15	78:15	83:15	88:15	93:15	98:15	103:15	108:15	113:15	118:15	123:15	128:15	133:15	138:15

Рис. 10а. Матрицы значений времен прохождения судов по направлению СПб-Москва на вторые сутки

Имя судна	Имя судна																Имя судна	Имя судна	Имя судна	Имя судна									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16													
ИВ Шидана	0	3:45	8:45	13:45	18:45	23:45	28:45	33:45	38:45	43:45	48:45	53:45	58:45	63:45	68:45	73:45	78:45	83:45	88:45	93:45	98:45	103:45	108:45	113:45	118:45	123:45	128:45	133:45	138:45

Рис. 10б. Матрицы значений времен прохождения судов по направлению Москва-Санкт-Петербург на вторые сутки

Розовым маркером окрашены планируемые значения прохождения судов на следующие сутки.

Наглядность транспортного процесса по Волго-Балтийскому судоходному каналу хорошо отражают графики планируемого движения судов (дискретизация по 24 точкам) на первые и последующие сутки. Общий вид графиков представлен в виде скриншотов (рис.11 а, б).

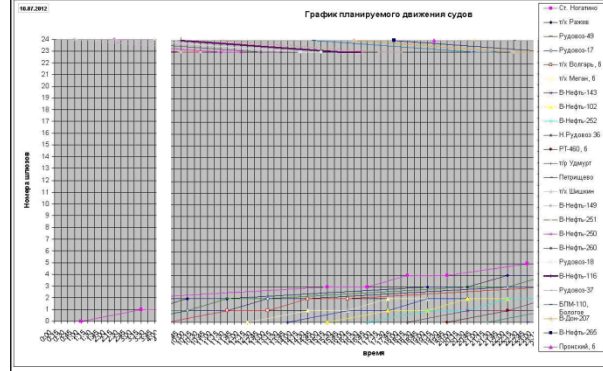


Рис. 11а. Графики планируемого движения судов по ВБСК на первые рассчитываемые сутки

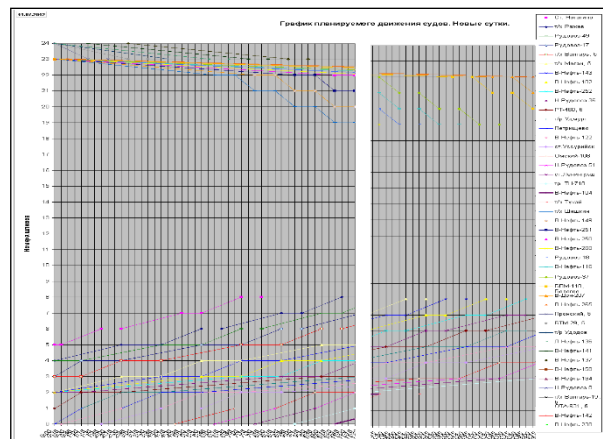


Рис. 11б. Графики планируемого движения судов по ВБСК на последующие сутки.

Представленная модель транспортного процесса позволяет запрограммировать оптимальное по временному и технологическому ресурсу функционирование шлюзовых механизмов Волго-Балтийского судопроезда.

Акватория реки Нева является частью трассы Волго-Балтийского судоходного канала, скорость движения судов на которой регламентирована лощманской службой Санкт-Петербурга. Исходя из этого, была вычислена скорость прохождения судов под мостами в таблице 5.

Пример расписания входа судов в Волго-Балтийский судоходный канал на участке реки Невы в Санкт-Петербурге от моста Лейтенанта Шмидта до Речного вокзала приведены в таблице 6 (с коррекцией).

Таблица 5.

Время движения судов от моста к мосту по акватории Невы

Название моста	Время прохода под мостом/ шаг дискретизации	Расстояние до следующего моста, км	Скорость движения на данном участке, км/ч	Время движения, час	Время движения, мин	Время разводки мостов		Время разводки мостов (2этап)	
0		0,333	10,00	0,033	0:02				
л-та Шмидта	0:02	1,167	10,00	0,117	0:07	1:40	4:55		
Дворцовый	0:02	1,167	10,00	0,117	0:07	1:35	2:55	3:15	4:50
Троицкий	0:02	1,167	10,00	0,117	0:07	1:50	4:50		
Литейный	0:02	4,167	10,00	0,417	0:25	1:50	4:40		
Петра Великого (ВО)	0:02	1,667	10,00	0,167	0:10	2:00	5:00		
Ал-ра Невского	0:02	1,167	10,00	0,117	0:07	2:20	5:05		
ж/д мост	0:02	4,667	10,00	0,467	0:28	2:30	5:10		
Володарский	0:02	0,333	10,00	0,033	0:02	2:00	3:45	4:15	5:45
Речной вокзал									
Время "допуска"	0:01								

Из таблицы видно, что предварительное расписание корректируется в зависимости от принятого шага дискретизации временной функции, описывающей движение транспортного объекта по заданной логманской службой траектории.

Таблица 6.

Время движения судов от моста к мосту по Неве

№ судна	Направление	Время		Дата
		заданное	рабочее	
В-Нефть-151	9	0:00	1:58	10.07
т/х Шишкин	1	0:15	1:38	10.07
В-Нефть-149	9	1:40	2:00	10.07
В-Нефть-150	9	2:20	2:30	10.07
Ст. Ногатино	1	3:15	3:15	10.07
ст. Ленинград	1	3:40	3:23	10.07
т/х Тукай	1	3:50	3:29	10.07
ст. Уссурийск	9	4:55	3:30	10.07
Н. Рудовоз 51	1	5:00	3:41	10.07
РТ-460, б	9	22:30	2:00	11.07
В-Нефть-122	1	23:30	2:34	11.07
ст. Уссурийск	1	0:30	3:31	11.07

Полученные результаты приведены на скриншотах рис. 12 (матрицы значений времен прохождения судов на 2 суток).

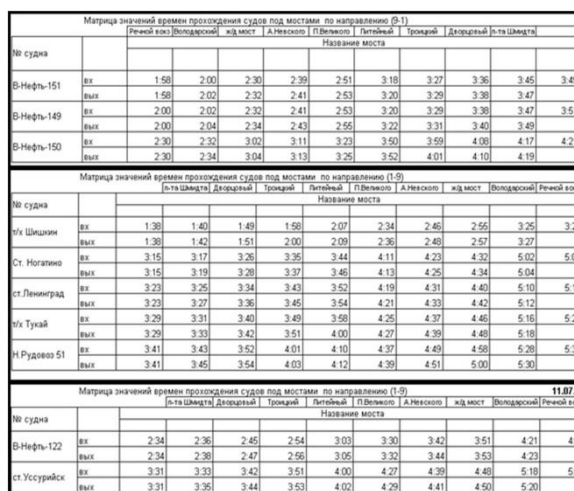


Рис. 12. Матрицы значений времен прохождения судов по акватории р. Невы на 2 суток.

Более подробно формирование графиков планируемого движения судов под мостами р. Невы Санкт-Петербурга описан в [29].

6. Выводы

В качестве объектов моделирования были выбраны трассы судопропуска Волго-Балтийского судоходного канала.

Структурирование знаний об объектах выполнялось по 7-ми основным технико-метрическим параметрам.

С точки зрения моделирования, наиболее сложной является трасса ВБСК (по сравнению с Волго-Донским судоходным каналом [23, 24]), имеющая большую протяженность и состоящая из большого числа шлюзов, фарватеров и порогов. Учитывался отрезок судоходной трассы с мостами в акватории реки Невы от моста Л.Шмидта (ныне Благовещенский) до Речного

вокзала, на котором скорость прохождения судов также ограничивается.

Полученное квантованное расписание прохода судов по трассе ВБСК следует использовать в качестве некоего плана или «предписания». При изменении времени шлюзования, потери скорости и прочих вмешательств в транспортный процесс, алгоритм регулирования, приведенный в [29-31], позволяет откорректировать первоначальное расписание за минимальное количество времени и

восстановить очередность и структурированность потока судов по каналу.

Модель решает диспетчерские задачи согласования во времени пространственного движения встречных транспортных потоков, обеспечивает повышение реальной пропускной способности системы обслуживания грузопотоков посредством автоматического расчёта и оперативной корректировки временных графиков движения транспортных средств.

Литература

1. The Millennium Development Goals Report 2005. United Nations New York, 2005. P.48. <https://unstats.un.org/unsd/mi/pdf/MDG%20Book.pdf>
2. S. Bonnerjee, A. Cann, H. Koethe, and ect. Inland Waterborne Transport: Connecting Countries. The United Nations World Water Assessment Programme. Insights. UNESCO 2009. P. 40. ISBN 978-92-3-104110-5. <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001817/181794e.pdf>
3. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 2 (30). С. 69-80.
4. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 83-92.
5. Белый О.В., Кокаев О.Г., Терехнев Л.В. Инновационное развитие внутренних водных путей. Транспорт Российской Федерации. 2009. № 3-4 (22). С. 54-57.
6. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO₂): учебное пособие/ СПбГТУРП.– СПб., 2014. – 52 с. – ISBN 978-5-91646-071-1
7. Sustainable Development of Inland Waterway Transport in China (Theme I of a World Bank Project: Comprehensive Transport System Analysis in China - P109989). The World Bank and the Ministry of Transport, People's Republic of China. 2009. P. 105. <http://siteresources.worldbank.org/EXTPRAL/Resources/china.pdf>
8. Waterborne Freight Transportation Bottom Line Report. The American Association of State Highway and Transportation Officials. June 2013.P. 114. <http://water.transportation.org/SiteCollectionDocuments/WFT-1.pdf>
9. Report of the STTP Waterborne Transport Stakeholders' Hearing. European commission. Directorate-general joint research centre. Brussels, March, 03, 2011. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/research/sttp/doc/waterborne.pdf>
10. Максаковский. В.П. Географическая картина мира. Пособие для вузов. Кн. I: Общая характеристика мира. Глобальные проблемы человечества. Дрофа. Москва 2008. С. 192. <http://fictionbook.ru/static/trials/00/18/31/00183195.a4.pdf>
11. Транспорт и связь в России. 2016: Стат.сб./Росстат. - М., 2016. - 112 с.
12. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Inland_waterways_freight_transport_-_quarterly_and_annual_data
13. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Inland_waterway_transport_statistics
14. Эглит Я.Я., Галин А.А. Особенности развития внутренних водных путей Европы. // Наука и транспорт. №1 (8) / 2014. С. 38-41.
15. Стратегия развития внутреннего водного транспорта до 2030 года (утв. распоряжением Правительства от 22 ноября 2008 года №1734-р.).
16. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. N 1734-р.).
17. Европейское соглашение о важнейших внутренних водных путях международного значения (СМВП). (Женева, 19 января 1996 года). <http://docs.cntd.ru/document/901784389>
18. <https://www.volgo-balt.ru/page/160>
19. Программа развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020_года Том 4. Подпрограмма «Внутренний водный транспорт» Утв. Координационным советом по развитию транспортной системы г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области 27 ноября 2015 г. Санкт-Петербург 2015. С. 26. https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwvjvlgH4uDUAhWDQJoKHWf5DIUQFgggMAA&url=http%3A%2F%2Fspbtrd.ru%2Flocal%2Ffiledownload.php%3Ffile_id%3D1627&usq=AFQjCNF3l7pvT07Qn4H5nTNJ5foQAUC4xA&cad=rjt
20. Каюда А.В, Колосов М.А. Разработка контрольно-информационной системы обеспечения безопасности судопропуска // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 2. С. 337-345.

21. Белоусов И.В. Формирование оптимального расписания движения судов через шлюз по критерию минимума времени простоя. Региональная информатика и информационная безопасность Сборник трудов. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. 2015. С. 508-511.
22. J.R.W. Merrick, J.R. Van Dorp, J.P. Blackford et al (2003) A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco bay using a maritime simulation model. *Reliability Engineering & System Safety*. 81(2):119–132pp.
23. Лукомская О.Ю., Трифанов В.Н. Об управлении движением транспортных потоков. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Автоматизация и управление. №5.– 2009. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. С. 39–44.
24. С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов, О.Ю. Лукомская, М.А. Асаул. Разработка имитационной модели управления прохождением судов через систему судопропуска Волго-Донского судоходного канала. *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. No 3(37) Т.3. С. 105-114
25. E.Lübbecke, M.E. Lübbecke, R.H. Möhring. Ship Traffic Optimization for the Kiel Canal. P.29. 11/28/2014. <http://www.or.rwth-aachen.de/research/publications/kiel-canal.pdf>
26. K. Al-Hamad, M. Al-Ibrahim and E. Al-Enezy, "A Genetic Algorithm for Ship Routing and Scheduling Problem with Time Window," *American Journal of Operations Research*, Vol. 2 No. 3, 2012, pp. 417-429. doi: 10.4236/ajor.2012.23050
27. Ö. S. Ulusçu, B. Özbaş, T. Altıok, İ. Or and A. Ö. Almaz. Transit Vessel Scheduling in the Strait of Istanbul. *The Journal of Navigation* (2009), 62, 59–77. doi:10.1017/S0373463308005092
28. http://map.infolot.ru/region_europe/sever_zapad/vgbu/vgbu.htm
29. О.Ю. Лукомская. Об имитационном моделировании процесса прохождения речными транспортными объектами системы внутренних водных путей в Санкт-Петербурге. ИКМ МТМТС -2017 – SCM MEMTS-2017. <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2017-76-79.pdf>
30. О.Ю. Лукомская. Система информационной поддержки планирования и регулирования транспортного процесса на внутренних водных путях. Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2007. № 10. С. 16-20.
31. Лукомская О.Ю. Модели и алгоритмы оптимальности регулярных транспортных потоков с использованием интеллектуальных систем управления судопропуском. Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 5. С. 34-37.

References

1. The Millennium Development Goals Report 2005. United Nations New York, 2005. P.48. <https://unstats.un.org/unsd/mi/pdf/MDG%20Book.pdf>
2. S. Bonnerjee, A. Cann, H. Koethe, and ect. Inland Waterborne Transport: Connecting Countries. The United Nations World Water Assessment Programme. Insights. UNESCO 2009. P. 40. ISBN 978-92-3-104110-5. <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001817/181794e.pdf>
3. Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A. Modelirovanie transportny'x potokov megapolisa s vvodom novy'x vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskogo transporta. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2015. № 2 (30). S. 69-80.
4. Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. Primenenie metoda imitacionogo modelirovaniya dlya ocenki effektivnosti novy'x vidov gorodskogo passazhirskogo transporta. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2015. № 3 (31). S. 83-92.
5. Belyj O.V., Kokaev O.G., Terebnev L.V. Innovacionnoe razvitie vnutrennix vodny'x putej. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2009. № 3-4 (22). S. 54-57.
6. Belousov V.N., Smorodin S.N., Lakomkin V.Yu. E'nergoberezenie i vy'brosy' parnikovyx gazov (SO2): uchebnoe posobie/ SPbGTURP.– SPb., 2014. – 52 s. – ISBN 978-5-91646-071-1
7. Sustainable Development of Inland Waterway Transport in China (Theme I of a World Bank Project: Comprehensive Transport System Analysis in China - P109989). The World Bank and the Ministry of Transport, People's Republic of China. 2009. P. 105. <http://siteresources.worldbank.org/EXTPRAL/Resources/china.pdf>
8. Waterborne Freight Transportation Bottom Line Report. The American Association of State Highway and Transportation Officials. June 2013.P. 114. <http://water.transportation.org/SiteCollectionDocuments/WFT-1.pdf>
9. Report of the STTP Waterborne Transport Stakeholders' Hearing. European commission. Directorate-general joint research centre. Brussels, March, 03, 2011. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/research/sttp/doc/waterborne.pdf>
10. Maksakovskij. V.P. Geograficheskaya kartina mira. Posobie dlya vuzov. Kn. I: Obshhaya xarakteristika mira. *Global'ny'e problemy' chelovechestva. Drofa*. Moskva 2008. С. 192. <http://fictionbook.ru/static/trials/00/18/31/00183195.a4.pdf>
11. *Transport i svyaz' v Rossii*. 2016: Stat.sb./Rosstat. - M., 2016. - 112 s.
12. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Inland_waterways_freight_transport_-_quarterly_and_annual_data
13. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Inland_waterway_transport_statistics
14. E'glit Ya.Ya., Galin A.A. Osobennosti razvitiya vnutrennix vodny'x putej Evropy'. // *Nauka i transport*. №1 (8) / 2014. S. 38-41.
15. Strategii razvitiya vnutrennego vodnogo transporta do 2030 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva ot 22 noyabrya 2008 goda №1734-r.).

16. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 22 noyabrya 2008 g. N 1734-r).
17. Evropejskoe soglasenie o vazhnejshix vnutrennix vodny'x putyax mezhdunarodnogo znacheniya (SMVP). (Zheneva, 19 yanvary 1996 goda). <http://docs.cntd.ru/document/901784389>
18. <https://www.volgo-balt.ru/page/160>
19. Programma razvitiya transportnoj sistemy' Sankt-Peterburga i Leningradskoj oblasti na period do 2020_goda Tom 4. Podprogramma «Vnutrennij vodnyj transport» Utv. Koordinacionny'm sovetom po razvitiyu transportnoj sistemy' g. Sankt-Peterburga i Leningradskoj oblasti 27 noyabrya 2015 g. – S. Peterburg 2015. S
https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwvjvGI6H4uDUAhWDQJoKHwf5DIUQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fspbtrd.ru%2Flocal%2Ffiledownload.php%3Ffile_id%3D1627&usg=AFQjCNF3I7pvT07Qn4H5nTNJ5foQAUC4xA&cad=rjt
20. Kayuda A.V., Kolosov M.A. Razrabotka kontrol'no-informacionnoj sistemy' obespecheniya bezopasnosti sudopropuska // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 2. S. 337-345.
21. Belousov I.V. Formirovanie optimal'nogo raspisaniya dvizheniya sudov cherez shlyuz po kriteriyu minimuma vremeni prostoya // Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost' Sbornik trudov. Sankt-Peterburgskoe Obshhestvo informatiki, vychislitel'noj tekhniki, sistem svyazi i upravleniya. 2015. S. 508-511.
22. J.R.W. Merrick, J.R. Van Dorp, J.P. Blackford et al (2003) A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco bay using a maritime simulation model. Reliability Engineering & System Safety. 81(2):119–132pp.
23. Lukomskaya O.Yu., Trifanov V.N. Ob upravlenii dvizheniem transportny'x potokov. Izvestiya SPbGE'TU «LE'TI». Avtomatizaciya i upravlenie. №5.– 2009. – SPb.: SPbGE'TU «LE'TI». 2009. S. 39–44.
24. S.A. Seliverstov, YA.A. Seliverstov, O.YU. Lukomskaya, M.A. Asaul. Razrabotka imitacion-noj modeli upravleniya prohozhdeniem sudov cherez sistemu sudopropuska Volgo-Donskogo sudohodnogo kanala. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2017. No 3(37) T.3. S. 105-114
25. E.Lübbecke, M.E. Lübbecke, R.H. Möhring. Ship Traffic Optimization for the Kiel Canal. P.29. 11/28/2014. <http://www.or.rwth-aachen.de/research/publications/kiel-canal.pdf>
26. K. Al-Hamad, M. Al-Ibrahim and E. Al-Enezy, "A Genetic Algorithm for Ship Routing and Scheduling Problem with Time Window," American Journal of Operations Research, Vol. 2 No. 3, 2012, pp. 417-429. doi: 10.4236/ajor.2012.23050
27. Ö. S. Ulusçu, B. Özbaş, T. Altıok, İ. Or and A. Ö. Almaz. Transit Vessel Scheduling in the Strait of Istanbul. The Journal of Navigation (2009), 62, 59–77. doi:10.1017/S0373463308005092
28. http://map.infoflot.ru/region_europe/sever_zapad/vgbu/vgbu.htm
29. O.Yu. Lukomskaya. Ob imitacionnom modelirovanii processa prohozhdeniya rechnymi trans-portnymi ob'ektami sistemy vnutrennih vodnyh putej v Sankt-Peterburge. IKM MTMTS -2017 – SCM MEMTS-2017. <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2017-76-79.pdf>
30. O.Yu. Lukomskaya. Sistema informacionnoj podderzhki planirovaniya i regulirovaniya transportnogo processa na vnutrennih vodnyh putyax. Izvestiya SPbGEHTU "LEHTI". 2007. № 10. S. 16-20.
31. Lukomskaya O.Yu. Modeli i algoritmy' optimal'nosti regulyarny'x transportny'x potokov s ispol'zovaniem intellektual'ny'x sistem upravleniya sudopropuskom. Izvestiya SPbGE'TU "LE'TI". 2014. № 5. S. 34-37.

УДК 534.222:623.98:004.93'1

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИЗНАКОВ ПОЛЕЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Валерий Александрович Пятакович

кандидат технических наук, доцент
начальник научно-исследовательской лаборатории
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6
e-mail: pva.877com@mail.ru

Анна Михайловна Василенко

кандидат технических наук
научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6
e-mail: kahunya@gmail.com

Виктория Феликсовна Рычкова

старший преподаватель кафедры управления морским транспортом
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а,
e-mail: rychkova@msun.ru

Аннотация

В статье представлен способ формирования радиогидроакустической системы мониторинга и идентификации признаков полей, генерируемых источниками в морской среде, с концентрацией измеряемой информации в аналитической центре. Система формируется как пространственно-развитая и соизмеримая с протяженностью контролируемой акватории. Работа системы основана на закономерностях нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования излучаемых просветных волн с измеряемыми информационными волнами при их совместном распространении в морской среде. Специальная спектральная обработка сигналов позволяет выделять из них признаки полей объектов. Указанные отличительные особенности предполагают разработку и реализацию новых измерительных технологий и технических решений в способе формирования и применения системы мониторинга и идентификации признаков полей объектов. Перспективной задачей научно-технических исследований авторов статьи является построение нейро-экспертной системы распознавания и автоматизированного управления, входящей в структуру системы мониторинга и идентификации, на основе разработанных авторами архитектур искусственных нейронных сетей и методики их обучения для решения задач оперативного распознавания и классификации признаков информационных полей источников.

Ключевые слова: система мониторинга; морская среда; идентификация признаков объектов; образы объектов; нечёткая логика; нейронные сети; акустические сигналы; автоматизированное управление.

NEW TECHNOLOGIES TO BUILD A SYSTEM FOR THE MONITORING AND IDENTIFICATION OF SIGNS OF FIELDS BELONGING TO SEAWATER OBJECTS

Valeriy A. Pyatakovich

Associate Professor, Cand. Sci. Tech.
Chief of research laboratory
The Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
Kamskiy, 6, Vladivostok, 690062, Russia Federation
e-mail: pva.877com@mail.ru

Anna M. Vasilenko

Cand. Sci. Tech.
Research scientist
The Pacific Higher Naval College named after Admiral Makarov
Kamskiy, 6, Vladivostok, 690062, Russia Federation
e-mail: pva.877com@mail.ru

Victoria F. Rychkova

Head of research management and innovation
Maritime state university named Admiral Nevelskoi
Verkhneportovaya, 50 – a, Vladivostok, 690059, Russia Federation
e-mail: rychkova@msun.ru

Abstract

The paper presents an approach to build a radio-hydroacoustic system for the monitoring and identification of signs of fields generated by sources in a seawater medium, with measurements accumulated at the analytical center. The system is built as spatially developed and commensurable with the length of the controlled seawater area. The operation of the system is based on the regularities of the non-linear interaction and parametric conversion of the emitted low-frequency waves with measured information waves during their simultaneous propagation in a seawater medium. The specific spectral processing of signals allows to pick out from them the signs of object fields. These distinctive features imply the development and implementation of the new measurement technologies and technical solutions regarding the way the system for the monitoring and identification of signs of object fields should be built and used. The long-term objective of the scientific and technical research by the paper authors is to build a neuro-expert recognition and automated control system within the framework of the monitoring and identification system, based on the architectures of artificial neural networks and their training methods developed by the authors, to solve the problems of operational recognition and classification of information fields from sources.

Key words: monitoring system; the seawater medium; identification of object signs; object images; fuzzy logic; neural networks; acoustic signals; automated control.

Введение

Принцип работы параметрических антенн основан на использовании естественных нелинейных свойств морской среды. Первоначально, накачка морской среды была только акустическая и высокочастотная, частота излучаемых сигналов составляла десятки, чаще сотни килогерц.

Общими недостатками параметрических антенн и измерительных систем, работа которых основана на высокочастотной акустической накачке среды, являются – малая дальность параметрического приема волн, составляющая сотни метров и только в отдельных случаях единицы километров, и ограниченная возможность измерения их пространственно-временных характеристик, что особенно проявляется при приеме волн инфразвукового и дробного диапазонов частот. Указанные недостатки высокочастотных параметрических антенн обусловлены малым объемом и ограниченной протяженностью зоны нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки и измеряемых информационных волн объектов в морской среде.

Устранение указанных недостатков получается достичь в параметрических системах с низкочастотной накачкой морской среды [1, 2], обеспечивающих эффективное наблюдение на дальних дистанциях акустически слабозаметных объектов и неоднородностей морской среды.

1. Цель и отличительные особенности исследования

Предлагаемый способ формирования и применения радиогидроакустической системы [3] должен обеспечивать сбор, анализ многоканально принимаемой информации,

распознавание и классификацию полей объектов и неоднородностей морской среды, а также выработку команд управления работой системы в соответствии с задачами и условиями мониторинга акваторий. Подстройка согласованного режима работы излучающего и приемного трактов системы к изменяющимся условиям среды распространения волн и к проявлениям признаков источников информационных волн решается путем введения в структуру системы Единого информационно-аналитического центра (ЕИАЦ), а также нейро-экспертной системы распознавания и автоматизированного управления. Линии нейросетевого анализа обеспечивают возможность предварительного распознавания и классификации источников, формирующих в морской среде поля различной физической природы. Блок итогового анализа в ЕИАЦ обеспечивает получение вывода о степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации на основе оперативно обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм объектов с участием оператора [4].

В совокупности, указанные отличительные особенности предполагают разработку и реализацию в способе формирования и применения радиогидроакустической системы мониторинга и идентификации признаков полей новых измерительных технологий и технических решений.

2. Способ формирования системы

Способ формирования и применения радиогидроакустической системы мониторинга и идентификации признаков полей, генерируемых источниками в морской среде, включает в себя формирование просветной параметрической системы, а именно – в морской среде размещают

излучатели и приемные преобразователи, морскую среду озвучивают низкочастотными акустическими сигналами стабильной частоты в диапазоне десятки–сотни герц и формируют в ней зоны нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных и измеряемых информационных волн различной физической природы. Далее подводными преобразователями осуществляется параметрический прием широкополосных сигналов. Посредством кабельных линий сигналы передают в приемный тракт, где сигналы усиливают в полосе параметрического преобразования и обрабатывают тремя линиями корреляционного анализа и одной линией спектрального анализа.

Параметрическую антенну (зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных и измеряемых информационных волн различной физической природы) формируют в морской среде как пространственно-развитую и многолучевую [5]. Для чего используют три ненаправленных излучателя, которые располагают в центре обследуемого участка акватории и устанавливают по глубине на оси подводного звукового канала (ПЗК), выше и ниже оси ПЗК, а одинаковые по структуре приемные блоки размещают по глубине аналогично излучателям. При чем каждый приемный блок формируют из трех акустических преобразователей, которые располагают по вершинам треугольников, основания которых размещают на одной вертикали, а вершины, противоположные основаниям, обращают к соответствующим излучателям.

Просветную параметрическую систему формируют как комплекс пространственно-развитых, многолучевых параметрических антенн, расположенных по кругу или периметру обследуемой акватории через 45° и ориентированных от центра к периферии, а приемные блоки формируют как дискретные антенны, у которых расстояния между преобразователями (гидрофонами) устанавливают в соответствии с корреляционными характеристиками вертикальной структуры акустического поля.

3. Анализ многоканально принимаемой информации

Линии корреляционного анализа широкополосных сигналов обеспечивают измерение углов прихода сигналов от источников информационных волн на приемные блоки в вертикальной плоскости. Для определения области пересечения звуковых лучей в морской среде выполняется расчет обратной лучевой картины в блоках анализа выделяемой всеми линиями информации по специально разработанной программе [6, 7].

Линия спектрального анализа определяет признаки измеряемых волн с учетом частотно-временного и параметрического преобразования

сигналов [8, 9]. Спектральная обработка сигналов включает в себя следующие операции:

- перенос пространственно-временного масштаба сигнала разности фаз в высокочастотную область с учетом частоты выделяемых дискретных составляющих и нижней границы диапазона анализатора спектров. Это обеспечивает соответствующее масштабу преобразования увеличение концентрации энергии просветных сигналов и эффективность выделения из них признаков полей, формируемых объектами;

- выделение дискретных составляющих суммарной или разностной частоты в узкополосных спектрах преобразованных сигналов разности фаз, по которым восстанавливают характеристики измеряемых волн объектов и среды.

Операции распознавания и классификации источников, формирующих в морской среде информационные поля, выполняются на базе нечеткой логики искусственных нейронных сетей, как в автоматическом режиме, так и с участием оператора. Для распознавания и классификации подводных технических источников информационных полей наиболее пригодна архитектура сети трехслойного персептрона, которая обучается методом обратного распространения ошибки. Для классификации надводных объектов наиболее пригодна архитектура комбинированной распознающей сети, состоящая из сетей Кохонена (конкурирующая сеть) и Гроссберга. Уверенное распознавание (классификация) происходит при зашумленности входного сигнала порядка более 5 дБ. Следует отметить, что как для надводного, так и для подводного объекта нечеткая сеть ANFIS производит более качественное распознавание (классификацию) зашумленного сигнала, а в области от 5 дБ и более работает как сети Персептрон и Кохонена–Гроссберга [10].

4. Результаты экспериментов

В экспериментах исследовалась возможность формирования в морской среде волн суммарной и разностной частоты, а также дальний параметрический прием информационных сигналов [11].

На первом этапе были выполнены морские измерения близкие к лабораторным. Излучатель (преобразователь) и приемник (гидрофон) просветных акустических сигналов опускались с носа и кормы заякоренного судна и посредством экранированного кабеля соединялись с лабораторным излучающим и приемным трактами. Протяженность просветной линии составляла 100 м. В качестве излучателя электромагнитных волн использовался электромагнитный вибратор.

Принимаемые сигналы подсветки усиливались, затем с помощью узкополосного анализатора выделялись их спектры, которые регистрировались на самописце. При измерениях

были проверены различные варианты соотношения частот акустических просветных и модулирующих электромагнитных волн. Проведенными измерениями была подтверждена закономерность эффективного взаимодействия акустических и электромагнитных волн при их совместном распространении в морской среде. При этом подтверждена основная закономерность параметрического взаимодействия волн, а именно – интенсивность параметрического взаимодействия сигналов повышается с уменьшением разности частот взаимодействующих волн, т.е. увеличивается как уровень сформированных параметрических составляющих, так и количество их гармоник.

Экспериментальные исследования закономерности нелинейного взаимодействия акустических (просветных) и электромагнитных (информационных) волн в пресной воде проводились в гидроакустическом бассейне объемом $15 \times 7,5 \times 6 \text{ м}^3$. При измерениях были проверены различные варианты соотношения частот акустических просветных и модулирующих электромагнитных волн. Результаты эксперимента показали, что в пресной (непроводящей) воде нелинейное взаимодействие упругих и электромагнитных волн отсутствует, что ограничивает возможности практического применения просветной гидролокации в пресных водоемах.

На втором этапе были проведены морские исследования по проверке измерительных технологий дальнего параметрического приема волн на гидроакустических трассах различной протяженности. Они подтвердили теоретические предпосылки по взаимодействию акустических и электромагнитных волн в проводящей морской среде и дальнему параметрическому приему волн в условиях помех среды, основанному на закономерностях нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн.

Сравнительная оценка эффективности применения гидроакустических станций в штатном (линейном) и параметрических (с использованием акустической и электромагнитной накачки среды) режимах показала, что использование электромагнитной накачки среды повысило, относительно акустической накачки среды, чувствительность и помехоустойчивость приема информационных сигналов.

В морских натуральных экспериментах в качестве излучателей были применены: подводные звуковые маяки наведения типа «ПЗМ-400», пьезокерамические кольца, закрепленные на донных конструкциях, и специальные преобразователи «ИНЗА». Многоэлементные приемные блоки, как направленные корреляционные системы, формировались из протяженных дискретных антенн.

При спектральной обработке материалов экспериментов использовалась новая, отличная от классической, обработка принимаемых просветных сигналов, позволяющая выделять из них признаки информационных волн объектов малых амплитуд.

Заключение

Система мониторинга и идентификации полей различной физической природы, генерируемых источниками в морской среде, реализуется существующими средствами излучения и приема сигналов низкой стабильной частоты. Измерительные технологии и технические решения реализующие способ формирования и применения системы подтверждены морскими испытаниями макетов экспериментальных систем на трассах различной протяженности в морях Дальневосточного региона. Способ и реализующая его система промышленно применима, так как для ее создания используются распространенные компоненты и изделия радиотехнической промышленности и вычислительной техники.

Применение аппарата нечеткой логики искусственных нейронных сетей позволяет решать задачи распознавания и классификации объектов по признакам их полей, как в автоматическом режиме, так и с участием оператора. Комплекс вычислительных операций нейронных сетей позволяет проводить операцию распознавания источников формирования измеряемых информационных волн путем анализа ненадежных и слабо формализованных входных данных, а также в условиях неполной и нечеткой входной информации. Получение вывода о степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации выполняется с учетом оперативно обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм объектов.

Литература

1. Василенко А.М., Мироненко М.В., Пятакович В.А. и др. Система мониторинга полей источников атмосферы, океана и земной коры на основе технологий нелинейной просветной гидроакустики: монография. – Владивосток: ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 2015. – 320 с.
2. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Чудаков А.И. др. Просветная радиогидроакустическая система мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры в морской среде. Датчики и системы, 2016. № 8-9 (206). С. 9-13.
3. Патент 2593673 РФ. Радиогидроакустическая система параметрического приема волн источников атмосферы, океана и земной коры в морской среде / М.В. Мироненко, А.М. Василенко, В.А. Пятакович. Оpubл. 10.08.16. Бюл. № 22.
4. Василенко А.М., Пятакович В.А., Мироненко М.В. и др. Мониторинг, нейросетевой анализ и классификация

- полей, генерируемых подводными техническими источниками. Естественные и технические науки, 2017. №9(111). С. 62-70. ISSN 1684-2626
5. Василенко А.М., Пятакович В.А. Расчет пространственной структуры многолучевой параметрической антенны программными модулями системы комплексного морского мониторинга. Труды III международной научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок». Пенза, 2017, С. 50-62.
 6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016616822 РФ, Расчет лучевой картины / Василенко А.М., Пятакович В.А., Алексеев О.А.; 2016.
 7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015616755 РФ, Определение координат источников вторичного гидроакустического поля / Долгих В.Н., Василенко А.М., Линник И.А.; 2015.
 8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2017. – 255 с. ISBN 978-5-8343-1066-2.
 9. Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А. Обнаружение и распознавание источников гидрофизических и геофизических полей, измеряемых в морской среде. Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 1(30) – С. 16-19.
 10. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. – 190 с. ISBN 978-5-7444-3790-9.
 11. Мироненко М.В., Пятакович В.А., Василенко А.М. Результаты экспериментальных исследований способа определения профиля морского объекта и реализующей его системы. Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 2(31) – С. 64-69.

References

1. Vasilenko A.M., Mironenko M.V., Pyatakovich V.A. System for monitoring of the sources fields of the atmosphere, ocean and Earth's crust based on technologies of nonlinear low-frequency hydroacoustics. Vladivostok, TOVVMU Publ., 2015. 320 p.
2. Malashenko A.E., Mironenko M.V., Chudakov A.I. and other. Low-frequency radio-hydroacoustic system for monitoring of the atmosphere, ocean and Earth's crust fields in the marine environment. Sensors and systems, 2016, 8-9 (206), pp. 9-13.
3. Patent 2593673 of the Russian Federation. Radio-hydroacoustic system of parametric reception of the waves sources of atmosphere, ocean and earth's crust in the marine environment. M.V. Mironenko, A.M. Vasilenko, V.A. Pyatakovich, publ. 10.08.16, bul. No. 22.
4. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Mironenko M.V. and other. Monitoring neural network analysis and classification of fields generated by underwater technical sources. Natural and technical sciences, 2017, 9(111), pp. 62-70. ISSN 1684-2626
5. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Calculation of the spatial structure of the multi-beam parametric antenna by the software modules of the integrated marine monitoring system. Proceedings of the III International conference «The results of modern scientific research and development». Penza, 2017, pp. 50-62.
6. Certificate of official registration of the computer program No. 2016616822 RF, Calculation of beams trajectories / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Alekseev O.A.; 2016.
7. Certificate of official registration of the computer program No. 2015616755 RF, Determination of the coordinates of the sources of the secondary hydroacoustic field / Dolgikh V.N., Vasilenko A.M., Linnik I.A.; 2015.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Khotinsky O.V. Pattern recognition and classification of the sources of the fields formation of the different physical nature in the marine environment. Vladivostok, Maritime State University named after G.I. Nevelskogo Publ., 2017. 255 p. ISBN 978-5-8343-1066-2.
9. Mironenko M.V., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Detection and recognition of sources of hydrophysical and geophysical fields measured in the sea meadium. Monitoring. Science and Technology, 2017, 1(30), pp. 16-19.
10. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Technologies of non-linear low-frequency hydroacoustics and neuro-fuzzy operations in problems of marine objects recognition. Vladivostok, FEFU Publ., 2016. 190 p. ISBN 978-5-7444-3790-9.
11. Mironenko M.V., Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Experimental research results to develop a method for sea objects profiling and a system to implement it. Monitoring. Science and Technology, 2017, 2(31), pp. 64-69.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 62-83:629.584

**УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПЛАВАТЕЛЬНОГО АППАРАТА****Яна Богдановна Волянская**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования судов и информационной безопасности

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
54000, Николаев, пр-т Героев Украины, 9
e-mail: yanavolyanskaya@gmail.com**Сергей Михайлович Волянский**кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и информационной безопасности
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова54000, Николаев, пр-т Героев Украины, 9
e-mail: vffogres@gmail.com**Олег Анатольевич Онищенко**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации флота

Национальный университет «Одесская морская академия»

65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8
e-mail: oleganaton@gmail.com**Аннотация**

Представлена методика уточнения известных, построенных на основе выражений Парка-Горева, математических моделей асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором малой мощности, позволяющая простыми средствами учесть зависимости изменения насыщения главной цепи намагничивания, изменения сопротивления ротора в функции скольжения, а также потери в стали. Показано, что этого достаточно для эффективного анализа и синтеза систем управления асинхронным двигателем в условиях переменных частоты и амплитуды питающего напряжения, обеспечивающих диапазон регулирования скоростей $D \leq 20$, что требуется для систем электродвижения автономных плавательных аппаратов. Одной из особенностей методики является предварительный этап настройки математической модели на номинальный режим работы асинхронного двигателя с уточнением ряда параметров (схемы замещения, потокосцепления, токов, КПД и т. д.). Верификация математической модели асинхронного двигателя проведена на основе паспортных данных и экспериментальных процессов пуска АД типа АО2-12-4.

Ключевые слова: автономный плавательный аппарат, кривая намагничивания, математическая модель, потери в стали, трехфазный асинхронный электродвигатель, частичная нагрузка.

**UPDATE OF THE PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE
THREE-PHASE ASYNCHRONOUS INDUCTION MOTOR OF THE
ELECTRONIC MOVEMENT SYSTEM OF THE AUTONOMOUS FLOATING
VEHICLE****Yana B. Volyanskaya**the associate professor, Candidate of Technical Science
the Associate Professor of department of electrical equipment of ships and information security
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Heroiv Ukrainy Ave., 9, Nikolaev, 54000, Ukraine
e-mail: yanavolyanskaya@gmail.com**Serhey M. Volyanskiy**Candidate of Technical Science
the associate professor of department of electrical equipment of ships and information security
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Heroiv Ukrainy Ave., 9, Nikolaev, 54000, Ukraine

e-mail: vffogres@gmail.com

Oleg A. Onishchenko

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of technical operation of the fleet
Odessa National Maritime Academy
Didrikhson Str., 8, Odessa, 65029, Ukraine
e-mail: oleganaton@gmail.com

Abstract

The technique of refinement of mathematical models of induction motors with a short-circuited low-power rotor, which allows one to take into account the dependence of saturation variation of the main magnetizing circuit, changes in rotor resistance as a function of slip, and also losses in steel are presented. It is shown that this is sufficient for efficient analysis and synthesis of induction motor control systems in conditions of variable frequency and amplitude of the supply voltage, providing a range of speed control $D \leq 20$, which is required for electromotive systems of autonomous swimming vessels. One of the features of the technique is the preliminary stage of setting up a mathematical model for the nominal operating mode of an asynchronous motor with the refinement of a number of parameters (substitution schemes, current-coupling, currents, efficiency, etc.). Verification of the mathematical model of the asynchronous motor was carried out on the basis of passport data and experimental processes of starting induction motor type AO2-12-4.

Key words: autonomous floating vehicle, magnetization curve, mathematical model, loss in steel, three-phase induction motor, partial load.

Введение

Современный уровень развития компьютерных технологий позволяет создавать высокоэффективные модели объектов управления любой сложности, в том числе и электромеханических, с учетом всевозможных связей между отдельными компонентами, с учетом особенностей конструкции и требуемых алгоритмов управления. Системы электродвижения автономных плавательных аппаратов (АПА), построенные на основе трехфазных асинхронных электродвигателей (АД) с регуляторами напряжения и/или частоты, также должны проектироваться с использованием компьютерных технологий. Понятно, что при этом верифицированные имитационные модели, способствуют снижению стоимости системы электродвижения АПА, что особенно важно при их серийном производстве, их различной номенклатуре и назначении.

Один из основных элементов системы электродвижения АПА – трехфазный асинхронный электродвигатель. Особенности АД малой мощности (до 7,5 кВт) являются значительные, по сравнению с электрическими машинами большей мощности, магнитные потери или потери в стали. Пренебрежение этими потерями может привести к существенным погрешностям расчетов [1, 4]. Понятно, что для повышения точности моделирования и адекватности имитационных моделей АД гребного винта АПА их реальным физическим аналогам, также необходимо учитывать нелинейность магнитопровода статора АД, изменениях нагрузки на валу и другие.

Исходя из анализа ряда источников [2, 9, 11], можно заключить, что имитационные ММ АД гребного винта, как одного из основных элементов системы электродвижения АПА, должны отвечать следующим требованиям.

1. Модели должны позволять проводить оценку статических, динамических и энергетических системы электродвижения АПА с необходимой точностью и адекватностью реальному физическому аналогу. Для удовлетворения данному требованию необходима реализация имитационных и физических моделей систем электропривода с последующим их сопоставлением (верификацией).

2. Модели должны быть реализованы в программной среде с использованием модульного принципа построения. Это требование хорошо согласуется с физическим представлением асинхронного электропривода, состоящего из отдельных модулей: источника энергии (выпрямителя, фильтра), силового инвертора, системы управления и электродвигателя.

3. Модели не должны выходить за рамки общепринятых допущений и идеализации их основных элементов и должны позволять решать следующие задачи управления электроприводом гребного винта АПА: синтез регуляторов, при необходимости – наблюдателей состояния и корректирующих звеньев, анализ качества динамических режимов работы, оптимизация энергетических характеристик и другие.

4. Модели должны способствовать получению новых знаний о поведении системы электродвижения в различных режимах его работы, в том числе и аварийных и должны учитывать особенности используемой в настоящей работе

среды моделирования *Matlab/Simulink* [3, 8].

Целью статьи является уточнение и дополнение с учетом изложенных требований известных математических моделей трехфазного асинхронного двигателя для использования их в дальнейшем при исследовании систем электродвижения автономных плавательных аппаратов.

1. Анализ литературных источников и особенности функционирования АД АПА

В настоящее время теория математического моделирования АД очень хорошо развита и подробно описана во многих трудах [4, 5, 9].

Одна из проблем, возникающая при использовании ММ АД с короткозамкнутым ротором в системах управления, при разработке и эксплуатации различного типа электроприводов, заключается в необходимости учета изменения ряда параметров АД в зависимости от изменяющихся режимов его работы – напряжения, частоты, нагрузки. Наиболее распространенные ММ АД, основанные на записи системы уравнений Парка-Горева [9], не учитывают потери в стали, насыщение магнитной системы, вытеснение тока в стержнях ротора.

Имеются и прикладные реализации ММ АД, например, во всех версиях среды моделирования *Matlab* [3, 6]. Однако, последние версии среды *Matlab* (начиная с 2015 года) не позволяют раскрыть внутреннюю структуру встроенных моделей АД, а встроенные файлы помощи (*Help*) описывают лишь общеизвестные системы дифференциальных уравнений и схему замещения АД. Именно этот факт не позволяет вносить необходимые модификации в модели АД. Использование такого типа ММ АД приводит к заметным различиям расчетных динамических и статических характеристик АД от реальных. Так, для АД серии 4А потери в стали от вихревых токов и гистерезиса составляют до 20 % суммарных номинальных потерь и до 50 % от полных потерь холостого хода. И, например, при работе АД с частичной нагрузкой, что характерно при оптимизации режимов работы АПА, отсутствие в ММ учета потерь в стали приводит к существенным погрешностям при оценке энергетических характеристик АД и свойств системы электродвижения АПА в целом. Учет и по отдельности каждого из перечисленных эффектов, и совместного их воздействие весьма затруднен и является предметом особых исследований специалистов в области электрических машин.

Нужно отметить, что одной из особенностей математической модели АД системы электродвижения АПА является то, что в ней нет необходимости учитывать изменения сопротивлений статора и ротора при изменениях температуры. Это связано с тем, что АД автономного плавательного аппарата баронагружен, постоянно охлаждается практически до температуры окружающей среды

– морской воды (максимальная расчетная температура охлаждающей среды +25 °С) [10].

Также подчеркнем, что при разработке ММ АД весьма сложны проблемы идентификации параметров АД с оценкой зависимостей параметров АД от токов, потокосцеплений, частоты токов статора и ротора, что является предметом многих исследований. Большинство некоммерческих ММ АД либо учитывают только часть названных эффектов, либо настолько сложны, что не подходят для комплексного решения задач анализа и синтеза автоматизированных систем управления, например, при исследованиях совместной работы АД с преобразователями частоты или регуляторами напряжения на статоре.

Все параметры, входящие в ММ АД обычно определяются из Т-образной схемы замещения (СЗ) или ее упрощенной, Г-образной (рис. 1) [10], где R_1 , R_m и R_2 – соответственно, активное сопротивление фазы статора, ветви намагничивания и активное, приведенное к статору, сопротивление ротора; $X_{1\sigma}$, $X'_{2\sigma}$ и X_m – соответственно, индуктивные сопротивления рассеяния фаз статора, ротора и индуктивное сопротивление ветви намагничивания (на рис. 1, б обозначено $Z_m = R_m + j \cdot X_m$ и $Z_1 = R_1 + j \cdot X_{1\sigma}$).

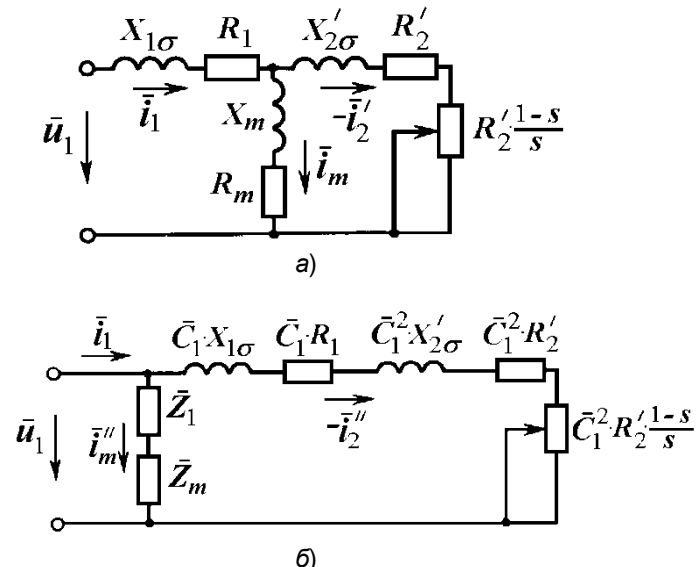


Рис. 1. Схемы замещения АД: Т-образная (а); Г-образная (б)

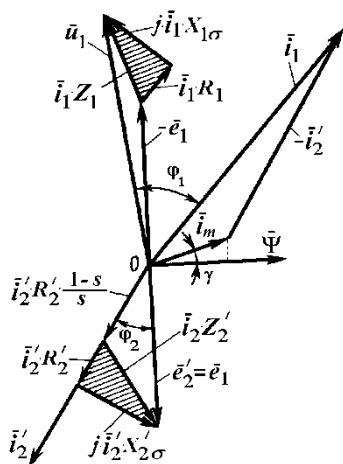
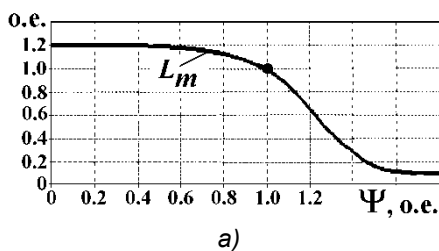


Рис. 2. Векторная диаграмма для Т-образной схемы замещения фазы АД

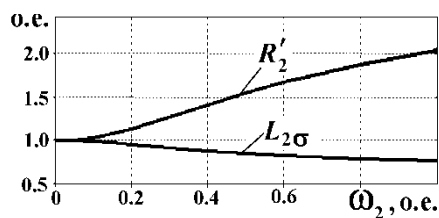
Векторная диаграмма, соответствующая рис. 1, а, приведена на рис. 2, где, для удобочитаемости, смещены действительные масштабные соотношения между модулями напряжений, токов и углами между ними.

В фундаментальных трудах [1, 8] показано, что при разработке систем управления АД для диапазонов регулирования скоростей до 20, изменениями ряда параметров можно пренебречь.

Например, на рис. 3 приведены графики, иллюстрирующие изменения основных параметров АД при различных режимах его работы. Очевидно, что изменениями индуктивностей рассеяния $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ в функции тока I_1 статора ($L_{1\sigma}(I_1)$ и $L_{2\sigma}(I_1)$, см. рис. 3, в) и зависимостью изменения индуктивности рассеяния $L_{2\sigma}(\omega_2)$ (см. рис. 3, б) от частоты ω_2 тока ротора можно пренебречь, тогда как изменения индуктивности главной магнитной цепи $L_m(\Psi)$ от потокосцепления Ψ и сопротивления ротора $R'_2(\omega_2)$ весьма существенны (см. рис. 3, а и б).



а)



б)

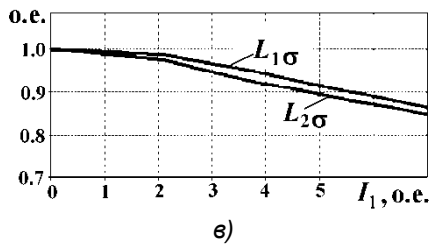


Рис. 3. Типовые статические зависимости изменений основных параметров АД при различных условиях его работы

2. Разработка математической модели АД АПА

При разработке ММ принято, что электрические и магнитные цепи АД симметричны, а потери в стали ротора и влияние гистерезиса при перемагничивании стали на форму токов и потокосцеплений пренебрежимо малы. Подчеркнем, что процесс моделирования асинхронного электропривода (АЭП) с АД нами осуществляется с предварительными этапами настройки ММ. Поясним эти этапы.

На первом, предварительном этапе моделирования, предназначенном только для определения неизвестных номинальных значений переменных и параметров АД, путем расчета статических значений для установившегося номинального режима АД, оцениваются эффекты насыщения магнитной системы основным магнитным потоком, вытеснение тока в стержнях ротора, значение потерь в стали. Здесь же уточняются все параметры схемы замещения.

На втором этапе в ММ АД, настроенную на номинальный режим работы и уже практически готовую для исследования в составе системы управления, вводятся типовые статические зависимости $L_m(\Psi)$ и $R'_2(\omega_2)$, например, такие, как показано на рис. 3.

Далее учитывается влияние потерь в стали на работу АД следующим образом. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса зависят от частоты источника питания f , второй степени амплитуды индукции B , и функции $f_1(s, k)$ скольжения s

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm_{nom}} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}}\right)^k \cdot \left(\frac{B}{B_{nom}}\right)^2 \cdot f_1(s, k),$$

где $f_1(s, k) = (1 + s^k)$, а k – показатель степени, зависящий от марки примененной в АД электротехнической стали. Учитывая, что

$$\left(\frac{B}{B_{nom}}\right)^2 \approx \left(\frac{\Psi}{\Psi_{nom}}\right)^2 \text{ можно записать}$$

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm_{nom}} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}}\right)^k \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi_{nom}}\right)^2 \cdot f_1(s, k), \quad (1)$$

где Ψ – основное потокосцепление, причем максимально допустимые диапазоны изменения скольжения s и возможные значения изменения коэффициента k : $s \in (0,005 \dots 0,1)$ и $k \in (1,2 \dots 1,7)$. При этом функция $(1 + s^k) \in (1,0 \dots 1,063)$.

В общей форме записи, уравнения трехфазного АД с короткозамкнутым ротором, представленные через обобщенные векторы в системе координат, вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_k имеют вид [9]:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_1; \\ 0 = R_2' \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2; \\ M = p \cdot L_m \cdot [\bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2^*]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_2'; \\ \bar{i}_1 = (L_2 \cdot \bar{\Psi}_1 - L_m \cdot \bar{\Psi}_2) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ \bar{\Psi}_2 = L_m \cdot \bar{i}_1 + L_2 \cdot \bar{i}_2'; \\ \bar{i}_2' = (L_1 \cdot \bar{\Psi}_2 - L_m \cdot \bar{\Psi}_1) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2). \end{cases} \quad (3)$$

При моделировании на ЭВМ, системы (2) и (3), записанные в координатах x - y -0, позволяют вместо реальных переменных токов и напряжений обмоток АД оперировать соответствующими им величинами [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{1x}}{dt} = u_{1x} - \frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \omega_k \cdot \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{dt} = -\frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} - \omega_k \cdot \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} = -\frac{R_2' \cdot L_1 \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_2' \cdot L_m \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} = -\frac{R_2' \cdot L_1 \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_2' \cdot L_m \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2x}; \\ M = \frac{p \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\Psi_{1y} \cdot \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \cdot \Psi_{2y}); \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно приведенной на рис. 2 векторной диаграмме

$$\bar{i}_m = \bar{i}_1 + \bar{i}_2', \quad (5)$$

обозначив индуктивности рассеяния статорной и роторной обмоток $L_{1\sigma} = L_1 - L_m$ и $L_{2\sigma} = L_2 - L_m$, векторы потокосцеплений (3) представляются в виде системы

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_{1\sigma} \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_m; \\ \bar{\Psi}_2 = L_{2\sigma} \cdot \bar{i}_2' + L_m \cdot \bar{i}_m \end{cases} \quad (6)$$

Для первого этапа моделирования, используя (4) в среде *Simulink/Matlab*, разработана ММ АД, для которой, согласно (3), справедливы в координатных осях x - y -0 выражения значений потокосцеплений и токов:

$$\begin{cases} \Psi_{1x} = L_1 \cdot i_{1x} + L_m \cdot i_{2x}'; \\ \Psi_{1y} = L_1 \cdot i_{1y} + L_m \cdot i_{2y}'; \\ \Psi_{2x} = L_m \cdot i_{1x} + L_2 \cdot i_{2x}'; \\ \Psi_{2y} = L_m \cdot i_{1y} + L_2 \cdot i_{2y}'; \\ \Psi = \sqrt{\Psi_{1x}^2 + \Psi_{1y}^2}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{1x} = i_{n.cm} + (L_2 \cdot \Psi_{1x} - L_m \cdot \Psi_{2x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i_{1y} = (L_2 \cdot \Psi_{1y} - L_m \cdot \Psi_{2y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i_{2x}' = (L_1 \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot \Psi_{1x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i_{2y}' = (L_1 \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot \Psi_{1y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2), \end{cases} \quad (8)$$

где влияние мощности потерь в стали учтено увеличением активной составляющей i_{1x} тока статора на предварительно принятое значение тока потерь в стали $i_{n.cm}$.

Обозначим $i_{1R} = \sqrt{i_{1x}^2 + i_{1y}^2}$ и $i_{2R}' = \sqrt{i_{2x}'^2 + i_{2y}'^2}$. Тогда коэффициент мощности будет определяться выражением

$$\cos \varphi = |i_{1x} / i_{1R}|, \quad (9)$$

действующие значения токов фаз статора и ротора

$$I_1 = i_{1R} / \sqrt{3} \quad \text{и} \quad I_2' = i_{2R}' / \sqrt{3}, \quad (10)$$

КПД определится из выражения

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{cm} + (i_{1R}^2 \cdot R_1 + i_{2R}'^2 \cdot R_2')}, \quad (11)$$

где предварительно оцененная мощность потерь в стали $\Delta P_{cm} \approx (P_{2nom} / \eta_{nom} - P_{2nom}) \cdot 0,25$ и соответствующее ей значение тока потерь $i_{n.cm} = \Delta P_{cm} / (\sqrt{3} \cdot U_{1nom})$ определяются при номинальной мощности P_{2nom} и КПД η_{nom} электродвигателя.

Программы ММ АД, с известными значениями параметров схемы замещения (варьируя значения ΔP_{cm} , соответствующего ему $i_{n.cm}$, а также x_m), добиваемся для установившегося режима максимально близких номинальных значений частоты вращения, КПД, тока статора и $\cos \varphi$ (при номинальной статической нагрузке, учитывающей механические потери).

На этом первый этап моделирования заканчивается – из установившихся значений переменных получаем номинальные значения

потокосцепления, потерь в стали и индуктивного сопротивления цепи взаимоиндукции x_m .

3. Верификация математической модели АД

С целью верификации предложенной ММ АД, рассмотрим электродвигатель типа АО2-12-4 со следующими паспортными данными: $U_{ном} = 220$ В; $I_{ном} = 2,1$ А; $n_{ном} = 1360$ об/мин; $\eta_{ном} = 74,5$ %; $\cos\phi_{ном} = 0,78$; $P_{2ном} = 800$ Вт; $k_p = 1,8$; $k_f = 7$; $k_m = 2,2$. По отдельной методике были определены следующие параметры схемы замещения АД: $R_1 = 10,1$ Ом, $R_2 = 8,5$ Ом, $L_{1\sigma} = 39,5$ мГн, $L_{2\sigma} = 67,2$ мГн, $L_m = 634$ мГн. Для этого электродвигателя в [9] приведены экспериментальные диаграммы пуска (рис. 4) на холостом ходу.

После проведения, как описано выше, всех этапов настройки ММ АД, из установившегося режима работы при напряжении $U_{ном} = 220$ В, номинальной нагрузке и анализа статических характеристик были определены его основные параметры: $I_{ном} = 2,07$ А, $n_{ном} = 1391$ об/мин, $\eta_{ном} = 0,756$, $\cos\phi_{ном} = 0,79$, $P_{2ном} = 816$ Вт, $k_p = 0,9$, $k_f = 4,5$, $k_m = 1,7$. Анализ полученных параметров показывает их очень высокую сходимость с паспортными данными, что является подтверждением соответствия ММ реальной работе АД в статическом номинальном режиме.

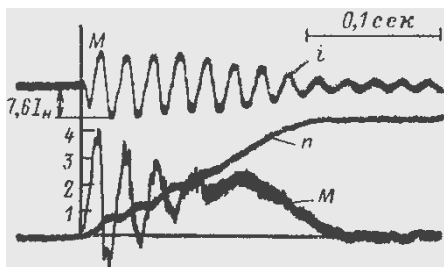


Рис. 4. Пуск АД типа АО2-12-4 на холостом ходу (эксперимент, [9])

Понятно, что основной этап моделирования заключен в дальнейших исследованиях ММ АД, в которую уже вводятся статические зависимости $L_m = L_{mном} \cdot L_m^*(\Psi / \Psi_{ном})$, $R_2'(\omega_2)$ и $\Delta P_{cm} = \Delta P_{cmном} \cdot (f / f_{ном})^k \cdot (\Psi / \Psi_{ном})^2 \cdot f_1(s, k)$ – согласно (1). Например, полученный в результате моделирования процесс пуска АД типа АО2-12-4 на холостом ходу, приведен на рис. 5.

Сопоставление динамических процессов пуска (эксперимент, рис. 4 и моделирование, рис. 5) показывает их практически полную сходимость (время разгона до установившейся частоты вращения, пиковые значения момента и потребляемого тока фактически совпадают), что также является подтверждением работоспособности уточненной ММ в широком диапазоне изменения режимов работы АД.

Заключение

1. Установлены требования к математическим моделям АД гребного винта, как основного элемента системы электродвижения АПА.

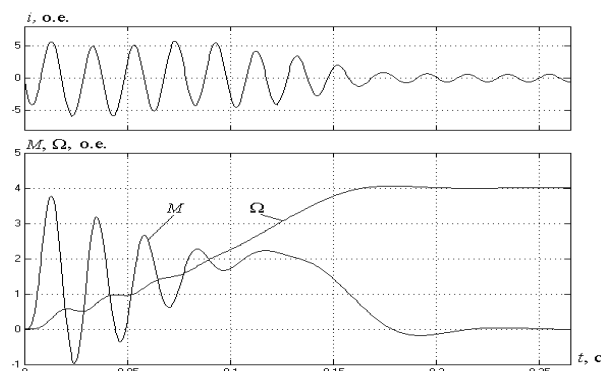


Рис. 5. Пуск АД типа АО2-12-4 на холостом ходу (моделирование)

2. Уточнены и дополнены известные математические модели АД:

а) зависимостями, описывающими нелинейность кривой намагничивания магнито-провода статора;

б) учетом потерь в стал - и путем прибавления к токам статора дополнительных активных составляющих, обусловленных этими потерями.

Эти уточнения и дополнения, совместно с учетом изменения параметров АД в зависимости от изменяющихся режимов его работы – напряжения, частоты, и, особенно, существенной нелинейности изменения нагрузки на валу АД от гребного винта, позволяют использовать уточненные ММ АД при исследовании и оптимизации систем электродвижения автономных плавательных аппаратов.

3. Проведенная верификация уточненной ММ АД системы электродвижения АПА позволяет рекомендовать ее широкому кругу специалистов электромехаников.

Литература

1. Giri F. AC electric motors control: advanced design techniques and applications. Oxford: Wiley, 2013, 578 p.
2. Levi E., Power electronics and motor drives. The Industrial Electronics Handbook Second Edition, 2011, 3, pp. 1–31.
3. Ansari A. A, Deshpande D. M. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(5), pp. 1260–1267.
4. Khodja D. E., Kheldoun A. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 28, pp. 157–160.
5. Sandhu K. S., Pahwa V. Simulation study of three phase induction motor with variations in moment of inertia. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 4, 6, pp. 72–77.
6. Shi K. L., Chan T. F., Wang Y. K, Ho. S. L., Modeling and simulation of three phase induction motor using SIMULINK. International journal of electrical engineering education, 2009, 36, pp. 163–172.
7. Zhang P., Zhang, P., Yi Du, Thomas G. Habetler, Bin Lu A Nonintrusive winding heating method for induction motor using softstarter for preventing moisture condensation. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 48, 1, pp. 117–123.
8. Boyko A., Volyanskaya Ya. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. Eastern-European journal of enterprise technologies, 2017, 4, 5(88), pp. 50–58.
9. Марченко А.А., Онищенко О.А., Труднев С.Ю. Исследование модели асинхронного электродвигателя на возможность нагружения при помощи понижения частоты питающего напряжения. Вестник Камчатского государственного технического университета, 2014, 29, С. 17–24.
10. Волянский С. М. Синтез математической модели движительно-рулевого комплекса подводного аппарата как объекта управления [Электронный ресурс]. Вісник Національного університету кораблебудування, 2014, 2.
11. Васковський Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2007, 190 с.

References

1. Giri F. AC electric motors control: advanced design techniques and applications. Oxford: Wiley, 2013, 578 p.
2. Levi E., Power electronics and motor drives. The Industrial Electronics Handbook Second Edition, 2011, 3, pp. 1–31.
3. Ansari A. A, Deshpande D. M. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(5), pp. 1260–1267.
4. Khodja D. E., Kheldoun A. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 28, pp. 157–160.
5. Sandhu K. S., Pahwa V. Simulation study of three phase induction motor with variations in moment of inertia. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 4, 6, pp. 72–77.
6. Shi K. L., Chan T. F., Wang Y. K, Ho. S. L., Modeling and simulation of three phase induction motor using SIMULINK. International journal of electrical engineering education, 2009, 36, pp. 163–172.
7. Zhang P., Zhang, P., Yi Du, Thomas G. Habetler, Bin Lu A Nonintrusive winding heating method for induction motor using softstarter for preventing moisture condensation. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 48, 1, pp. 117–123.
8. Boyko A., Volyanskaya Ya. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. Eastern-European journal of enterprise technologies, 2017, 4, 5(88), pp. 50–58.
9. Marchenko A. A., Onishchenko O. A., Trudnev S.Yu. Issledovanie modeli asinhronnogo ehlektrodvigatelya na vozmozhnost' nagruzheniya pri pomoshchi ponizheniya chastoty pitayushchego napryazheniya. Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2014, 29, pp. 17–24.
10. Volyanskij, S. M. Sintez matematicheskoy modeli dvizhitel'no-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata kak ob'ekta upravleniya. [Ehlektronnyj resurs]. Visnik Nacional'nogo universitetu korablebuduvannya. – 2014, 2.
11. Vas'kovs'kij Yu. M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin. Navchal'nij posibnik. Kiiv, NTUU «KPI», 2007, 190 p.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.073

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ****Исаев Александр Аркадьевич**

доктор экономических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41
e-mail: isaevalex@list.ru

Исаева Людмила Алексеевна

кандидат экономических наук, профессор, декан факультета управления морским
транспортом и экономики, заведующий кафедрой экономической теории
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: isaevala@list.ru

Луговец Александр Анатольевич

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры управления морским транспортом
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: alal@list.ru

Аннотация

Констатируется отсутствие единого подхода к формированию системы обеспечения конкурентоспособности перевозок на предприятиях морского флота. Речь идет о такой системе управления факторами потребительной привлекательности морских перевозок, целью функционирования которой является обеспечение конкурентоспособности морских перевозок, осуществляемых данным предприятием. Предлагается трактовка понятия «конкурентоспособность морских перевозок» как способности морских перевозок демонстрировать наилучшее соотношение потребительной значимости и цены в сравнении с морскими перевозками конкурентов. Изложены основные положения эмоциональной теории продаж. Раскрывается механизм выбора покупателем товаров на рынке, а также содержание понятий «потребительная значимость продукции» и «потребительная привлекательность продукции». Согласно эмоциональной теории продаж, покупатель выбирает на рынке такие морские перевозки, потребительная привлекательность которых выше, чем у морских перевозок конкурентов. Причем факторами потребительной привлекательности морских перевозок являются характеристики не только собственно морских перевозок, но и дополнительных продуктов предприятия. Предложен механизм выработки управленческого воздействия по отношению к сотрудникам предприятия, обеспечивающим конкурентоспособную величину данного фактора потребительной привлекательности морских перевозок.

Ключевые слова: морские перевозки, эмоциональная теория продаж, система обеспечения конкурентоспособности морских перевозок на предприятии.

**ENSURING THE COMPETITIVENESS OF SEA SHIPPING: THEORETICAL
AND METHODOLOGICAL ASPECTS****Alexander A. Isaev**

the professor, Dr. Sci. Econ.,
the professor of department of international marketing and trade
Vladivostok state university of economics and service
Gogolya, 41, Vladivostok 690014, Russian Federation
e-mail: isaevalex@list.ru

Lyudmila A. Isaeva

the professor, Cand. Sci. Econ.,
the dean of the faculty of maritime transport and economics, head of the department of economic theory
Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy

Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: isaevala@list.ru

Alexander A. Lugovets

the associate professor, Dr. Sci. Econ.,
the professor of department of marine transport control
Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy
Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: alal@list.ru

Abstract

The absence of a unified approach to the formation of a system for ensuring the competitiveness of shipments at the marine fleet enterprises is stated. The main provisions of the emotional theory of sales are set forth. It is a question of such a system of managing the factors of consumer attractiveness of sea shipping, the purpose of which ensures the competitiveness of sea transportations carried out by this company. The interpretation of the concept of "sea shipping competitiveness" as an ability of sea transportations to demonstrate the best correlation of consumer value and price in comparison with maritime transport of competitors. The mechanism of choosing goods by the consumer on the market, as well as the content of the concepts "consumer use of products" and "consumer appeal of products" is disclosed. According to the emotional theory of sales, the buyer chooses in the market such as sea shipping, the consumer appeal of which is higher than sea shipping of competitors. Moreover, the factors of consumer attractiveness of sea shipping are the characteristics of not only the sea shipping itself, but also additional products of the company. The mechanism of development of administrative influence in relation to employees of the enterprise providing a competitive value of this factor of consumer attractiveness of sea transportations is offered.

Key words: sea transportations, emotional theory of sales, the system of ensuring the competitiveness of sea shipping of the company.

В рыночных условиях производство конкурентоспособной продукции (в частности, морских перевозок) является основной целью деятельности предприятия. Производящее неконкурентоспособную продукцию, как независимый хозяйственный субъект долго существовать не сможет.

Вместе с тем до настоящего времени среди ученых и специалистов отсутствует единый подход к формированию системы обеспечения конкурентоспособности перевозок на предприятиях морского флота. Речь идет о такой системе управления факторами потребительной привлекательности морских перевозок, целью функционирования которой является обеспечение конкурентоспособности перевозок, осуществляемых данным предприятием.

Одной из основных причин возникшей ситуации является отсутствие общепринятой трактовки такого понятия как «конкурентоспособность продукции (товара)».

По мнению М. Портера, конкурентоспособность экономического объекта – это его способность «противостоять конкурентам с помощью сравнительного преимущества в чем-либо» [3, С.14].

Р.А. Фатхутдинов трактует понятие «конкурентоспособность товара» как «степень реального или потенциального (выделено автором) удовлетворения им конкретной потребности по сравнению с аналогичными товарами, представленными на данном рынке» [4, С. 16].

Однако такая трактовка понятия «конкурентоспособность товара» далека от совершенства в силу следующих причин.

Во-первых, не понятно, какой смысл автор вкладывает в понятия «степень реального удовлетворения потребности» и «степень потенциального удовлетворения потребности». В чем различие между ними?

Во-вторых, как можно на практике измерить «степень реального удовлетворения потребности» и – особенно – «степень потенциального удовлетворения потребности»?

В-третьих, если различие между указанными понятиями все же существует, то какую степень – реального или потенциального удовлетворения потребности следует использовать при оценке конкурентоспособности конкретного товара?

По мнению авторов, основной причиной такого смыслового разнообразия является этимологический подход к раскрытию содержания понятия «конкурентоспособность продукции». Особенность такого подхода состоит в том, что он раскрывает содержание понятия, опираясь исключительно на этимологию слова «конкурентоспособность». Вместе с тем более продуктивным является другой – глубинный подход. Такой подход раскрывает содержание понятия «конкурентоспособность продукции» путем выявления причин, которые привели к введению в практический и научный оборот данного понятия.

Очевидно, что возникновению понятия «конкурентоспособность продукции» предшествовала деятельность производителей по

реализации своей продукции (изделия, услуги, информация), которая не всегда была успешной. Продукцию одних производителей покупатели приобретали, а продукцию других игнорировали.

В первом приближении покупатель останавливает свой выбор на такой продукции, которая характеризуется наилучшим соотношением всей совокупности потребительских характеристик и цены в сравнении с конкурентами. Таким образом, авторы разделяют трактовку «конкурентоспособности продукции (товара)» как «способности товара демонстрировать наилучшее соотношение потребительской значимости и цены в сравнении с товарами-конкурентами» [1].

Еще одной причиной, сдерживающей формирование на предприятиях эффективной системы обеспечения конкурентоспособности морских перевозок, является недоиспользование многими руководителями новых научных достижений в теории выбора товаров на рынке. В частности, речь идет об эмоциональной теории продаж, которая, в свою очередь, является прикладным разделом биоинформационной психологии (психопрограммика) [2].

В основе эмоциональной теории продаж лежат следующие положения.

1. Человек совершает определенные действия (в частности, выбирает тот или иной товар) лишь в том случае, если они ведут к удовлетворению тех или иных потребностей в краткосрочной или долгосрочной перспективе.

2. Интегральным показателем степени удовлетворения различных потребностей являются эмоции (положительные или отрицательные).

3. Покупатель выбирает тот товар, который вызывает у него более сильные положительные эмоции в сравнении с товарами-конкурентами.

4. Вызываемые различными характеристиками товара однородные эмоции (положительные или отрицательные) объединяются в одну более сильную эмоцию (биоинформационный сигнал).

5. Противоположные эмоции нейтрализуют друг друга.



Рис. 1. Структура интегрированного продукта

Причем, согласно эмоциональной теории продаж, на выбор того или иного товара оказывают влияние не только характеристики «основного продукта», но и характеристики «дополнительных продуктов» (речь идет о продуктах таких видов деятельности как послепродажная, рекламная, связанная с решением социальных проблем и т.д.). Таким образом, говоря о приобретении того или иного основного продукта, по сути, речь идет о

приобретении группы продуктов интегрированной деятельности производителя, так называемого «интегрированного продукта» (рис. 1).

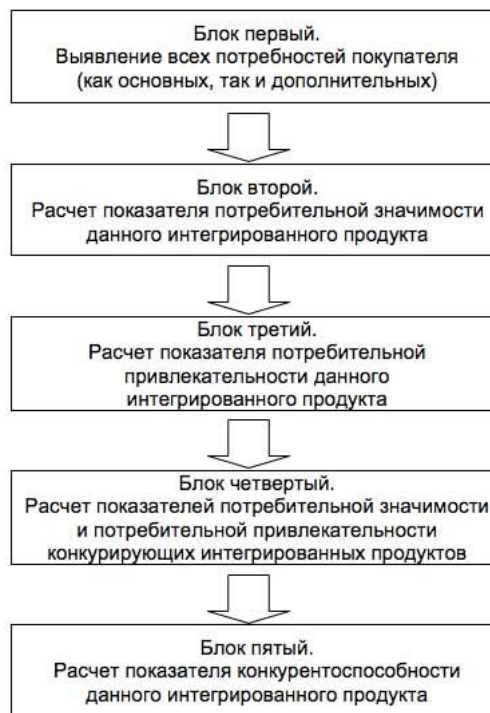


Рис. 2. Механизм выбора покупателем товаров на рынке

Дело в том, что в подсознании покупателя основной продукт данного производителя ассоциативно связан с его дополнительными продуктами. И если отдельные характеристики дополнительных продуктов вызывают у покупателя положительные эмоции, то эти эмоции (биоинформационные сигналы) присоединяются к положительным эмоциям, вызванным основным продуктом.

Согласно эмоциональной теории продаж механизм выбора покупателем товаров на рынке состоит из пяти последовательных блоков (рис. 2).

Блок первый. Выявление покупателем всех наиболее значимых потребностей (как основных, так и дополнительных).

Блок второй. Расчет показателя потребительской значимости данного интегрированного продукта. Этот блок предусматривает расчет показателя потребительской значимости данного интегрированного продукта (ИПЗ) на основании положительных эмоций, возникающих в результате удовлетворения всего многообразия потребностей покупателя (выявленных на первом этапе принятия решения о покупке) по формуле: $ИПЗ = \sum K_i \times \Pi_{iIPX} = \sum_{i=1}^n K_i \Pi X_i$, где – K_i удельная значимость («вес») данной потребности; $\Pi_{iIPX} = \sum_{i=1}^n K_i \Pi X_i$ – величина данной потребности, балл.

Блок третий. Расчет показателя потребительской привлекательности данного интегрированного продукта (ИПП) по формуле:

ИПП = ИПЗ / Ц, где ИПЗ – показатель потребительной значимости интегрированного продукта, балл.; Ц – цена товара, руб.

Блок четвертый. Расчет показателей потребительной значимости и потребительной привлекательности конкурирующих интегрированных продуктов.

Блок пятый. Расчет показателя конкурентоспособности данной продукции (КП) по формуле: $КП = ИПП / ИПП_{\max} ИПХ = \sum_{i=1}^n K_i ПХ_i$, где ИПП – потребительная привлекательность данного интегрированного продукта, балл / руб.; ИПП_{max} – максимальная потребительная привлекательность конкурирующих интегрированных продуктов, балл / руб.

Таким образом, покупатель выберет данный товар среди товаров-конкурентов (т.е. товар будет конкурентоспособным) лишь в том случае, если его показатель конкурентоспособности больше или равен 1,0.

Эмоциональная теория продаж объясняет, почему второстепенные факторы в ряде ситуаций являются определяющими при выборе товаров на рынке.

Дело в том, что основанием для принятия решения в пользу данного товара является величина потребительной привлекательности интегрированного продукта. Однако, если речь идет о товарах с одинаковыми характеристиками основного продукта, определяющую роль в принятии решения о покупке станут играть дополнительные продукты (это видно из формулы показателя потребительной привлекательности). То есть решение будет принято в пользу товара, у которого величина показателя потребительной привлекательности пусть незначительна, но больше.

Эмоциональная теория продаж может быть использована при создании на предприятии эффективной системы обеспечения конкурентоспособности продукции. В частности, речь идет о создании на предприятиях морского флота системы управления наиболее значимыми факторами конкурентоспособности морских перевозок, целью функционирования которой является принятие покупателем решения о покупке продукции данного предприятия (так называемой системы ДТВ-управления, от слов «decision to buy»).

Сегодня на многих предприятиях широко используется система управления качеством продукции. Так вот, особенность ДТВ-управления состоит в том, что в роли управляемых объектов тут выступают наиболее значимые факторы принятия решения о покупке, лишь одним из которых является качество.

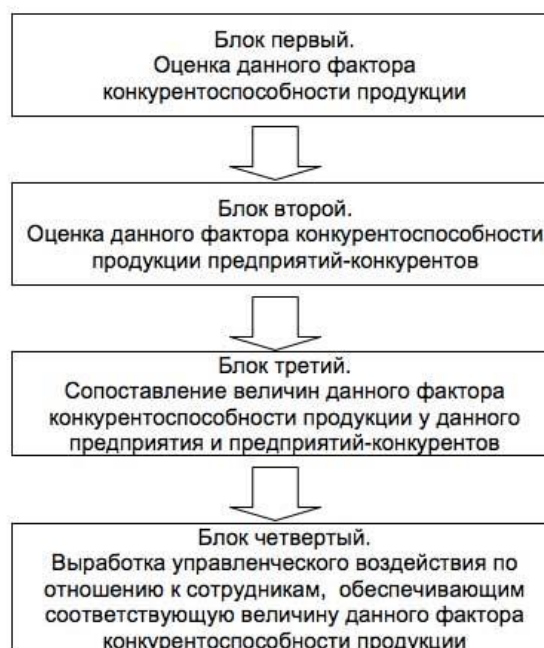


Рис. 3. Механизм выработки управленческого воздействия по отношению к сотрудникам, обеспечивающим конкурентоспособную величину данного фактора потребительной привлекательности интегрированного продукта

Причем хотелось бы подчеркнуть, что характер управленческого воздействия руководителя предприятия на сотрудников, ответственных за величину того или иного фактора принятия решения (например, качество рекламы), должно зависеть от того, как величина данного фактора соотносится с величиной такого же фактора у «товаров-победителей».

Таким образом, конкурентоспособность продукции обеспечивается «подтягиванием» потребительной привлекательности продукции данного предприятия до уровня потребительной привлекательности продукции лидеров рынка.

Механизм выработки управленческого воздействия по отношению к сотрудникам, обеспечивающим конкурентоспособную величину данного фактора потребительной привлекательности интегрированного продукта, состоит из четырех блоков (рис. 3).

Блок 1. Оценка данного фактора конкурентоспособности продукции данного предприятия. Такая оценка производится на основании изучения мнения целевой группы потребителей (или экспертов).

Блок 2. Оценка данного фактора (характеристики) конкурентоспособности продукции предприятий-конкурентов.

Блок 3. Сопоставление величин данного фактора конкурентоспособности продукции у данного предприятия и предприятий-конкурентов (Блок 1 и Блок 2).

Блок 4. Выработка управленческого воздействия по отношению к сотрудникам,

обеспечивающим соответствующую величину данного фактора конкурентоспособности продукции, в зависимости от результатов, полученных на выходе из Блока 3.

Если величина данного фактора конкурентоспособности продукции не меньше, чем у конкурентов, предусматривается материальное поощрение; если меньше – соответственно, материальное наказание (депремирование).

В заключении хотелось бы отметить, что использование эмоциональной теории продаж при создании и функционировании системы обеспечения конкурентоспособности перевозок на предприятиях морского флота позволяет более корректно связать характер управленческого воздействия по отношению к соответствующим сотрудникам с текущими результатами их деятельности в рамках функциональных обязанностей.

Литература

1. Исаев, А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект / А.А. Исаев // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. – 2017. – Т.9. № 2. – С. 144-150.
2. Исаев, А.А. Эмоциональная теория продаж / А.А. Исаев. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 136 с.
3. Портер, М. Конкуренция / М. Портер. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2000. – 495 с.
4. Фатхутдинов, Р.А. Стратегическая конкурентоспособность / Р.А. Фатхутдинов. – М.: Издательство «Экономика», 2005. – 504 с.

References

1. Isaev, A. A. Ocenka konkurentosposobnosti produkcii: metodologicheskij aspekt. Territorija novyh vozmozhnostej. Vestnik VVSU (Assessment of product competitiveness: methodological aspect. Territory of new opportunities. Vestnik VVSU), Vol.9. № 2, pp. 144-150.
2. Isaev, A. A. Jemocional'naja teorija prodazh [Emotional theory of sales]. Vladivostok, VVSU Publ., 2016. 136 p.
3. Porter, M. Konkurencija [On competition]. – Moscow, Vil'jams Publ., 2000. 495 p.
4. Fathutdinov, R.A. Strategicheskaja konkurentosposobnost' [Strategic competitiveness]. – Moscow, Ekonomika Publ., 2005. 504 p

УДК 656.073

ФАКТОРЫ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВЫХ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Исаев Александр Аркадьевич

доктор экономических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41
e-mail: isaevalex@list.ru

Мегей Екатерина Сергеевна

аспирант
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Лентарев Александр Андреевич

доктор технических наук, профессор кафедры судовождения
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: lentarev@msun.ru

Аннотация

Констатируется отсутствие единого взгляда на состав факторов конкурентоспособности грузовых морских перевозок, что оказывает негативное влияние как на корректную оценку конкурентоспособности перевозок, так и на формирование на предприятиях морского флота эффективной системы управления конкурентоспособностью морских перевозок. Выявлены основные факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок, которые разделены на две группы: основные и имиджевые. В частности, к основным факторам относятся: возможность транспортировки груза по различным направлениям; сроки и соблюдение сроков доставки груза; охрана груза в пути следования; финансовые услуги (кредитование); гибкость системы ценообразования; страхование груза; индивидуальное проектирование погрузки груза, индивидуальное проектирование нескольких вариантов доставки груза, экспедирование груза на всех звеньях цепи доставки, возможность организации транспортировки различных видов груза (сборные, тяжеловесные, негабаритные), наличие сайта в интернете; расчет ставок в режиме on-line (on-line калькулятор); продвижение компании в интернет-ресурсах; предоставление дополнительных складских услуг по упаковке; услуги перегруза; месторасположение офиса; наличие автомобильной парковки возле офиса для транспорта отправителя; удобный график работы, а к имиджевым факторам – деловая репутация, личность руководителя, уровень культуры поведения персонала и др.

Ключевые слова: каботажные грузовые морские перевозки, эмоциональная теория продаж, система управления конкурентоспособностью морских перевозок на предприятии.

FACTORS OF COMPETITIVENESS OF COASTAL SEA FREIGHT SHIPPING

Alexander A. Isaev

the professor, Dr. Sci. Econ.,
the professor of department of international marketing and trade
Vladivostok state university of economics and service
Gogolya, 41, Vladivostok 690014, Russian Federation
e-mail: isaevalex@list.ru

Ekaterina S. Megey

the post-graduate student
Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy
Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Alexander A. Lentarev

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of navigation
Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy

Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation
e-mail: lentarev@msun.ru

Abstract

Absent a unified view of the composition of the factors of competitiveness of cargo transport, which has a negative impact on the correct evaluation of the competitiveness of the transport and the formation of the maritime companies of an effective system of competitiveness management of maritime transport. The identified main factors of competitiveness of cabotage sea freight are divided into two groups: basic and image factors. In particular, the key factors include: possibility of cargo transportation in different directions; terms and observance of delivery dates; cargo protection in transit; financial services (crediting); flexibility of the pricing; cargo insurance; individual planning of cargo loading, custom design several options for delivery of cargo, freight forwarding on all links in the chain of delivery, organization of transportation of various types of cargo (consolidated, heavyweight, oversized), availability of Internet-site of sea shipping company; on-line calculation of rates (on-line calculator); promotion of the company via Internet; provision of additional warehouse services for packaging; overload services; location of the office; parking space near the office for the sender's car; convenient work schedule, and a certain image factors: reputation, the personality of the leader, the level of culture of behavior of the staff, etc.

Key words: cabotage cargo sea transport, emotional theory of sales, management system of maritime competitiveness in the company.

В настоящее время среди ученых и специалистов отсутствует единый взгляд на состав факторов конкурентоспособности грузовых морских перевозок, что оказывает негативное влияние как на корректную оценку конкурентоспособности перевозок, так и на формирование на предприятиях морского флота эффективной системы управления конкурентоспособностью морских перевозок. При этом авторы разделяют точку зрения на содержание понятия «конкурентоспособность продукции» как «способность товара демонстрировать наилучшее соотношение потребительской значимости и цены в сравнении с товарами-конкурентами» [1] и понятия «конкурентоспособность предприятия» как «способность предприятия, функционирующего на данном рынке, обеспечивать рентабельность не ниже средней рентабельности всех предприятий в экономике» [3].

Одной из основных причин возникновения такой ситуации является недоиспользование

ряда перспективных теоретических и методологических разработок в области обеспечения конкурентоспособности продукции. В частности, речь идет о методе оценки конкурентоспособности продукции на основе эмоциональной теории продаж [2].

Целью данной статьи является выявление факторов конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок, которые в дальнейшем позволят разработать научно обоснованную методику оценки конкурентоспособности таких перевозок, а также сформировать на предприятиях морского транспорта эффективную систему управления конкурентоспособностью морских перевозок.

Все выявленные факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок разделены на две группы: 1) основные и 2) имиджевые (Таблица).

Таблица

Факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок (основные и имиджевые)

№	Наименование факторов
1. Основные факторы	
1	Возможность транспортировки груза по различным направлениям
2	Сроки и соблюдение сроков доставки груза
3	Экспедирование груза на всех звеньях цепи доставки
4	Охрана груза в пути следования
5	Финансовые услуги (кредитование)
6	Гибкость системы ценообразования
7	Страхование груза
8	Индивидуальное проектирование погрузки груза
9	Индивидуальное проектирование нескольких вариантов доставки груза
10	Наличие сайта в интернете
11	Расчет ставок в режиме on-line (on-line калькулятор)
12	Продвижение компании в интернет-ресурсах
13	Предоставление дополнительных складских услуг по упаковке
14	Услуги перегруза
15	Месторасположение офиса
16	Наличие автомобильной парковки возле офиса для транспорта отправителя
17	Удобный график работы
18	Наличие корпоративной мобильной связи
19	Наличие номера 8-800...

20	Наличие разрешительной документации
21	Наличие банковского расчетного счета в рублях
22	Наличие собственных складов с предоставлением услуг хранения
23	Наличие собственной широкой технической базы
24	Возможность организации транспортировки различных видов груза (сборные, тяжеловесные, негабаритные)
25	Возможность организации доставки грузов двумя и более видами транспорта (мультимодальность)
26	Возможность предоставления персонального менеджера
27	Наличие автоматизированной системы приема и обработки заявок
28	Оперативная адаптация к условиям меняющегося рынка
29	Компетентность персонала
30	Соблюдение конфиденциальности
2. Имиджевые факторы	
31	Деловая репутация
32	Известность бренда
33	Качество фирменного стиля
34	Финансовая устойчивость предприятия
35	Личность руководителя
36	Известность деловых партнеров
37	Уровень культуры поведения персонала
38	Наличие профессиональных знаков отличия
39	Участие в решении социальных проблем
40	Качество информационно-рекламных продуктов
41	Внешний вид офисного здания

Рассмотрим эти факторы более подробно.

1. Основные факторы

1. Возможность транспортировки груза по различным направлениям.

Возможность организовать перевозку: генерального, контейнерного типа, сборного груза, груза навалом из любого населенного пункта / стационарного пункта отгрузки в труднодоступных местах до пункта назначения, выбранного потребителем.

2. Сроки и соблюдение сроков доставки груза.

Минимальные сроки доставки грузов (при одной цене) и четкое исполнение договорных обязательств по доставке груза – одни из основных потребностей отправителя. Исполнение обязательств по срокам доставки дает отправителю возможность просчитать следующую дату закупки, что позволяет уменьшить время отсутствия товара в складском ассортименте отправителя.

Кроме этого, гарантированные сроки доставки груза обеспечивают бесперебойную работу на всех этапах доставки груза: подготовка груза к транспортировке, организация погрузо-разгрузочных работ, отслеживание фактического прохождения движения транспорта по маршруту перевозки с помощью дополнительного оборудования (ГЛОНАСС), отправка груза в порт отправления, портовые погрузо-разгрузочные работы на судно, погрузо-разгрузочные работы в порту выгрузки с дальнейшей отправкой транспортом до пункта выгрузки (склада) получателя. На всех этапах с отправителем согласовываются временные рамки для бесперебойного и беспрепятственного оказания услуг транспортной компанией.

3. Экспедирование груза на всех звеньях цепи доставки.

С момента погрузки товара на транспортное средство и до окончательного его прибытия в указанный пункт назначения судоходная компания ежедневно контролирует местонахождение груза по всей цепи доставки. Данная услуга дает отправителю возможность получать своевременную информацию о нахождении груза в любой момент.

4. Охрана груза в пути следования.

Сохранность груза, внимательное обращение с грузом при погрузо-разгрузочных работах в пути следования, качество доставки – все это важно для отправителя. Груз должен прийти до пункта назначения без повреждений согласно товарной накладной в полном объеме. А доставка груза «точно в срок» позволяет потребителю своевременно спланировать получение и реализацию груза.

Охрана груза может быть обязательной и добровольной. Обязательная охрана груза зависит от наименования груза и типа выбранного транспортного средства, согласно кодам ЕТСНГ (Единая тарифно-статистическая номенклатура грузов) и ГНГ (Гармонизированная номенклатура грузов). Добровольная охрана груза осуществляется любого типа груза по желанию потребителя.

5. Финансовые услуги (кредитование).

Финансовые услуги включают в себя предоставление дополнительных бонусов (на определенных условиях, при определенных объемах перевозимого груза), а также временных рассрочек и отсрочек в зависимости от процентного соотношения предоплаты и фактической оплаты по факту оказания услуг.

6. Гибкость системы ценообразования.

Гибкость системы ценообразования свидетельствует о возможности судоходной компании варьировать цены в зависимости от ситуации (различных факторов). Как правило,

компания определяет стоимость услуг в зависимости от объемов груза и долгосрочности взаимовыгодного сотрудничества на основании внутреннего документа «Положение о ценообразовании».

7. Страхование груза.

Данная услуга судоходной компании дает гарантию отправителю, что в случае потери (или порчи) груза в пути следования компания возместит все понесенные убытки в полном объеме.

8. Индивидуальное проектирование погрузки груза.

При необходимости судоходная компания предоставляет схемы погрузки, крепления, расстановки груза согласно утвержденным техническим регламентам в зависимости от выбранного вида транспорта.

9. Индивидуальное проектирование нескольких вариантов доставки груза.

Приобретая товар в другом населенном пункте, потребитель не всегда знает, каким маршрутом и каким транспортным средством выгодней перевезти товар в точку назначения. Поэтому судоходная компания может предложить несколько вариантов, схем доставки товара на основании которых, проведя сравнительный анализ, потребитель выбирает для себя оптимальный вариант.

10. Наличие сайта в интернете.

В современном мире судоходным компаниям необходимо иметь интернет-сайт, на котором подробно описаны все предоставляемые услуги, контактные данные, отзывы клиентов, фотографии процессов деятельности компании и прочая информация. Выбирая транспортный продукт, потребитель, как правило, использует интернет-ресурс, когда нет возможности получить рекомендации (или после получения определенных сведений и рекомендаций проверить полученную информацию), а также предварительно ознакомиться с возможностями предприятия, его услугами, тарифами и другой важной на первом этапе сбора информации.

11. Расчет ставок в режиме on-line (on-line калькулятор).

Функция on-line калькулятор: к данной услуге отправитель обращается при необходимости предварительно рассчитать ставку по запланированному маршруту доставки груза самостоятельно в круглосуточном режиме без участия специалиста судоходной компании.

12. Продвижение компании в интернет-ресурсах.

Информация о сайте судоходной компании должна присутствовать в поисковых системах Yandex, Google, Mail, Rambler и т.д. Задача судоходной компании состоит в том, чтобы обеспечить себе одно из первых мест в списке компаний-конкурентов.

13. Предоставление дополнительных складских услуг по упаковке.

Транспортная компания может предоставлять дополнительные складские услуги: упаковка, пломбировка, маркировка, переупа-

ковка, запаллечивание, обрешетка, фото/видео съемка и т.д.

14. Услуги перегруза.

Судоходная компания может предоставлять дополнительные услуги в области перегрузочных процессов. Перегруз осуществляется следующими способами: механический и ручной. Механический – с помощью вилочных погрузчиков, кранов. Ручной – с помощью грузчиков, докеров-механизаторов.

Одно из наиболее важных условий выбора судоходной компании – это возможность использования узкоспециализированной техники для погрузо-разгрузочных работ. Например: при перегрузе рулонной стали на поддонах из 20-футового контейнера необходимо наличие вилочного минипогрузчика с грузоподъемностью до 5 тонн, который свободно может заезжать в контейнер для оперативного и безопасного осуществления перегрузочного процесса.

15. Месторасположение офиса.

Месторасположение офиса должно быть в черте города, в офисном здании или в помещении, оборудованном под офис, желательно в районах деловой активности, с высокой степенью транспортной доступности.

16. Наличие автомобильной парковки возле офиса для транспорта отправителя.

Потребитель ценит комфорт. В районах деловой активности нередко встает вопрос о наличии парковки. Наличие парковочных мест, наличие множественных дорожных развязок позволяющих с разных районов без дополнительных временных затрат подъехать к офису является дополнительным положительным преимуществом при принятии решения о выборе данной компании.

17. Удобный график работы.

График работы офиса судоходной компании должен быть привлекательным для отправителя. Как правило, в наиболее предпочтительном положении оказываются компании, у которых рабочий день специалистов составляет от 8.00 до 20.00 со сменным дежурным графиком (поскольку клиенты и транспортные компании находятся в регионах с разными часовыми поясами).

18. Наличие корпоративной мобильной связи.

Сотрудники судоходной компании должны иметь возможность оперативной мобильной связи с потребителем по всей России. А именно беспрепятственно и без ограничения осуществлять звонки на прием и вызов, общаться с помощью смс/ммс сообщений с потребителем.

19. Наличие номера 8-800...

Наличие у судоходной компании выделенной линии 8-800...с подключенным автоответчиком по распределению звонков между отделами и специалистами, а также записи всех телефонных звонков для улучшения качества обслуживания дает ей дополнительные преимущества в сравнении с конкурентами.

20. Наличие разрешительной документации.

Судоходная компания должна осуществлять свою деятельность в соответствии с

законодательством Российской Федерации, а также соблюдать нормы и требования таможенного союза ЕАЭС.

21. Наличие банковского расчетного счета в рублях.

Наличие банковских рублевых счетов – это, в первую очередь, гарантия официальной регистрации предприятия, а также позволяет осуществлять платежи и отслеживать поступления денежных средств от потребителя.

22. Наличие собственных складов с предоставлением услуг хранения.

Данная услуга необходима отправителям, когда груз нуждается в хранении до назначенной даты или в силу определенных обстоятельств. Кроме этого, наличие собственных складов с услугой хранения дает возможность судоходной компании планировать погрузку и распределение рабочей силы с учетом важности погрузо-разгрузочных работ.

23. Наличие собственной широкой технической базы.

Наличие технической базы упрощает погрузку и доставку груза из пункта отправления в пункт назначения. Речь идет о таких видах автотехники как автокран, вилочные погрузчики и иные подъемные механизмы, а также авторампы / эстакады (пандуса) для организации перегрузочного процесса, контейнерное оборудование: стандартное, повышенной вместимости, «опентоп».

24. Возможность организации транспортировки различных видов груза (сборные, тяжеловесные, негабаритные).

Способность организовать транспортировку разных видов грузов повышает привлекательность данной компании на рынке. Для этого компании необходимо иметь в наличии как узкоспециализированную техническую базу, так и соответствующих специалистов.

25. Возможность организации доставки грузов двумя и более видами транспорта (мультимодальность).

Речь идет о возможности компании перевозить (или организовать перевозку) груза по одному договору с потребителем перевозит груз двумя (и более) видами транспортных средств. При этом судоходная компания несет полную ответственность перед отправителем за транспортировку груза по всем звеньям цепи доставки груза.

26. Возможность предоставления персонального менеджера.

Предоставление персонального менеджера отправителю позволяет осуществлять качественные консультации по содержанию услуг, разрабатывать индивидуальные схемы доставки, получать достоверную информацию в пути следования груза, своевременно оформлять и предоставлять всю необходимую документацию, принимать оперативные решения в процессе следования груза. При этом следует подчеркнуть, что уважительные, доверительные межличностные отношения между персональным

менеджером и потребителем являются важным фактором формирования долгосрочного взаимовыгодного сотрудничества потребителя с данной компанией.

27. Наличие автоматизированной системы обработки и приема заявок.

Речь идет об автоматизированной системе обработки и приема заявок самостоятельно потребителем. Особенность этой системы в том, что судоходная компания разрабатывает приложение к интернет-сайту, а отправитель в свою очередь, используя индивидуальный логин и пароль, получает регистрацию в личном кабинете. Программа автоматизирует заполнение заявок, статус обработки заявки с указанием комментариев, слежение груза, на всех этапах пути следования, возможность общения с онлайн консультантом, с возможностью добавления и удаления услуг в пути следования груза.

В частности, компания предоставляет потребителю персональный трек-код для отслеживания прохождения груза по пути следования. Данная услуга позволяет потребителю самостоятельно изучить движение груза по заявленному маршруту, а также оплатить услуги через электронную систему платежей и т.д.

28. Оперативная адаптация к условиям меняющегося рынка.

В условиях современной рыночной экономики каждый поставщик услуг вправе менять свою ценовую политику и условия работы, что напрямую связано с изменением комплексной ставки за услуги по доставке груза для конечного потребителя. Например, в случае удорожания одного из звеньев цепи доставки, комплексная ставка может стать предельно высокой и не конкурентоспособной на рынке. В этой связи судоходная компания может оперативно решать задачи по корректировке схем движения груза и условий работы с целью оптимизации расходов и предоставления оптимальной цены за перевозку.

29. Компетентность персонала.

Компетентность персонала является важнейшей характеристикой компании, оказывающей транспортные услуги.

30. Соблюдение конфиденциальности.

Сотрудничая с судоходной компанией по доставке груза, отправитель вынужден сообщать последней информацию о наименовании товара, вес, количество, контактные данные, куда и кому доставляется товар (адреса доставки) и т.д., что нередко является для отправителя коммерческой тайной. В этой связи судоходная компания должна гарантировать отправителю, что указанная информация не станет достоянием третьих лиц.

2. Имиджевые факторы

31. Деловая репутация.

Деловая репутация, прежде всего, говорит об истории выполнения данной компанией своих договорных обязательств.

32. Известность бренда.

Речь идет об известности бренда компании.

33. Качество фирменного стиля.

Под фирменным стилем понимается визуальное изображение, единая цветовая гамма и стиль написания текста для узнаваемости бренда на рынке. Фирменный стиль прослеживается на всех печатных продукциях предприятия, таких как: визитки, буклеты, рекламная продукция, фирменные бланки и т.д.

34. Финансовая устойчивость компании.

Финансовая устойчивость компании является одним из основных факторов выбора продукции на рынке.

35. Личность руководителя.

Основными характеристиками руководителя компании являются его компетентность, доброжелательность, порядочность, социальная ответственность и т.д.

36. Известность деловых партнеров.

Известность деловых партнеров является одним из основных качеств, характеризующих данную компанию.

37. Уровень культуры поведения персонала.

Речь идет об общей культуре поведения, профессиональных ценностях, этике и эстетике обслуживания, а также общепринятых международных стандартах делового стиля сотрудников компании.

38. Наличие профессиональных знаков отличия.

Наличие профессиональных знаков отличия (призы, грамоты и др.) свидетельствует о профессиональном уровне сотрудников компании.

39. Участие в решении социальных проблем.

Участие в решении социальных проблем говорит о социально ответственном поведении сотрудников компании.

40. Качество информационно-рекламных продуктов.

Качество информационно-рекламных продуктов является одним из заметных факторов выбора продукции на рынке.

41. Внешний вид офисного здания.

Внешний вид офисного здания (расположение, техническое оснащение, наличие современного ремонта и т.д.) является одним из важных факторов принятия отправителем решения о сотрудничестве с данной компанией. Неприглядный внешний вид офиса может разочаровать потребителя, вызвать у него сомнения в успешности и надежности данной компании.

В завершение хотелось бы еще раз подчеркнуть, что все выявленные факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок позволят разработать методику оценки конкурентоспособности таких перевозок на основе эмоциональной теории продаж, а также сформировать на предприятиях морского транспорта эффективную систему управления конкурентоспособностью морских перевозок.

Литература

1. Исаев, А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект / А.А. Исаев // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. – 2017. – Т.9. № 2. – С. 144-150.
2. Исаев, А.А. Эмоциональная теория продаж / А.А. Исаев. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 136 с.
3. Мегей, Е.С. Понятие «конкурентоспособность предприятия» / Е.С. Мегей // Актуальные проблемы рынка: сборник научных статей. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – С. 57-66.

References

1. Isaev, A. A. Ocenka konkurentosposobnosti produkcii: metodologicheskij aspekt. Territorija novyh vozmozhnostej. Vestnik VVSU (Assessment of product competitiveness: methodological aspect. Territory of new opportunities. Vestnik VVSU), Vol.9. № 2, pp. 144-150.
2. Isaev, A. A. Jemocional'naja teorija prodazh [Emotional theory of sales]. Vladivostok, VVSU Publ., 2016. 136 p.
3. Megej, E.S. Ponjatie «konkurentosposobnost' predprijatija». Aktual'nye problemy rynka: sbornik nauchnyh statej (The concept of "enterprise competitiveness". Actual problems of the market: Collections of scientific papers). Vladivostok, VVSU Publ., 2016. pp. 57-66.

УДК 629.12

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭФФЕКТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКРАНА, ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АКВАТОРИИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Трубникова Екатерина Ивановна

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры управления производством
Калининградский государственный технический университет.
236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: ei.trubnikova@gmail.com

Трубников Дмитрий Алексеевич

кандидат экономических наук, кафедра экономической безопасности
Калининградский государственный технический университет.
236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: da.trubnikov@gmail.com

Назаров Дмитрий Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34
e-mail: d.v.nazarov@ssau.ru

Аннотация

Статья посвящена оценке перспектив использования высокоскоростных транспортных средств, использующих эффект аэродинамического экрана для развития транспортной инфраструктуры акватории Балтийского моря на примере экранопланов и экранолетов. Исследования указанных вопросов могут способствовать улучшению доступности регионов Балтийского моря. Статья базируется на анализе истории развития и степени научной и практической проработанности использования преимуществ экранного эффекта для формирования транспортного сообщения. В статье представлен анализ географической, технической и технологической возможности реализации и развития транспортной инфраструктуры с учетом специфики акватории Балтийского моря. Развитие транспортной инфраструктуры может служить целям формирования устойчивых к климату транспортных сетей, а также способствовать улучшению мобильности товаров и пассажиров и росту инвестиционной привлекательности региона.

Ключевые слова: Аэродинамический экран, транспорт, воздушная подушка, инфраструктура, Балтийское море, экраноплан, экранолет, инвестиционный климат.

ASSESSMENT OF HIGH-SPEED VEHICLES IMPLEMENTATION USING WING-IN-GROUND (WIG) EFFECT FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF BALTIC SEA DEVELOPMENT

Ekaterina I. Trubnikova

Dr. Sci. Econ., Professor of the Enterprise Management Department
Kaliningrad State Technical University.
1 Sovetskiy prospect, 236022 Kaliningrad, Russia
e-mail: ei.trubnikova@gmail.com

Dmitrii A. Trubnikov

PhD. Sci. Econ., Department of Economic Security,
Kaliningrad State Technical University.
1 Sovetskiy prospect, 236022 Kaliningrad, Russia
e-mail: da.trubnikov@gmail.com

Dmitry V. Nazarov

PhD. Sci. Tech., Associate Professor of the Department of Aircraft Construction and Design,
Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086 Russia
e-mail: d.v.nazarov@ssau.ru

Abstract

The paper is dedicated to the assessment of perspectives of implementation of high-speed vehicles that use aerodynamic shield for development of transport infrastructure of Baltic sea with a particular focus on wing-in-ground. Understanding of these issues is able to contribute to enhancement of the accessibility of Baltic regions. The article is based on the analysis of the history of development and the degree of scientific and practical elaboration of the benefits of wing in ground effect for the formation of transport communications. The article presents an analysis of the geographical, technical and technological feasibility of the implementation and development of transport infrastructure, taking into account the Baltic Sea specifics. The development of transport infrastructure can serve the purposes of forming climate-resilient transport networks, and also contribute to improving the mobility of goods and passengers and increasing the investment attractiveness of the region.

Key words: wing-in-ground effect, transportation, ground effect vehicle, infrastructure, Baltic sea, ekranoplan, innovation, investment.

Введение

Технология использования водной глади для перемещения товаров и пассажиров накладывает ограничения по скорости водного объекта, глубине фарватера, иным факторам. Однако существуют разработки, решающие проблему высокоскоростного перемещения без предъявления или при снижении перечисленных требований.

Летательные объекты, использующие экранный эффект, обладают несомненными преимуществами: возможность круглогодичной эксплуатации, способность перевозить более тяжелые грузы по сравнению с самолетами сопоставимых размеров, превосходство над водным транспортом по скорости и дальности перемещения. Транспортные средства, использующие эффект аэродинамического экрана, осуществляют движение в нескольких метрах над водной или иной относительно ровной поверхностью (земли, снега, льда), при этом значительно повышается аэродинамическое качество аппарата по отношению к свободному полету. Отсутствие гидродинамического сопротивления делает транспортное средство экономичным. В результате на относительно небольших расстояниях достигается экономия топлива по отношению к обычным летательным объектам и преимущества в скоростном режиме по отношению к водным видам транспорта.

Основной целью статьи является исследование и оценка использования высокоскоростных транспортных средств, использующих эффект аэродинамического экрана в акватории Балтийского моря. Статья базируется на анализе истории развития и степени научной и практической проработанности использования преимуществ экранного эффекта для формирования транспортного сообщения. В статье представлен анализ географической, технической и технологической возможности реализации и развития транспортной инфраструктуры с использованием эффекта аэродинамического экрана с учетом специфики акватории Балтийского моря.

Стратегия ЕС рассматривает побережье Балтийского моря как «модель регионального сотрудничества», в рамках которой могут быть

протестированы новые идеи и подходы для формирования «лучших практик»[1]. В связи с чем, исследование использования инновационных подходов для развития транспортной инфраструктуры в акватории Балтики имеет несомненные перспективы.

В рамках программы приграничного сотрудничества «Литва-Польша-Россия» 2007-2013 гг. было реализовано более 50 проектов[2], среди которых важное значение отводилось развитию трансграничных связей стран участниц.

1. История и анализ степени научной и практической проработанности вопроса

Первую половину двадцатого века водный транспорт был тихоходным и по скорости не мог конкурировать с другими видами транспорта. Однако уже в 60-х годах в России коллективом ЦКБ по СПК (ныне ОАО «ЦКБ по СПК имени Р.Е. Алексеева») были запущены в серию суда на подводных крыльях (СПК), а затем суда на воздушной подушке. Скорости таких судов достигали уже 50-80 км/час. Таким образом, удалось в 3-4 раза повысить скорость перевозки пассажиров по речным и морским маршрутам. Дальнейшее увеличение скорости СПК упиралось в проблему кавитации. СВП также имеют ограничение по скорости, которое связано с большим лобовым сопротивлением в результате наличия ограждения камеры воздушной подушки. Следующий качественный скачок в эффективности водного транспорта был сделан ЦКБ по СПК в 1960-1980 г.г. Под руководством Р. Алексеева был построен ряд аппаратов, использующих в качестве сил поддержания эффект экрана. Параллельно в СССР разработки в рамках концепции «безаэродромных самолётов» велись в авиационном Конструкторском Бюро имени Г. М. Бериева в Таганроге под руководством Р.Бартини (1968—1974)[3].

Из зарубежных исследований следует отметить разработки американского конструктора гоночных катеров Д.Уорнера в период 1940-1960 хх, американского инженера Х.Зундштета в 1948 году[4], «ground-effect aquatic sports car» (Aerofoilboot) немецких инженеров А. Липпиша и Х.Фишера в 1960-х, проект Pelican компании Боинг в 1990-х годах.

В 1992 г. в РФ создана межвузовская научно-техническая программа "Экраноплан", инициированная Казанским государственным техническим университетом им. А.Н.Туполева и Чкаловским филиалом ЦНИИ им. А.Н.Крылова, которая является попыткой скоординировать исследования и разработки в области создания транспортных средств на основе экранного эффекта [5].

В последнее время тема применения транспортных средств, использующих преимущества аэродинамического экрана, снова приобрела актуальность и получила развитие в современных научных разработках и бизнес проектах. Планируется организация сообщения между Таллином и Хельсинки с использованием данной технологии компанией Sea Wolf Express, (на основе российских разработок)[6]. В 2015 году у побережья Хайкоу в провинции Хайнань в Китае были протестированы аппараты CYG-11[7], которые основываются на российском экраноплане «Иволга» (гл.конструктор Колганов В.В.). Организованная Х.Фишером и К.Матиастиком в 1997 году компания Airfoil Development GmbH (AFD) базировала свои основные разработки аппаратов, использующих экранный эффект (WIG Craft), на конструкции треугольного крыла обратной стреловидности А.Липпиша. В настоящее время владельцем данных решений является компания Wigetworks Pte Ltd (Сингапур)[8]. Этой же компанией выкуплены прототипы Airfish 8 и Airfish 3 с целью коммерциализации и формирования транспортного сообщения между островами в Индонезии, на Филиппинах, в Полинезии и в Карибском бассейне [9]. Также можно отметить проект южнокорейской корпорации Wing Ship Technology [10].

2. Анализ географической, технологической и технической возможности реализации проекта

2.1. Особенности географического расположения

Акватория Балтийского моря включает в себя более 200 морских портов, в т. ч. более 180 с грузооборотом превышающим 50 тыс. тонн в год[11]. При этом для перспектив развития Балтийского региона особое внимание уделяется портам малого и среднего размеров[12].

Особенности акватории Балтийского моря: относительно низкая плотность населения [13]; специфические климатические условия; несбалансированность работы транспортной системы; плохое состояние сооружений на отдельных территориях; вертикальная протяженность региона; необходимость обеспечения круглогодичных трансферов вне зависимости от метео-условий; ограниченная возможность для строительства наземных капитальных сооружений; требование высокой экономичности при незначительной дальности перемещения; сложность фарватера и относительно небольшая

площадь и небольшие глубины отдельных заливов, таких как Вислинский (Калининградский) и Куршский.

Эти особенности накладывают определенные требования к формированию транспортной инфраструктуры региона. В данной связи необходимо отметить прохождение международного водного маршрута Е-70, соединяющего Роттердам (Нидерланды) с Клайпедой (Литва) и проходящего через территорию Германии, Польши, России. Протяженность маршрута по российской территории составляет около 280 км водных путей (в Калининградской обл. это акватории Калининградского и Куршского заливов, а также рек Преголи и Деймы)[14]. Глубина Калининградского морского канала накладывает ограничения по габаритам морских судов, что снижает возможности региона в грузообороте. Однако, данное обстоятельство совершенно не играет решающего значения, если грузоперевозки будут осуществляться судами на основе экранного эффекта.

2.2. Технологическая и техническая возможность реализации проекта

В России на сегодняшний день развивается сразу несколько проектов, целью которых является создание аппаратов использующих в качестве сил поддержания эффект экрана. В первую очередь стоит отметить экранопланы семейства «Иволга» - ЗАО НПК «Трек» г. Жуковский. Эти машины летают и уже успели неплохо зарекомендовать себя. Основное преимущество проекта – его проработка и наличие машин, находящихся в реальной эксплуатации. К недостаткам можно отнести взлетно-посадочное устройство, основанное на поддуве под крыло, которое требует очень больших затрат мощности, что приводит к снижению транспортной эффективности аппарата. Кроме того высокая продажная цена машины не позволяет эксплуатировать ее в России.

Проект Э.В. Васильева развивается в Н.Новгороде под маркой RDC AQUALINES. На настоящий момент построен экспериментальный 2-х местный образец. Именно эти аппараты планируется использовать на линии Таллин – Хельсинки. Концепция проекта заключается в использовании отработанной Алексеевской аэродинамической схемы. В качестве взлетно-посадочного устройства планируется использовать гидролыжу, которая по замыслу автора позволит снизить ударные нагрузки на водоизмещающий корпус экраноплана. Отличительной особенностью также является однодвигательная схема аппарата, которая предусматривает применение воздушных винтов большого диаметра, что повышает общее КПД движительной установки. К недостаткам проекта можно отнести большую потребляемую мощность, которая необходима для обеспечения взлета аппарата, что связано с выбором гидролыжного

устройства для взлета и посадки. Положительной стороной является высокая мореходность и хорошая приспособленность аппарата к инфраструктуре водного транспорта.

Другой проект экраноплана Буревестник 24 (компания «Небо+Море»), находится в стадии экспериментального образца [15]. Особенностью конструкции является фактически бипланная схема аппарата и полное отсутствие взлетно-посадочного устройства. В результате аппарат взлетает как гидросамолет, а значит говорить об экономичности и амфибийности не приходится.

Самый крупный проект, который на сегодняшний день развивается в РФ, разрабатывает ОАО «ЦКБ по СПК имени Р.Е. Алексеева» (ныне подразделение НПП «Радар ммс»). К 2020-2022 гг. планируется построить экраноплан «Чайка» взлетным весом 54 тонны на 100 пассажиров. Экраноплан имеет составное экранное крыло и самолетное крыло, то есть бипланную схему. В качестве взлетно-посадочного устройства применен поддув под крыло, для чего используются отдельные двигатели. Пока проект находится в стадии разработки документации.

Проект НВА, который разработан специалистами компаний Амфикон, а затем БайкалЭнергоТранс, в настоящее время развивается на базе Самарского университета в виде проекта 20 местного экраноплана. Авторы проекта пытались устранить основной недостаток ранних моделей экранопланов – водоизмещающий взлет с воды, который требует несоизмеримых затрат мощности по сравнению с экранным полетом [16]. В результате появился проект НВА – 07- 065 «Сибирь», который в качестве взлетно-посадочного устройства использует статическую воздушную подушку. Такая комбинация статической и динамической воздушной подушки создает основные преимущества проекта: относительно низкие энергозатраты, безаэродромное базирование, минимальные требования по инфраструктуре, круглогодичная эксплуатация, амфибийность. Аппарат получает дополнительный режим движения – на статической воздушной подушке, что значительно повышает не только амфибийные качества аппарата, но и безопасность его эксплуатации. Такая машина может не только летать с самолетными скоростями, но и двигаться с достаточно высокой скоростью по сложным участкам (мосты, каналы, горные реки) в режиме статической воздушной подушки. Основным недостатком проекта является стадия его проработки. В настоящее время закончено эскизное проектирование и строится экспериментальная летающая модель аппарата.

В качестве перспективного проекта в настоящее время ЦАГИ разрабатывает концепцию тяжелого транспортного самолета – экраноплана интегральной схемы [17]. Самолет предназначен для межконтинентальной транспортировки большого объема грузов – до

500 тонн. Планируется, что большая часть полета такого аппарата будет проходить в экранном режиме, то есть вблизи опорной поверхности, что приведет к значительному снижению расхода топлива и увеличению дальности полета.

Такое количество одновременно разрабатываемых проектов уже само по себе говорит об актуальности применения экранопланов в качестве транспортного средства.

2.3. Целесообразность, перспективы и трудности реализации проекта

Кодекс безопасности Международной морской организации (ИМО) выделяет три класса объектов, использующих экранный эффект без непосредственного контакта с водой [18]:

- Тип А: «чистые ЭП», способные двигаться только при взаимодействии с экраном;

- Тип В: аппараты, способные летать вне экрана на высотах до 150 м;

- Тип С: аппараты, способные использовать экранный эффект, но имеющие возможность эксплуатироваться вне зоны действия экрана на высотах более 150 м.

Особенности ландшафта акватории Балтийского моря во многих случаях делают возможным использование аппаратов, технологически более привязанных к взаимодействию с экраном и, соответственно, более дешевых по эксплуатационным затратам, т.е. аппаратов типа А. Среди существующих моделей, возможных для использования, можно назвать: "Волга-2", "Амфистар", а также аппараты, спроектированные Т.Карио, У.Бертельсона. Проблема наличия непродолжительного препятствия на траектории движения (Балтийская и Куршская коса) может быть решена при условии создания определенной инфраструктуры: строительство дорожного покрытия для пересечения преграды, координация перемещения объектов в этих районах, формирование правил и механизмов реализации пересечения преграды. Другим вариантом является применение аппаратов типа В, таких как уже существующие модели серии Airfish 8 (Hanno Fischer), «Иволга», «Буревестник 24», «Сибирь».

Экранопланы обладают преимуществами по скорости по отношению к водоизмещающим судам и СВП, обладают высоким аэродинамическим качеством зачастую превышающим показатели современных самолетов, их мореходные качества выше, чем у гидросамолетов. Кроме того, экранопланы могут иметь высокие амфибийные качества, сравнимые с СВП, что позволяет самостоятельно выходить на относительно ровный берег и обеспечивает круглогодичную эксплуатацию. Все эти качества современных экранопланов не удается объединить каким-либо обобщенным показателем. Оценка экономической эффективности использования экранопланов в качестве скоростного водного транспорта может быть

произведена с помощью диаграммы Кармана-Габриелли по показателю KV (произведение качества на скорость движения). Такой анализ показывает, что в диапазоне скоростей от 200 до 500 км/час экранопланы эффективнее, чем любые другие транспортные средства [19]. Исследования ЦАГИ [20] показывают наиболее выгодное использование экранопланов как водного транспорта на маршрутах протяженностью от 100 до 1500 км.

Заключение

Технологическое развитие исследований аэродинамического взаимодействия движущегося объекта с поверхностью может стать не только улучшающей инновацией, но также выступать прорывным инновационным решением, и даже иметь эффект инновации, способной перевернуть современное представление о транспортной инфраструктуре и возможностях перемещения товарных и пассажирских потоков. В соответствии с подходом к инновационным разработкам, предложенным Бауэром и Кристиансеном [21], подобные инновации способны изменить даже само представление о том, как функционирует индустрия. Исследования данного вопроса также могут внести свой вклад в разработку направления, предусмотренного в рамках Европейской программы Horizon 2020, которая в числе прочего предусматривает исследование трансформирующего эффекта подобных технологий в предоставлении общественных сервисов.

Решение проблемы транспортного сообщения с помощью средств, использующих эффект аэродинамического экрана, потенциально также может иметь положительное влияние на привлечение инвестиций в регионы Балтики. Населенные пункты, расположенные в глубине Вислинского (Калининградского) и Куршского заливов, имеют потребность транспортного сообщения, и его реализация и развитие могут предоставить определенные преимущества не только жителям данных территорий, но косвенным участникам транспортного проекта.

Исследование возможности использования инновационных подходов для формирования транспортной инфраструктуры с использованием высокоскоростных средств на основе эффекта аэродинамического экрана, должно внести определенный вклад, как в развитие транспортной сети регионов, так и в развитие трансграничных социальных, культурных и других сфер отношений стран Балтийской акватории.

Литература

1. European Union Strategy for the Baltic Sea Region. 2009. Available at: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/communic/baltic/com_baltic_en.pdf
2. Lithuania-Poland-Russia ENPI Cross-border Cooperation Programme 2007-2013. Available at: <http://www.lt-pl-ru.eu>
3. Каминский Ю. Одиссея «Красного барона» // Техника молодёжи. – 2000. – № 6. – С. 20–23.
4. Матвеев А. Служение скорости // Н. Новгород: Изд-во Дятловы горы. – 2006. Available at: <http://katera.ru/files/magazines/215/082-089.pdf>
5. Дегтярев Г. Л. и др. Научно-технические проблемы создания транспортных экранопланов гражданского применения // Вестник Казанского государственного технического университета им. АН Туполева. – 2000. – № 3. – С. 3-8.
6. Launch of rapid GEV service on Tallinn-Helsinki route postponed until 2018. Available at: <http://news.err.ee/119415/launch-of-rapid-gev-service-on-tallinn-helsinki-route-postponed-until-2018>
7. Chinese CYG-11 craft that can fly or 'float' on a cushion of air above the sea. Available at: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3043298/Is-hovercraft-plane-No-s-Chinese-CYG-11-craft-fly-float-cushion-air-sea.html>
8. Wigetworks Private Limited (Wigetworks). Available at: <http://www.wigetworks.com/>
9. Airfish 8: This Unique Marine Craft Will Change The Way People Travel. Available at: <https://www.forbes.com/sites/tarandipkaur/2017/08/10/airfish-8-this-unique-marine-craft-will-change-the-way-people-travel/#76c8ff55639d>
10. Ground-effect vehicles are a clever idea whose time has never come—so far. Nov 1st 2014 The Economist. Available at: <https://www.economist.com/news/science-and-technology/21629224-ground-effect-vehicles-are-clever-idea-whose-time-has-never-comeso-far-phoenix>
11. Мельник Д. А. Морской транспорт как системообразующий элемент Балтийского транснационального транспортного региона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2013. – № 1.
12. SMP Dev - Small and medium-sized Baltic Sea ports development challenge. University of Turku. Available at: https://www.utu.fi/en/units/cms/projects/SMP_Dev/Pages/home.aspx
13. Щербанин Ю. А. Балтийское море: транспорт, сотрудничество, вызовы // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2010. – № 8.
14. Международный водный тупик: репортаж RUGRAD.EU. Available at: <https://rugrad.eu/news/974996/>
15. Испытания первых экранопланов «Буревестник-24» завершатся в 2018 году. BBC24.Net Available at: <https://bbc24.net/finance/economy/ispy-taniya-pervy-h-e-kranoplanov-burevestnik-24-zavershatsya-v-2018-godu/>
16. Fischer Flugmechanik. Available at: <http://www.fischer-flugmechanik.com/site/index.php?menu=hoverwingtech>
17. В ЦАГИ разрабатывают концепцию интегрального экраноплана. Available at: <http://aviation21.ru/v-cagi-gazrabatuyayut-konceptsiyu-integralnogo-ekranoplana/>
18. Булыгин А. В., Моисеев А. Н. Экраноплан и другие транспортные средства // Вестник Казанского государственного технического университета им. АН Туполева. – 2001. – № 4. – С. 3-7.
19. Маскалик А. И., Колызаев Б. А., Жуков В. И. Экранопланы. Особенности теории и проектирования. – СПб.: Судостроение, 2000.
20. Сколянский В.П., Скворцов Е.Б. О возможной эффективности летательных аппаратов водного базирования в качестве транспортной системы // Техника воздушного флота, т. LXXIII, №4-5, 1999. С. 60-64.
21. Bower, J. L., and C. M. Christensen. "Disruptive Technologies: Catching the Wave." Harvard Business Review 73, no. 1 (1995): 43–53.

References

1. European Union Strategy for the Baltic Sea Region. 2009. Available at: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/communic/baltic/com_baltic_en.pdf
2. Lithuania-Poland-Russia ENPI Cross-border Cooperation Programme 2007-2013. Available at: <http://www.lt-pl-ru.eu>
3. Kaminskiy Yu. (2000) Odisseye «Krasnogo barona». Tekhnika molodezhi. 6, 20–23.
4. Matveev A. (2006) Sluzhenie skorosti. N. Novgorod: Izdvo Dyatlovy gory. Available at: <http://katera.ru/files/magazines/215/082-089.pdf>
5. Degtyarev G. & oth. (2000) Nauchno-tekhnicheskie problemy sozdaniya transportnykh ekranoplanov grazhdanskogo primeneniya. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. AN Tupoleva. 3, 3-8.
6. Launch of rapid GEV service on Tallinn-Helsinki route postponed until 2018. Available at: <http://news.err.ee/119415/launch-of-rapid-gev-service-on-tallinn-helsinki-route-postponed-until-2018>
7. Chinese CYG-11 craft that can fly or 'float' on a cushion of air above the sea. Available at: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3043298/Is-hovercraft-plane-No-s-Chinese-CYG-11-craft-fly-float-cushion-air-sea.html>
8. Wigetworks Private Limited (Wigetworks). Available at: <http://www.wigetworks.com/>
9. Airfish 8: This Unique Marine Craft Will Change The Way People Travel. Available at: <https://www.forbes.com/sites/tarandipkaur/2017/08/10/airfish-8-this-unique-marine-craft-will-change-the-way-people-travel/#76c8ff55639d>

10. Ground-effect vehicles are a clever idea whose time has never come—so far. Nov 1st 2014 The Economist. Available at: <https://www.economist.com/news/science-and-technology/21629224-ground-effect-vehicles-are-clever-idea-whose-time-has-never-comeso-far-phoenix>
11. Mel'nik D. (2013) Morskoy transport kak sistemoobrazuyushchiy element Baltiyskogo transnatsional'nogo transportnogo regiona. Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki. 1.
12. SMP Dev - Small and medium-sized Baltic Sea ports development challenge. University of Turku. Available at: https://www.utu.fi/en/units/cms/projects/SMP_Dev/Pages/home.aspx
13. Shcherbanin Yu. (2010) Baltiyskoe more: transport, sotrudnichestvo, vyzovy. Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN. 8.
14. Mezhdunarodnyy vodnyy tupik: reportazh RUGRAD.EU. Available at: <https://rugrad.eu/news/974996/>
15. Ispytaniya pervykh ekranoplanov «Burevestnik-24» zavershatsya v 2018 godu. BBC24.Net Available at: <https://bbc24.net/finance/economy/istryaniya-pervykh-ekranoplanov-burevestnik-24-zavershatsya-v-2018-godu/>
16. Fischer Flugmechanik. Available at: <http://www.fischer-flugmechanik.com/site/index.php?menu=hoverwingtech>
17. V TsAGI razrabatyvayut kontseptsiyu integral'nogo ekranoplana. Available at: <http://aviation21.ru/v-cagi-razrabatyvayut-koncepciyu-integralnogo-ekranoplana/>
18. Bulygin A., Moiseev A. (2001) Ekranoplan i drugie transportnye sredstva //Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. AN Tupoleva. 4, 3-7.
19. Maskalik A., Kolyzaev B. & Zhukov V. (2000) Ekranoplany. Osnobennosti teorii i proektirovaniya. Sudostroenie.
20. Skolyanskiy V., Skvortsov E. (1999) O vozmozhnoy effektivnosti letatel'nykh apparatov vodnogo bazirovaniya v kachestve transportnoy sistemy. Tekhnika vozdushnogo flota, 73(4-5), 60-64.
21. Bower, J. L., & Christensen, C. M. (1995). Disruptive technologies: catching the wave. Harvard Business Review 73(1): 43–53.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

УДК 629.12.001.2

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА
КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ MATHCAD****Наталья Викторовна Васильева**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: nww13@mail.ru

Владимир Викторович Григорьев-Голубев

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: grig_golubev@mail.ru

Ирина Владимировна Евграфова

кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: spbmtu@yandex.ru

Надежда Борисовна Кунтурова

доктор педагогических наук, профессор 111 кафедры
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13
e-mail: giz26@rambler.ru

Леора Светлана Николаевна,

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики
Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9,
e-mail: leora2008@mail.ru

Аннотация

В статье обсуждается проблема выбора оптимального пакета математических программ для проведения инженерных расчетов. Обсуждаются достоинства пакета Mathcad – универсального пакета компьютерной математики, обладающего широкими возможностями для решения большого круга инженерных и научных задач. Основное преимущество пакета: естественный математический язык рабочего листа задачи, что дает возможность пользователю получить после проведенных расчетов готовый итоговый документ.

Показано, что простой в применении и сравнительно недорогой пакет Mathcad может при использовании инструментов оптимизации расчетов дать очень неплохие результаты в приложении к некоторым задачам гидроупругости, связанным с операциями с комплекснозначными функциями большого порядка и большими временами счета.

Продемонстрированы широкие возможности решения в виртуальной среде Mathcad задач моделирования случайных процессов с использованием генератора случайных чисел и исследования их методами математической статистики.

Ключевые слова: Mathcad, оптимизация вычислений, звуковое давление, присоединенная масса, нормальная нагрузка, случайный процесс, предельные вероятности, выборочный метод статистики.

**OPTIMIZATION OF ENGINEERING CALCULATIONS BY MEANS
OF A PACKAGE OF COMPUTER MATHEMATICS OF MATHCAD****Natalia V. Vasilieva**

the associate professor, Cand. Sci. Tech., the associate professor of department of mathematics
State marine technical university of Saint Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: nww13@mail.ru

Vladimir V. Grigorev-Golubev,

Cand. Sc. Phys.-Math., the professor of department of mathematics

State marine technical university of Saint Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: grig_golubev@mail.ru.

Irina V. Evgrafova

Cand. Sci. Ped., the associate professor of department of mathematics
State marine technical university of Saint Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: spbmtu@yandex.ru.

Nadezhda B. Kunturova

Dr. Sci. Ped., the professor of the department 111
Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy
Zhdanovskaya 13, St. Petersburg, 197198, Russian Federation
e-mail: giz26@rambler.ru

Svetlana N. Leora

the associate professor, Cand. Sc. Phys.-Math., the associate professor of department of mathematics
Saint Petersburg State University
Universitetskaja 7/9, St. Petersburg 199034, Russian Federation
e-mail: leora2008@mail.ru

Abstract

The article discusses the problem of choosing an optimal package of mathematical programs for engineering calculations. Discusses advantages of package Mathcad – a versatile package of computer mathematics, has broad capabilities for a wide range of engineering and scientific problems. The main advantage of the package: natural mathematical language work-sheet of problem that enables the user to obtain after the calculations are ready the final document.

It is shown that a simple to use and relatively inexpensive package Mathcad can at use optimization tools calculations give very good results in application to some problems of hydroelasticity related with operations with complex-valued functions of large order and large calculations time

Demonstrated the possibility of solving in a virtual environment Mathcad tasks of modeling of random processes using a random number generator and study them by methods of mathematical statistics.

Keywords: Mathcad, optimization of calculations, sound pressure, added mass, normal load, random process, limiting probabilities, sampling method of statistics.

Введение

В настоящее время для проведения инженерных расчетов можно использовать различные пакеты прикладных программ. Однако, каждый из них имеет свои особенности. Значимые практические результаты могут быть получены только на основе профессиональных знаний в предметной области, подкрепленных владением математическими методами и пакетами прикладных программ, в которых эти методы реализованы.

Как известно, все расчёты в среде Mathcad проводятся на визуально–ориентированном языке программирования, который практически не отличается от обычного языка математических статей и книг. Это огромное достоинство среды Mathcad: все документы (*Work-sheets*) Mathcad понятны даже непрограммистам.

Визуальная среда математического моделирования Mathcad допускает создание интерактивных документов с вычислениями (символьными и приближенными) и графическим сопровождением. Набор его инструментов и встроенных функций отличается легкостью использования по сравнению с другими пакетами математических программ и поэтому доступен любому пользователю.

Панели пакета Mathcad 14,15 и Ленты пакета Mathcad Prime позволяют легко ориентироваться в необходимых для решения математических задач инструментах, а элементы программирования имеют простую логическую структуру. При решении математических задач можно сочетать символьную математику и вычислительную математику, а также использовать графические возможности пакета.

Авторы разработали целый комплекс решения задач дисциплины Математика в среде Mathcad, как в символьном виде, так и приближенно. Использованию пакета Mathcad 14, как и свободно распространяемому пакету Scilab, посвящена работа [1]. Все инструменты двух версий пакета: Mathcad 14,15 и Mathcad Prime подробно описываются в работах [2–3].

В работе [4] приведены математические модели и алгоритмы решения задач вычислительной математики в пакетах Mathcad, MATLAB и Maple, а в работе [5] авторами разработано описание и решение в среде Mathcad набора лабораторных работ по численным методам.

Уникальной является работа [6], в которой разбирается решение задач дискретной математике в пакетах Mathcad и Mathematica,

сравниваются их возможности, удобство использования и полученные результаты.

В настоящей статье авторы хотели показать, что, несмотря на ограниченные возможности пакета Mathcad по сравнению, например, с пакетом Mathematica, эффективное использование этого пакета возможно и при решении достаточно сложных вычислительных задач, связанных с громоздкими расчетами. Кроме того, в отличие от пакета MATLAB, инструментарий Mathcad дает возможность проводить эффективную статистическую обработку экспериментальных данных. В сочетании с простотой и доступностью это делает пакет MATHCAD оптимальным для пользователя при проведении ряда инженерных расчетов.

1. Оптимизация вычислений при инженерных расчетах

В качестве примера рассмотрим одну из задач гидроупругости: задачу исследования звукового поля при колебании бесконечной круговой цилиндрической оболочки под действием гармонической силы, сосредоточенной вдоль оси цилиндра. Расчеты в этой задаче проводились в режиме Оптимизация, при котором численный и символьный процессоры «общаются друг с другом», т.е. символьный процессор представляет вычисляемое выражение в упрощенной форме, а численный процессор вычисляет преобразованное выражение.

Нормальная нагрузка задавалась в виде:

$$P_1(\theta, t) = P_0 \delta(\theta) e^{i\Omega t}.$$

Уравнения колебаний оболочки под действием этой нагрузки имеют вид [6]:

$$\begin{cases} \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r_0} \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0, \\ \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\kappa^2}{r_0^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} + w + \frac{1}{r_0} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{1}{\rho c_1^2 h} (P_1 - P_2), \end{cases}$$

где: $\kappa^2 = \frac{h^2}{12r_0}$; $c_1^2 = \frac{E}{\rho(1-\nu^2)}$; $v(\theta, t), w(\theta, t)$ –

перемещения срединной поверхности оболочки; h, r_0 – ее толщина и радиус; r, θ, t – полярные координаты и время; ν, E, ρ – коэффициент Пуассона, модуль упругости и плотность материала оболочки; $P_1(r, \theta, t), P_2(r, \theta, t)$ – действующая нормальная нагрузка и гидродинамические силы.

Движение жидкости описывается волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_0^2 h} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

в котором $\varphi(r, \theta, t)$ – потенциал жидкости, c_0 – скорость звука.

Давление $P_2(r, \theta, t)$ определяется с помощью линеаризованного интеграла Коши–Лагранжа:

$$P_2 = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

где ρ_0 – плотность жидкости.

На поверхности оболочки соблюдается условие неразрывности:

$$v_r = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{r=r_0} = \frac{\partial w}{\partial t},$$

а при удалении от оболочки возмущения в жидкости затухают:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \varphi = 0.$$

Перемещения $v(\theta, t), w(\theta, t)$, заданная нагрузка, а также потенциал жидкости представлялись в виде рядов Фурье:

$$v(\theta, t) = e^{i\Omega t} \sum_{n=0}^{\infty} v_n \sin n\theta,$$

$$w(\theta, t) = e^{i\Omega t} \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos n\theta,$$

$$P_1(\theta, t) = e^{i\Omega t} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\theta,$$

где $a_n = \frac{\rho_0}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \delta(\theta) d\theta = \frac{\rho_0 \varepsilon}{2\pi}$, $\varepsilon = \begin{cases} 1, n=0, \\ 2, n \geq 1. \end{cases}$

$$\varphi(r, \theta, t) = e^{i\Omega t} \sum_{n=0}^{\infty} R_n(r) \cos n\theta,$$

Тогда давление в жидкости представится следующим рядом [7]:

$$P_2(r, \theta, t) = -\Omega^2 e^{i\Omega t} \sum_{n=0}^{\infty} m_n(\Omega \cdot r) w_n \cos n\theta, \quad (1)$$

$$\text{где } m_n(\Omega \cdot r) = -\frac{H_n^{(2)}(\Omega \cdot r)}{\frac{\partial}{\partial r} (H_n^{(2)}(\Omega \cdot r))_{r=1}} \quad (2)$$

присоединенная масса $(H_n^{(2)}(\Omega \cdot r))$ – функции Ханкеля второго рода, а радиальные

перемещения оболочки w_n определяются из системы:

$$\begin{cases} \left(n^2 - \frac{\Omega^2}{c_1^2} \right) v_n + n \cdot w_n = 0, \\ n \cdot v_n + \left(1 + \kappa^2 n^4 - \frac{\Omega^2}{c_1^2} \left(1 + \frac{m_n(\Omega)}{\rho h} \right) \right) w_n = \frac{P_0 \varepsilon}{2\pi r c_1^2 h}. \end{cases} \quad (3)$$

```

Fl(r, θ, t) :=
  wn ← 0
  for n ∈ 0..40
    εl ← 1 if n = 0
    εl ← 2 otherwise
    B ←  $\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{p_0 \cdot \varepsilon l}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_1^2 \cdot h} \end{pmatrix}$ 
    X ← (AA(n, Ωl))-1 · B
    wn ← wn + X · mas(n, Ωl · r) · cos(n · θ)
  Fl ← -Ωl2 · ei · Ωl · t · wn
    
```

Рис. 1. Вычисление звукового давления в жидкости

На рис. 1 показано вычисление звукового давления в жидкости по формуле (1) через создание пользовательской функции, где предварительно описана матрицы *AA* системы (3) и присоединенная масса $m_n(\Omega)$ по формуле (2).

Расчеты проводились для оболочки с параметрами: $\rho = 8$, $h = 0,01$, $\nu = 0,3$, $c_1 = 3,6667$, $\rho_0 = 1$, $P_0 = 1$, заданными в безразмерном виде, а в рядах Фурье удерживалось 40 членов (рис. 1).

Расчеты в задаче выполнялись с комплекснозначными функциями, поэтому занимали много времени. Более того, функции Ханкеля $H_n^{(2)}(\Omega \cdot r)$ имеют порядок $\approx 10^n$, что приводило к переполнению в промежуточных вычислениях.

Для решения этой проблемы выбирался оптимизированный режим расчетов. Задавать режим Оптимизация можно во всем документе (рис. 2 а).

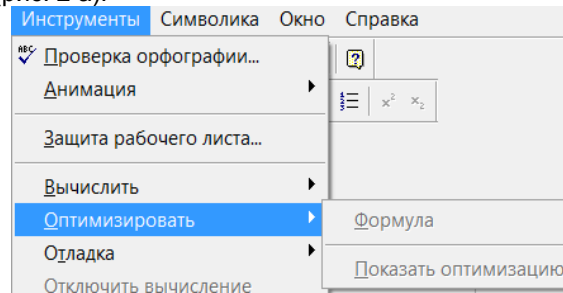


Рис. 2. а. Режим Оптимизация во всем документе

В данной задаче оптимизация расчетов задавалась непосредственно в операторах вычисления звукового давления на оболочке (рис. 2.б).

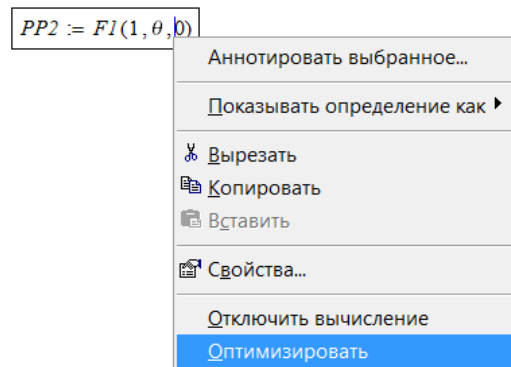


Рис. 2. б. Режим Оптимизация в отдельном операторе

На рис. 3 а и 3 б демонстрируется вычисленное давление на оболочке при частоте возмущающей нагрузке $\Omega = 1$ и временах $t = 0$

и $t = \frac{\pi}{2}$. Операторы, где вычисления проводятся в оптимизированном режиме, отмечаются в рабочем документе звездочкой. Расчеты при таком режиме занимали 2 – 3 минуты.

$$PP1(\theta) := FI(1, \theta, 0)*$$

$$RR1(\theta) := Re(PP1(\theta))*$$

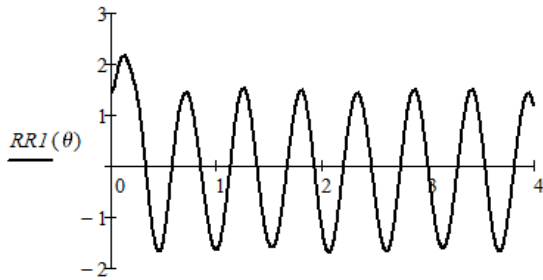


Рис. 3. а. Давление на оболочке при $t = 0$

$$PP2(\theta) := FI\left(1, \theta, \frac{\pi}{2}\right)*$$

$$RR2(\theta) := Re(PP2(\theta))*$$

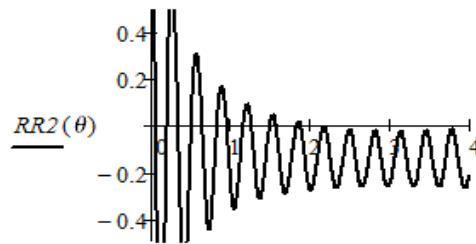


Рис. 3. б. Давление на оболочке при $t = 0$

2. Моделирование случайных процессов

Простота использования пакета Mathcad не должна создавать впечатление о его «примитивности». Пакет имеет достаточный набор встроенных функций, позволяющий решать задачи статистической обработки экспериментальных данных, задачи моделирования случайных процессов и исследования их статистическими методами, которые часто появляются в профессиональных задачах.

В качестве примера рассматривается задача моделирования дискретного Марковского случайного процесса состояний в различные моменты времени некоторого сервера, на который поступают клиентские запросы.

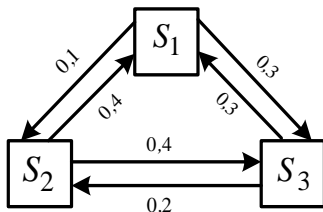


Рис. 4. Граф состояний сервера

Сервер может находиться в трех состояниях: полностью загружен (S_1), простаивает (S_2) и частично загружен (S_3) (рис. 4).

Матрица состояний, соответствующая

данному графу, имеет вид:
$$P = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,1 & 0,3 \\ 0,4 & 0,2 & 0,4 \\ 0,3 & 0,2 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

На листинге (рис. 5) показано моделирование дискретного Марковского процесса разыгрыванием случайной величины, равномерно распределенной на отрезке $[0;1]$ (встроенная функция *runif*), в соответствии с заданной матрицей переходных вероятностей. Вектор $FF(60)$ – последовательность состояний системы:

$$S_1, S_1, S_1, S_1, S_3, S_1, S_3, S_1, S_1, S_1, S_3, \dots$$

Для определения предельных вероятностей можно было бы решать систему уравнений:

$$\begin{cases} p_{11} \cdot p_1 + (p_{22} - 1) \cdot p_2 + p_{32} \cdot p_3 = 0, \\ p_{13} \cdot p_1 + p_{23} \cdot p_2 + (p_{33} - 1) \cdot p_3 = 0, \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases}$$

Мы будем определять предельные вероятности по-другому.

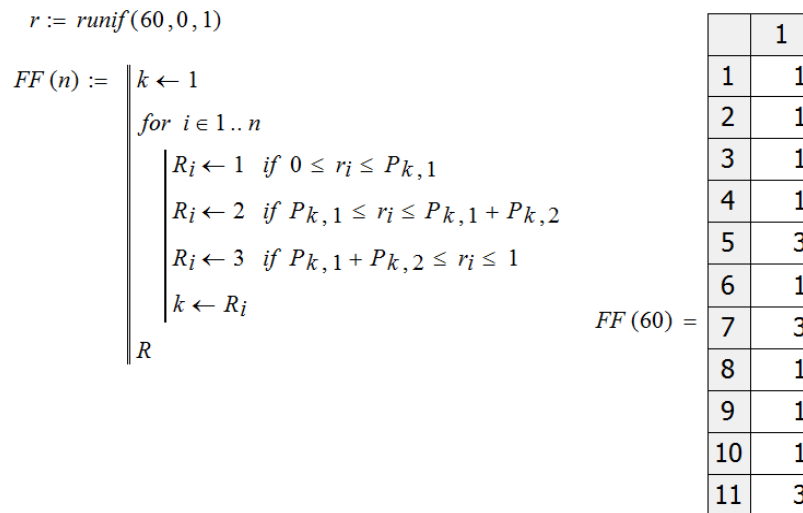


Рис. 5. Последовательность реализаций Марковского случайного процесса

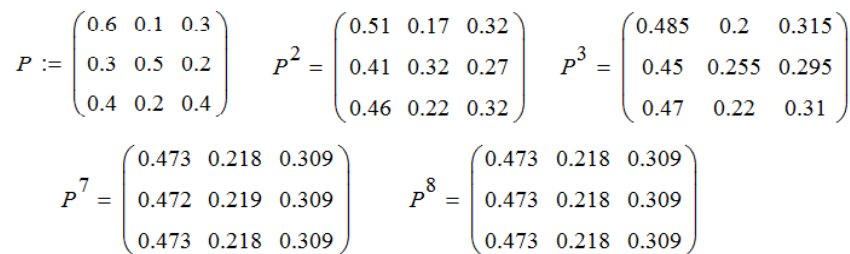


Рис. 6. Вычисление предельных вероятностей случайного процесса

На рис. 6 показано последовательное вычисление степеней матрицы перехода до стабилизации ее элементов. Из рисунка ясно, что предельные вероятности состояний системы:

$$p_1 = 0,473, \quad p_2 = 0,218, \quad p_3 = 0,309,$$

а случайный процесс становится стационарным, начиная с седьмого шага по времени.

Поскольку для разыгрывания случайной величины выбиралась последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0;1]$ – псевдослучайные числа, т.е. при различных воспроизведениях эти последовательности будут повторяться, то проведем исследование построенного случайного процесса, используя выборочный метод математической статистики.

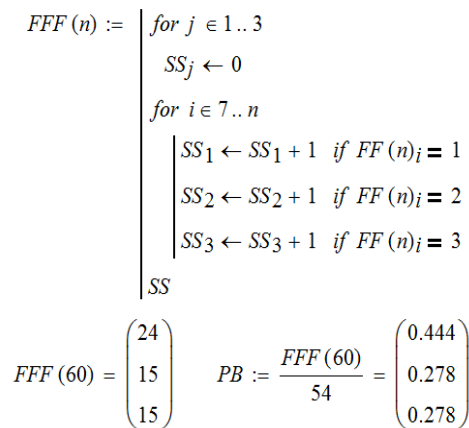


Рис. 7. Вычисление выборочных частот состояний

Проверим, можно ли считать построенный случайный процесс соответствующим заданной матрице переходных вероятностей. Для этого вычислим абсолютные и относительные (вектор PB) выборочные частоты нахождения системы в каждом из трех ее состояний (рис. 7).

Также показано вычисление статистики Пирсона для проверки гипотезы: выборочные частоты состояний системы – вектор PB

совпадают с теоретическими частотами (предельными вероятностями) – вектор P_0 .

$$\chi_{набл} := \sum_{i=1}^3 \frac{(PB_i - P0_i)^2 \cdot 54}{P0_i} = 1.142$$

$$\chi_{кр} := qchisq(0.99, 2) = 9.21$$

Поскольку вычисленная статистика Пирсона $\chi_{набл} = 1,142$ меньше квантиля для критической

области: $\chi_{кр} = 9,21$, то выдвинутую гипотезу с вероятностью 0,99 следует считать истинной.

Заключение

Компьютерная математика становится неотъемлемой частью математического образования современного инженера-кораблестроителя. Практическое применение современных пакетов математических программ существенно повышает эффективность интеллектуального труда. Поэтому актуальным является оптимальный выбор математического пакета для решения конкретной задачи, стоящей перед исследователем. Авторы надеются, что описанные выше достоинства пакета Mathcad и приведенные примеры убедят читателей, что в значительном количестве случаев его использование в инженерных расчетах будет оптимально.

От других продуктов аналогичного назначения, например, Maple & Theorist (компании Waterloo Maple Software) и Mathematica (компании Wolf Research), Mathcad (компании Mathsoft) отличается ориентацией на создание высококачественных документов (докладов, отчетов, статей) в режиме WYSIWYG (What You See Is What You Get). Это означает, что, внося изменения, пользователь немедленно видит их результаты и в любой момент может этот документ распечатать. Работа с пакетом за экраном компьютера практически совпадает с работой на бумаге с одной лишь разницей – она более эффективна.

В то же время Mathcad – универсальный математический пакет, обладающий широкими возможностями для выполнения инженерных и научных расчетов со всеми необходимыми инструментариями: символьной математикой аналитических преобразований, численным процессором, большим набором встроенных функций и инструментами оптимизации численного процесса. Графические инструменты пакета расширяются от версии к версии, а элементы программирования имеют ясную блоковую структуру.

Авторы выражают признательность руководству Санкт-Петербургского государственного морского технического университета за поддержку кафедры математики в работе по использованию в учебном процессе современных пакетов математических программ, а также благодарят всех преподавателей кафедры, активно включившихся в эту работу.

Литература

1. Васильева Н.В., Володичева М.И., Леора С.Н. Использование пакетов прикладных математических программ в преподавании математических дисциплин. Ученые записки ИСГЗ. 2014. 1(12), 150 – 155.
2. Васильева Н.В., Григорьев-Голубев В.В., и др. Математика в среде Mathcad. СПб., Изд-во СПбГМТУ, 2017. 170 с.
3. Васильева Н.В., Григорьев-Голубев В.В., и др. Математика в пакетах прикладных математических программ. СПб., Изд-во СПбГМТУ, 2017. 230 с.
4. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. М., ИТ Пресс, 2006. 496 с.
5. Васильева Н.В., Кунтурова Н.Б., Саенко С.И. Приближенные вычисления в математическом анализе в среде Mathcad. СПб., Изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. 90 с.
6. Володичева, М.И., Григорьев-Голубев, В.В. Дискретная математика с пакетами Mathematica и Mathcad. СПб., Изд-во СПбГМТУ, 2015. 349 с.
7. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее применение в технике. Избранные труды. Т1. Изд. АН СССР, 1962. 262 с.
8. Васильева Н.В., Перцев А.К. Звуковое поле в воде при вынужденных гармонических колебаниях упругих оболочек. Динамические процессы в конструкциях, механизмах и акустических средах. Сб. науч.тр. ЛКИ. Л., 1987.
- 9.

References

1. Vasileva N.V., Volodicheva M.I., Leora S.N. Ispol'zovanie paketov prikladnykh matematicheskikh programm v prepodavanii matematicheskikh disziplin. Uchonye zapiski ISGZ. 2014. 1(12), 150 – 155.
2. Vasileva N.V., Grigorjev-Golubev V.V., et al. Mathematica v srede Mathcad. S.Petersburg, SPbGMTU Publ, 2017. 170 p.
3. Vasileva N.V., Grigorjev-Golubev V.V., et al. Mathematica v paketakh prikladnykh matematicheskikh programm. S.Petersburg, SPbGMTU Publ, 2017. 230 p.
4. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. Reshenie zadach vychislitelnoi matematiki v paketakh Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. Moscow, NT Press, 2006. 496 p.
5. Vasileva N.V., Kunturova N.B., Saenko S.I. Priblizhonnnye vychislenija v matematicheskom analise v srede Mathcad. S.Petersburg, VKA after A.F. Mozhajskogo Publ., 2017. 90 p.
6. Volodicheva M.I., Grigorjev-Golubev V.V. Diskretnaja matematika s paketami Mathematica i Mathcad. S.Petersburg, SPbGMTU Publ, 2015. 349 p.
7. Vlasov V.Z. Obschchaya teoriya obolochek i ee primenenie v tekhnike. Izbrannye trudy. T1. Publ. AN SSSR, 1962. 262 p.
8. Vasileva N.V., Pertsev A.K. Zvukovoe pole v vode pri vynuzhdennykh garmonicheskikh kolebaniyakh uprugikh obolochek. Dinamicheskie protsessy v konstruktsiyakh, mekhanismakh i akusticheskikh sredakh. Zb. nauch. Trudy LKI. L., 1987. 44 – 50 pp.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 532.5.01; УДК 629.7.036.5

**О НОВОМ ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ ФИЗИЧЕСКОГО СМЫСЛА
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТЕНЗОРНЫХ ВЕЛИЧИН
В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ****Подольский Марлен Елизарович**

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных механизмов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: pmet33@mail.ru

Черенкова Светлана Валентиновна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: svchpar@list.ru

Иванова Марина Александровна

кандидат технических наук,
доцент кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: wosea@mail.ru

Аннотация

Тензорное исчисление, широко используемое в различных областях механики и физики, практически остается невостребованным специалистами с обычной для технических университетов математической подготовкой. Объясняется это разными причинами, но прежде всего, по-видимому, тем, что такие величины, как, например, механическое напряжение, имеют более сложную, по сравнению со скалярами и векторами, физическую и математическую природу. Для их описания и используются тензоры. Но в том виде, в котором тензоры рассматриваются не только в математической, но большей частью и в технической литературе, тензор, несмотря на все попытки придать ему физический смысл, воспринимается как математическая абстракция, лишенная непосредственного геометрического и физического содержания. Например, согласно одному из определений, тензор – это формальная сумма формальных произведений. Характерно с этой точки зрения мнение известного специалиста в области механики В.И. Феодосьева: «Тензору, в отличие от вектора не может быть дано простого геометрического толкования».

В настоящей работе, на основе физических представлений и анализа ранее выполненных классических работ по тензорам и их приложений к механике, была предложена новая интерпретация основных понятий тензорного исчисления. Она обеспечила геометрическую и физическую прозрачность этих понятий и даже позволила, в буквальном смысле этого слова, увидеть тензор, причем всего лишь на рисунке в школьном учебнике физики.

Кроме того, получил дальнейшее развитие и использовавшийся в предыдущих работах авторов максимально приближенный к традиционным математическим методам решения инженерных задач аппарат прямого тензорного исчисления, который оказался адекватным геометрическому и физическому смыслу тензора.

Даны примеры его использования для решения различных задач механики твердого тела и сплошных сред.

Ключевые слова: физика и геометрия тензора, производные по вектору, механика твердого тела, механика сплошных сред

**A NEW APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE PHYSICAL SENSE
AND OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF TENSOR QUANTITIES
IN APPLIED PROBLEMS OF MECHANICS**

Marlen E. Podolsky
Professor, Dr.Sci.Tech.,

Head of machine elements department
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: pmet33@mail.ru

Svetlana V. Cherenkova
Senior lecturer, Cand.Sci.Tech.,
Senior lecturer of machine elements department
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: svchpar@list.ru

Marina A. Ivanova
Cand.Sci.Tech.,
Senior lecturer of machine elements department
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: wosea@mail.ru

Abstract

Tensor calculus, which widely used in various fields of mechanics and physics, is almost unclaimed by specialists with the usual mathematical education. It is explained by many reasons. The main of them is the physical nature of tensor quantities, which cannot be described by scalars and vectors only, and in the most part of publications the tensor is perceived as a mathematical abstraction which has no direct physical and geometrical substance. For example, according to one of definitions the tensor is a formal sum of formal products. From this point of view it is very characteristic the opinion of well-known specialist in mechanics corresponding member of the Academy of Sciences of the USSR V.I. Feodosiev: «Unlike to vectors it is impossible to geometrically simply interpret the notion of tensor».

In the present work on the base of the theory of mechanical stresses, the new simple and transparent interpretation of main tensor notions was proposed.

Besides the direct tensor calculus apparatus, which is the nearest to the traditional mathematical methods of solving of engineer problems, was further developed. This method appears to be adequate to geometrical and physical sense of tensor.

The examples of solving of rigid body and continuum mechanics problems were done.

Key words: physics and geometry of the tensor, derivative with respect to vector, rigid body mechanics, continuum mechanics

Введение

Тензорное исчисление, широко используемое в различных областях механики и физики, практически остается невостребованным специалистами с обычной для технических университетов математической подготовкой. Объясняется это разными причинами, но прежде всего по-видимому тем, что, в отличие от скаляров и векторов, тензор воспринимается как некоторая, не имеющая визуального воплощения и лишенная физического содержания, математическая абстракция. Например, в [1] тензор определяется как формальная сумма формальных произведений (см. также [2]), в [3] под тензорами понимаются элементы формально определяемого пространства T , а согласно [4, 5] тензор – это оператор, преобразующий векторы в векторы. К тому же и сам аппарат классического тензорного исчисления плохо вписывается в традиционную систему обозначений и математических методов решения инженерных задач.

О том, что проблема «демократизации» тензорного исчисления действительно существует, говорит и приводимая ниже цитата

из опубликованной в издательстве «Высшая школа» книги [6]: «...несмотря на имеющуюся учебную литературу по тензорам, потребность в изложении этих вопросов достаточно актуальна. Для иллюстрации сказанного приведем лишь один пример. Как это ни покажется странным, на вопросы: «Можно ли представить себе тензор второго ранга столь же наглядно, как вектор в трехмерном пространстве?» и «Что такое диада?» – ответ скорее всего затруднится дать многие искушенные читатели, знакомые с тензорами.».

С особой четкостью сложившаяся на сегодня точка зрения относительно возможности восприятия понятия тензора на интуитивном уровне сформулировано В.И. Феодосьевым [7].

В настоящей статье на основе физических представлений и работ [8 - 17] дается новая трактовка основных понятий тензорного исчисления существенно облегчающая их восприятие на интуитивном уровне и максимально сближающая математический аппарат с традиционными методами решения инженерных задач.

1. Физика (механика) и геометрия тензора

Наиболее характерным примером физической величины, имеющей тензорную природу, является механическое напряжение. Как известно, напряжение \bar{p}_n в некоторой точке А тела (рис. 1) на площадке, перпендикулярной орту \bar{n} , определяется формулой

$$\bar{p}_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{P}}{\Delta S}, \quad (1)$$

которая означает, что, во-первых, напряжение – это вектор и что, во-вторых, в каждой точке тела, в зависимости от ориентации площадки, проходящей через эту точку, можно определить бесчисленное множество векторов напряжений.

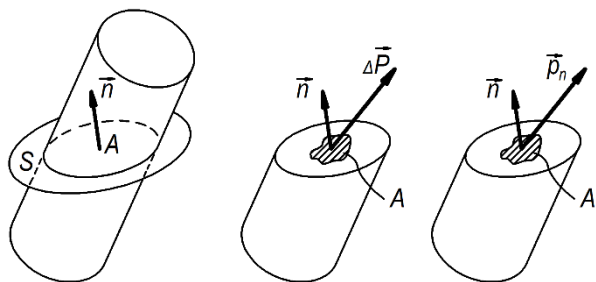


Рис. 1

Взятые вместе, все эти векторы характеризуют напряженное состояние тела в рассматриваемой точке и образуют инвариантный, т.е. не зависящий от выбора системы координат, объект, который и называется тензором (в рассматриваемом случае это тензор напряжений), см. также [11 - 13].

Задача теперь сводится к тому, чтобы найти такой способ математического описания, который позволил бы векторы, из которых состоит тензор, отличать друг от друга, причем не по модулю или направлению, а в зависимости от того, как расположена элементарная площадка, в точке которой определяется напряжение. Таким образом, площадка и отвечающий за ее ориентацию в пространстве орт нормали к ней – это своего рода адрес, посредством которого задается место вектора напряжения в тензоре.

2. Система обозначений. Диады^{*)}

Величины, которыми определяется напряжение, обозначаются буквой p , орт нормали – вектором \bar{n} . Вектор напряжения на площадке с нормалью к ней \bar{n} обозначается \bar{p}_n . Он определяется формулой

$$\bar{p}_n = p_n \bar{n}^0. \quad (2)$$

^{*)} Здесь и далее используются обозначения и терминология, принятые в [14].

Здесь \bar{p}_n^0 – орт вектора \bar{p}_n , p_n – его численное (точнее алгебраическое) значение;

$$\bar{p}_n = \bar{n} \otimes \bar{p}_n - \quad (3)$$

величина (используется также термин «объект» [18]), определяющая напряжение в совокупности с его «адресом» (вектор \bar{n}). Эта совокупность упорядоченная (\bar{n} – на первом месте, \bar{p}_n – на втором).

Упорядоченная совокупность двух векторов называется диадой. Над буквой, обозначающей диаду, ставится знак «~» (тильда).

3. Тензорные произведения

Запись (2) можно рассматривать как формулу для определения \bar{p}_n по известным \bar{n} и \bar{p}_n , а знак \otimes – как обозначение операции, в результате выполнения которой происходит объединение \bar{n} и \bar{p}_n . С формально математической точки зрения эта операция имеет смысл операции умножения, что сразу следует из того, что представив вектор \bar{p}_n в виде суммы, например, нормального $\bar{\sigma}_n$ и касательного $\bar{\tau}_n$ напряжений и замечая, что выражения

$$\bar{n} \otimes \bar{p}_n = \bar{n} \otimes (\bar{\sigma}_n + \bar{\tau}_n) \quad (4)$$

и $\bar{n} \otimes \bar{\sigma}_n + \bar{n} \otimes \bar{\tau}_n$ обозначают одно и то же напряжение, получим

$$\bar{n} \otimes (\bar{\sigma}_n + \bar{\tau}_n) = \bar{n} \otimes \bar{\sigma}_n + \bar{n} \otimes \bar{\tau}_n. \quad (5)$$

Таким образом, операция объединения векторов в упорядоченную совокупность может рассматриваться как операция умножения. Такое умножение называется тензорным, а упорядоченная совокупность векторов – их тензорным произведением.

4. Скалярное умножение вектора на диаду

Для того чтобы, зная диаду (см. (3)), найти напряжение \bar{p}_n нужно орт \bar{n} в формуле (3) превратить в единицу. Формально математически это можно сделать, умножив вектор \bar{n} (это орт) скалярно на самого себя. Тогда, так как $\bar{n} \cdot \bar{n} = 1$, получим

$$\bar{n} \cdot (\bar{n} \otimes \bar{p}_n) = (\bar{n} \cdot \bar{n}) \bar{p}_n = \bar{p}_n, \quad (6)$$

а саму формулу (6) можно рассматривать как частный случай общей формулы

$$\bar{a} \cdot (\bar{b} \otimes \bar{c}) = (\bar{a} \cdot \bar{b}) \bar{c}. \quad (7)$$

5. Математическое описание тензора

Из условия равновесия элементарного тетраэдра (см., например, [10]) следует, что вектор

напряжения на наклонной грани определяется формулой

$$\underline{\underline{p}}_n = n_1 \underline{\underline{p}}_1 + n_2 \underline{\underline{p}}_2 + n_3 \underline{\underline{p}}_3 = \sum n_i \underline{\underline{p}}_i. \quad (8)$$

Здесь $\underline{\underline{p}}_n, \underline{\underline{p}}_1, \underline{\underline{p}}_2, \underline{\underline{p}}_3$ – векторы напряжений на площадках, для которых орт $\underline{\underline{n}}$ и орты прямоугольной декартовой системы координат $\underline{\underline{e}}_1, \underline{\underline{e}}_2$ и $\underline{\underline{e}}_3$ являются внешними нормальями; n_1, n_2 и n_3 – направляющие косинусы вектора $\underline{\underline{n}}$, так что

$$n_1 = \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{e}}_1, \quad n_2 = \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{e}}_2, \quad n_3 = \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{e}}_3. \quad (9)$$

Так как, например, (см. (9₁) и (7))

$$n_1 \underline{\underline{p}}_1 = (\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{e}}_1) \underline{\underline{p}}_1 = \underline{\underline{n}}_1 \cdot (\underline{\underline{e}}_1 \otimes \underline{\underline{p}}_1), \quad (10)$$

то (см. (8))

$$\underline{\underline{p}}_n = \underline{\underline{n}} \cdot (\underline{\underline{e}}_1 \otimes \underline{\underline{p}}_1) + \underline{\underline{n}} \cdot (\underline{\underline{e}}_2 \otimes \underline{\underline{p}}_2) + \underline{\underline{n}} \cdot (\underline{\underline{e}}_3 \otimes \underline{\underline{p}}_3), \quad (11)$$

что можно еще записать так

$$\underline{\underline{p}}_n = \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}, \quad (12)$$

где

$$\underline{\underline{p}} = \underline{\underline{e}}_1 \otimes \underline{\underline{p}}_1 + \underline{\underline{e}}_2 \otimes \underline{\underline{p}}_2 + \underline{\underline{e}}_3 \otimes \underline{\underline{p}}_3 = \sum \underline{\underline{e}}_i \otimes \underline{\underline{p}}_i - \quad (13)$$

тензор (в рассматриваемом случае тензор напряжений).

Из (13) следует, что тензор – это сумма*) диад, и именно по этой причине для обозначения тензора используется двойное подчеркивание.

Формулой (13) определяется разложение тензора по ортам $\underline{\underline{e}}_1, \underline{\underline{e}}_2$ и $\underline{\underline{e}}_3$ и в этом смысле она подобна формуле для разложения по тем же ортам вектора (например, $\underline{\underline{\alpha}} = \underline{\underline{e}}_1 \alpha_1 + \underline{\underline{e}}_2 \alpha_2 + \underline{\underline{e}}_3 \alpha_3$).

Определение вектора по его «адресу» в тензоре дает формула (12).

6. Соглашение о суммировании

Согласно предложенному Эйнштейном соглашению о суммировании знак суммы в правой части формулы (13) отбрасывается, а сама формула записывается в виде

$$\underline{\underline{p}} = \underline{\underline{e}}_i \otimes \underline{\underline{p}}_i. \quad (14)$$

О суммировании в этом случае говорит дважды повторяющийся буквенный индекс «i».

Точно так же

$$\underline{\underline{p}}_i = p_{i1} \underline{\underline{e}}_1 + p_{i2} \underline{\underline{e}}_2 + p_{i3} \underline{\underline{e}}_3 = p_{ij} \underline{\underline{e}}_j \quad (15)$$

и

$$\underline{\underline{p}} = \underline{\underline{e}}_i \otimes \underline{\underline{p}}_i = \underline{\underline{e}}_i \otimes (p_{ij} \underline{\underline{e}}_j) = p_{ij} \underline{\underline{e}}_i \otimes \underline{\underline{e}}_j. \quad (16)$$

Величины p_{ij} называются компонентами (или координатами) тензора $\underline{\underline{p}}$. Повторяющийся буквенный индекс может быть любым. Поэтому, например, $\alpha_i \cdot \beta_j$ это то же самое, что и $\alpha_k \cdot \beta_k$.

7. Оператор приравнивания индексов

Под оператором приравнивания индексов понимается символ Кронекера

$$\delta_{ij} = \underline{\underline{e}}_i \cdot \underline{\underline{e}}_j, \quad (17)$$

где $\underline{\underline{e}}_i$ и $\underline{\underline{e}}_j$ – орты прямоугольной декартовой системы координат, так что $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$. Примерами его использования, в сочетании с соглашением о суммировании, является определение скалярного произведения векторов:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{a}} \cdot \underline{\underline{b}} &= (a_i \underline{\underline{e}}_i) \cdot (b_j \underline{\underline{e}}_j) = a_i b_j \delta_{ij} = a_i b_i \text{ (или } a_i b_i) \equiv \\ &\equiv a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \end{aligned}$$

8. Тензор как элемент линейного пространства

Рассмотренные выше физические трактовки и их геометрические интерпретации основывались на интуитивных подходах, что и позволило перевести тензоры в разряд таких же вполне осязаемых и легко воспринимаемых величин, как скаляры и векторы. Вместе с тем, во избежание возможных ошибок необходим и строгий математический анализ вопроса.

Для общего случая тензоров второго ранга (тензором второго ранга является и тензор напряжений (13)) такой анализ был выполнен в [19-21]. В результате были выяснены условия, при выполнении которых сумма диад является элементом линейного пространства. В число этих условий входят и правила определения тензорных произведений, составленных из вектора и суммы векторов. Эти правила (аксиомы) полностью аналогичны имеющей прозрачный физический смысл формуле (5). Если они не выполнены, то не удовлетворяющие им совокупности векторов не могут быть тензорами. Иначе говоря, не всякая совокупность бесконечного числа векторов является тензором. Отсюда следует, что тензор второго ранга – это всегда совокупность векторов, но совокупность векторов не всегда тензор.

9. Примеры приложений к механике твердого тела (см. также [14])

Вектор напряжения на косоугольной площадке

Для схемы на рис. 2 (здесь вектор напряжения показан на площадке, для которой орт $\underline{\underline{e}}_1$

*) Другое название – неупорядоченная (слагаемые в (13) можно менять местами) совокупность.

является внешней нормалью) тензор напряжений может быть задан в виде

$$\underline{\underline{\rho}} = \sigma \bar{e}_1 \otimes \bar{e}_1. \quad (18)$$

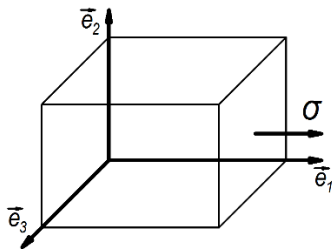


Рис. 2

Отсюда для вектора напряжения на площадке, перпендикулярной некоторому орту \bar{n} , получим

$$\bar{p}_n = \bar{n} \cdot (\sigma \bar{e}_1 \otimes \bar{e}_1) = n_1 \sigma \bar{e}_1 \quad (19)$$

так что в условиях рассматриваемого примера на любой, как бы она ни была расположена в пространстве, площадке линия действия вектора напряжения одна и та же.

Трактовка формулы $\bar{p}_n = \bar{n} \cdot \underline{\underline{\rho}}$ (формула (12))

Геометрический смысл этой формулы состоит в том, что она определяет преобразование вектора \bar{n} в вектор \bar{p}_n и тем самым оправдывает определение тензора как оператора, посредством которого вектор преобразуется в вектор:

$$\underline{\underline{\rho}}: \bar{n} \rightarrow \bar{p}_n. \quad (20)$$

Кинетический момент твердого тела

Кинетический момент твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной точки, определяется формулой (см. [14])

$$\bar{K} = \bar{\omega} \cdot \underline{\underline{J}}, \quad (21)$$

где $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости, $\underline{\underline{J}}$ – тензор инерции, определяемый в точке, вокруг которой вращается тело.

Момент сил инерции тела, вращающегося вокруг неподвижной точки

$$\bar{M}_и = -\bar{\varepsilon} \cdot \underline{\underline{J}} + \bar{\omega} \cdot \underline{\underline{J}} \times \bar{\omega} \quad (22)$$

Здесь $\bar{\varepsilon} = \dot{\bar{\omega}}$ – угловое ускорение тела, \times – обозначение операции векторного умножения.

Динамическая неуравновешенность ротора

В условиях схемы на рис. 3 момент сил инерции определяется формулой (вытекает из (22) при $\bar{\varepsilon} = \bar{0}$)

$$\bar{M}_и = \omega^2 \bar{e}_1 \cdot \underline{\underline{J}} \times \bar{e}_1. \quad (23)$$

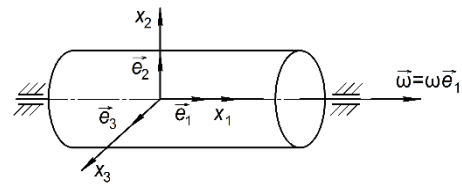


Рис. 3

По аналогии с (14)

$$\underline{\underline{J}} = J_{ij} \bar{e}_i \otimes \bar{e}_j. \quad (24)$$

Поэтому, с учетом (17),

$$\begin{aligned} \bar{e}_1 \cdot \underline{\underline{J}} &= J_{ij} (\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_i) \bar{e}_j = J_{ij} \delta_{1i} \bar{e}_j = \\ &= J_{1j} \bar{e}_j = J_{11} \bar{e}_1 + J_{12} \bar{e}_2 + J_{13} \bar{e}_3, \end{aligned} \quad (25)$$

и для $\bar{M}_и$ имеем

$$\bar{M}_и = \omega^2 (J_{11} \bar{e}_1 + J_{12} \bar{e}_2 + J_{13} \bar{e}_3) \times \bar{e}_1. \quad (26)$$

А так как

$$\bar{e}_1 \times \bar{e}_1 = \bar{0}, \quad \bar{e}_2 \times \bar{e}_1 = -\bar{e}_3, \quad \bar{e}_3 \times \bar{e}_1 = \bar{e}_2, \quad (27)$$

то для $\bar{M}_и$ получим

$$\bar{M}_и = \omega^2 (\hat{J}_{12} \bar{e}_3 - \hat{J}_{13} \bar{e}_2), \quad (28)$$

где $\hat{J}_{12} = -J_{12}$ и $\hat{J}_{13} = -J_{13}$ – центробежные моменты инерции ротора (J_{12} и J_{13} – это компоненты тензора инерции ротора $\underline{\underline{J}}$).

Закон Паскаля. Единичный тензор

В жидкостях без трения

$$\begin{aligned} \bar{p}_1 &= -p_1 \bar{e}_1, & \bar{p}_2 &= -p_2 \bar{e}_2, \\ \bar{p}_3 &= -p_3 \bar{e}_3, & \bar{p}_n &= -p_n \bar{e}_n. \end{aligned} \quad (29)$$

Поэтому (см. (13))

$$\underline{\underline{\rho}} = -(p_1 \bar{e}_1 \otimes \bar{e}_1 + p_2 \bar{e}_2 \otimes \bar{e}_2 + p_3 \bar{e}_3 \otimes \bar{e}_3) \quad (30)$$

и (см. (29₄) и (12))

$$-p_n \bar{n} = -\bar{n} \cdot (p_1 \bar{e}_1 \otimes \bar{e}_1 + p_2 \bar{e}_2 \otimes \bar{e}_2 + p_3 \bar{e}_3 \otimes \bar{e}_3). \quad (31)$$

Из (31), с учетом (7) и (9), получим

$$p_n \bar{n} = n_1 p_1 \bar{e}_1 + n_2 p_2 \bar{e}_2 + n_3 p_3 \bar{e}_3, \quad (32)$$

откуда, после скалярного умножения на \bar{e}_1, \bar{e}_2 и \bar{e}_3 , приходим к закону Паскаля: p_n и все p_i равны одному и тому же значению. Обозначая его через p , для тензора напряжений, в силу (30), получим

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\rho}} &= -p \underline{\underline{E}}, \\ \underline{\underline{E}} &= \bar{e}_1 \otimes \bar{e}_1 + \bar{e}_2 \otimes \bar{e}_2 + \bar{e}_3 \otimes \bar{e}_3 \equiv \bar{e}_i \otimes \bar{e}_j. \end{aligned} \quad (33)$$

Тензор $\underline{\underline{E}}$ называется единичным. Легко проверяется, что

$$\underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{a}} = \underline{\underline{a}} \cdot \underline{\underline{E}} = \underline{\underline{a}}, \quad (34)$$

где $\underline{\underline{a}}$ – любой вектор.

Каждый из векторов, из которых состоит тензор, определяется формулой $\underline{\underline{p}}_n = \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}$ (формула 12), а так как, в силу (34), $\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{E}} = \underline{\underline{n}}$, то из (33₁) следует, что

$$\underline{\underline{p}}_n = \underline{\underline{n}} \cdot (-\underline{\underline{pE}}) = -\underline{\underline{pn}}, \quad (35)$$

и, таким образом, все векторы, совокупность которых образует тензор (33₁), – это векторы, которые направлены вдоль радиусов одного и того же шара, радиус которого (в единицах давления) равен p . Такой шар, получивший, как известно, название шара Паскаля (рис. 4 – заимствован из [22]), может, таким образом, рассматриваться как пример тензора. По указанным причинам единичный тензор $\underline{\underline{E}}$ называется также шаровым тензором.



Рис. 4

Конечный поворот

При повороте тела на угол φ вокруг оси с ортом $\underline{\underline{\varphi}}^0$ жестко связанный с телом радиус-вектор $\underline{\underline{r}}_0$ (рис. 5) переходит в новое положение, определяемое вектором $\underline{\underline{r}}$, который может быть найден по формуле [14]

$$\underline{\underline{r}} = \underline{\underline{r}}_0 \cdot \underline{\underline{\varphi}}. \quad (36)$$

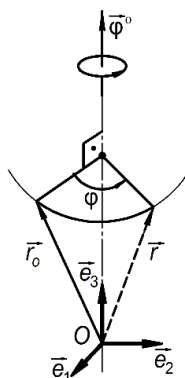


Рис. 5

Фигурирующий в (36) тензор $\underline{\underline{\varphi}}$ находится по формуле

$$\underline{\underline{\varphi}} = \underline{\underline{E}} \cos \varphi + (1 - \cos \varphi) \underline{\underline{\varphi}}^0 \otimes \underline{\underline{\varphi}}^0 - \underline{\underline{E}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0 \sin \varphi. \quad (37)$$

Из (36) и (37) с учетом (7) и (34) имеем

$$\underline{\underline{r}} = \underline{\underline{r}}_0 \cos \varphi - (1 - \cos \varphi) (\underline{\underline{r}}_0 \cdot \underline{\underline{\varphi}}^0) \underline{\underline{\varphi}}^0 - \underline{\underline{r}}_0 \times \underline{\underline{\varphi}}^0 \sin \varphi. \quad (38)$$

Если, например, $\varphi = \pi/2$, $\underline{\underline{\varphi}}^0 = \underline{\underline{e}}_3$, $\underline{\underline{r}}_0 = \underline{\underline{e}}_1$, то

$$\underline{\underline{r}} = -\underline{\underline{e}}_1 \times \underline{\underline{e}}_3 = \underline{\underline{e}}_3 \times \underline{\underline{e}}_1 = \underline{\underline{e}}_2. \quad (39)$$

Вращение твердого тела

В условиях схемы на рис. 5 скорость точки тела, вращающегося вокруг оси с ортом $\underline{\underline{\varphi}}^0$, определяется формулой

$$\underline{\underline{v}} = \frac{d\underline{\underline{r}}}{dt} = \underline{\underline{r}}_0 \cdot \underline{\underline{\dot{\varphi}}}. \quad (40)$$

Если ось, вокруг которой происходит вращение, неподвижна, то

$$\underline{\underline{\dot{\varphi}}^0} = \underline{\underline{0}} \quad (41)$$

и

$$\underline{\underline{\dot{\varphi}}} = \underline{\underline{\dot{\varphi}}}^0 (-\underline{\underline{E}} \sin \varphi + \sin \varphi \underline{\underline{\varphi}}^0 \otimes \underline{\underline{\varphi}}^0 - \underline{\underline{E}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0 \cos \varphi). \quad (42)$$

Определяя скорость для того момента времени, когда

$$\underline{\underline{r}} = \underline{\underline{r}}_0, \quad (43)$$

и, как это следует из (36), (34) и (37),

$$\varphi = 0, \quad (44)$$

для $\underline{\underline{v}}$ получим

$$\underline{\underline{v}} = \underline{\underline{r}} \cdot \underline{\underline{\dot{\varphi}}} (-\underline{\underline{E}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0). \quad (45)$$

По аналогии с (7) и с учетом (34), имеет место формула

$$\underline{\underline{r}} \cdot (\underline{\underline{E}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0) = (\underline{\underline{r}} \cdot \underline{\underline{E}}) \times \underline{\underline{\varphi}}^0 = \underline{\underline{r}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0, \quad (46)$$

которая, в силу антикоммутативности векторного произведения в сочетании с (45) приводит к известной формуле

$$\underline{\underline{v}} = \underline{\underline{\omega}} \times \underline{\underline{r}}, \quad (47)$$

в которой

$$\underline{\underline{\omega}} = \underline{\underline{\dot{\varphi}}} \underline{\underline{\varphi}}^0 - \quad (48)$$

вектор угловой скорости тела.

Формула (48) получена в предположении, что вращение тела происходит вокруг неподвижной оси. Если же в процессе движения неподвижной остается только одна точка, условием (41) пользоваться, конечно, нельзя. В этом случае в формуле для $\underline{\underline{\dot{\varphi}}}$ (см. (42)) появляется дополнительное слагаемое

$$(1 - \cos \varphi) (\underline{\underline{\varphi}}^0 \otimes \underline{\underline{\varphi}}^0 + \underline{\underline{\varphi}}^0 \otimes \underline{\underline{\varphi}}^0) - \underline{\underline{E}} \times \underline{\underline{\varphi}}^0 \sin \varphi,$$

которое, однако, при $\varphi = 0$ обращается в нуль.

Поэтому формулы (47) и (48) справедливы при движении как вокруг неподвижной оси, так и вокруг неподвижной точки, но, применительно к тому случаю, когда $\dot{\vec{\varphi}}^0 \neq \vec{0}$, $\vec{\varphi}^0$ – это орт мгновенной оси вращения (см также [23, 24].

10. Элементы тензорного анализа с приложениями к механике сплошных сред

Производные по вектору

Используя соглашение о суммировании, обозначим через

$$\vec{r} = x_j \vec{e}_j \tag{49}$$

радиус-вектор точки с координатами x_1, x_2, x_3 и рассмотрим скалярную функцию точки $f(r) \equiv f(x_1, x_2, x_3)$. Дифференциал df определяется формулой

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i \tag{50}$$

Преобразуя (50) с помощью оператора приравнивания индексов (17) и оператора Гамильтона

$$\vec{\nabla} = \vec{e}_i \nabla_i, \quad \nabla_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \tag{51}$$

и принимая во внимание, что согласно (49)

$$d\vec{r} = \vec{e}_j dx_j, \tag{52}$$

получим

$$\begin{aligned} df &= \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_{ij} dx_j = \frac{\partial f}{\partial x_i} \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j dx_j = \\ &= (\vec{e}_j dx_j) \cdot \left(\vec{e}_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = d\vec{r} \cdot (\vec{e}_i \nabla_i f) = d\vec{r} \cdot \vec{\nabla} f. \end{aligned} \tag{53}$$

По аналогии с формулой для дифференциала функции $y(x)$

$$dy = y' dx = dx \frac{dy}{dx}, \tag{54}$$

формулу (53) для df можно записать в виде

$$df = d\vec{r} \cdot \frac{df}{d\vec{r}}, \tag{55}$$

где

$$\frac{df}{d\vec{r}} = \vec{\nabla}, \tag{56}$$

а $\frac{df}{d\vec{r}}$ – это производная от f по \vec{r} .

Если дифференцируется векторная функция, то оператор дифференцирования по-прежнему определяется формулой (56). Формально так же

записывается и формула для дифференциала $d\vec{f}$:

$$d\vec{f} = d\vec{r} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}}. \tag{57}$$

Но если в (55) $\frac{df}{d\vec{r}}$ – это вектор, то в (57)

$$\frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\nabla} \otimes \vec{f} - \tag{58}$$

тензор. То, что в (55) дифференциал $d\vec{r}$ записывается слева от $\frac{df}{d\vec{r}}$, значения не имеет, но в формуле (57) такой порядок записи существен [14].

Конвективное ускорение

Рассматривается поле скоростей $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$. Согласно (57)

$$d\vec{u} = d\vec{r} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}. \tag{59}$$

Выбирая в качестве $d\vec{r}$ вектор $d\vec{s} = \vec{u} dt$, которым определяется перемещение частицы, движущейся со скоростью \vec{u} (рис. 6), получим

$$d\vec{u} = d\vec{s} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = \vec{u} dt \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}, \tag{60}$$

так что для ускорения $\vec{a} = d\vec{u}/dt$ будем иметь

$$\vec{a} = \vec{u} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}. \tag{61}$$

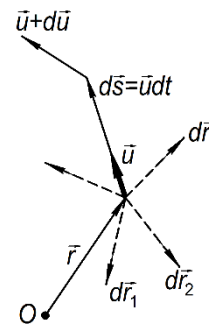


Рис. 6

С учетом (58) и (7) эта формула может быть переписана в виде

$$\vec{a} = \vec{u} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{u}) = (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}. \tag{62}$$

Уравнение Бернулли для вращающейся струйки жидкости

В общепринятых обозначениях уравнение установившегося движения жидкости

(используется принцип Даламбера, силы трения и силы тяжести отбрасываются) записывается в виде [25]

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = -\bar{a}_c - \bar{a}_e - \frac{1}{\rho} \text{grad} p. \quad (63)$$

или, так как, в силу (51), $\text{grad} p$ – это то же самое, что и $\bar{\nabla} p$, в виде

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = -\bar{a}_c - \bar{a}_e - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{d\bar{r}}. \quad (64)$$

Ускорения \bar{a}_c и \bar{a}_e определяются формулами

$$\bar{a}_c = 2\bar{\omega} \times \bar{w}, \quad \bar{a}_e = \bar{\omega} \times \bar{u}, \quad (65)$$

где $\bar{u} = \bar{\omega} \times \bar{r}$.

Следуя [25, с. 110] умножим обе части уравнения (63) скалярно на вектор $d\bar{s} = \bar{w} dt$. Тогда, принимая во внимание, что $\bar{w} \cdot (\bar{\omega} \times \bar{w}) = 0$, и полагая $\rho = \text{const}$, получим

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) = -d\bar{s} \cdot \bar{a}_e - d\bar{s} \cdot \frac{d}{d\bar{r}}\left(\frac{p}{\rho}\right). \quad (66)$$

Воспользуемся формулами для производных по вектору от векторных и скалярных произведений векторов ([14]):

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\bar{r}}(\bar{a} \times \bar{b}) &= \frac{d\bar{a}}{d\bar{r}} \times \bar{b} - \frac{d\bar{b}}{d\bar{r}} \times \bar{a}, \\ \frac{d}{d\bar{r}}(\bar{a} \cdot \bar{b}) &= \frac{d\bar{a}}{d\bar{r}} \cdot \bar{b} + \frac{d\bar{b}}{d\bar{r}} \cdot \bar{a}, \end{aligned} \quad (67)$$

и очевидной формулой (вытекает из (34) и (57))

$$\frac{d\bar{r}}{d\bar{r}} = \underline{\underline{E}}. \quad (68)$$

Полагая в (67₁) $\bar{a} = \bar{\omega}$, $\bar{b} = \bar{r}$ и принимая во внимание, что $\bar{\omega} = \text{const}$, а операция векторного умножения единичного тензора на вектор коммутативна, получим

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} &= -\frac{d\bar{r}}{d\bar{r}} \times \bar{\omega} = -\underline{\underline{E}} \times \bar{\omega} = -\bar{\omega} \times \underline{\underline{E}} \\ &\Rightarrow \bar{\omega} \times \underline{\underline{E}} = -\frac{d\bar{u}}{d\bar{r}}. \end{aligned} \quad (69)$$

Формула (65₂) для \bar{a}_e , с учетом (34) и (69), приводится к виду

$$\bar{a}_e = \bar{\omega} \times \bar{u} = \bar{\omega} \times \left(\underline{\underline{E}} \cdot \bar{u}\right) = (\bar{\omega} \times \underline{\underline{E}}) \cdot \bar{u} = -\frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} \cdot \bar{u}. \quad (70)$$

Но, согласно (67₂), при $\bar{a} = \bar{b} = \bar{u}$

$$\frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} \cdot \bar{u} = \frac{1}{2} \frac{d}{d\bar{r}}(\bar{u} \cdot \bar{u}) = \frac{d}{d\bar{r}}\left(\frac{u^2}{2}\right). \quad (71)$$

Поэтому из (70) следует, что

$$\bar{a}_e = -\frac{d}{d\bar{r}}\left(\frac{u^2}{2}\right) \quad (72)$$

Подставив (72) в (66) и имея в виду (55), приходим к искомому уравнению

$$d\left(\frac{w^2 - u^2}{2} + \frac{p}{\rho}\right) = 0. \quad (73)$$

Тензорный аналог формулы Гаусса-Остроградского

Если тензор $\underline{\underline{\alpha}}$, определяемый формулой

$$\underline{\underline{\alpha}} = \alpha_{ij} \bar{e}_i \otimes \bar{e}_j, \quad (74)$$

есть функция \bar{r} , функциями \bar{r} будут и векторы

$$\bar{\alpha}_j = \alpha_{ij} \bar{e}_i. \quad (75)$$

Применяя к $\bar{\alpha}_j$ записанную в векторном виде формулу Гаусса-Остроградского [26], после умножения обеих ее частей на \bar{e}_j и суммирования по j , получим

$$\int_V (\bar{\nabla} \cdot \bar{\alpha}_j) \bar{e}_j dV = \int_S (\bar{n} \cdot \bar{\alpha}_j) \bar{e}_j dS. \quad (76)$$

Отсюда, по аналогии с (7) и принимая во внимание (75) и (74), приходим к искомой формуле

$$\int_V \bar{\nabla} \cdot \underline{\underline{\alpha}} dV = \int_S \bar{n} \cdot \underline{\underline{\alpha}} dS. \quad (77)$$

Условия равновесия сплошной среды

В предположении, что моментные напряжения отсутствуют, а объемные силы равны нулю, уравнения равновесия можно записать в виде

$$\int_S \bar{p}_n dS = \bar{0} \quad \text{и} \quad \int_S \bar{r} \times \bar{p}_n dS = \bar{0} \quad (78)$$

или, с учетом (12), в виде

$$\int_S \bar{n} \cdot \underline{\underline{p}} dS = \bar{0} \quad \text{и} \quad \int_S \bar{r} \times (\bar{n} \cdot \underline{\underline{p}}) dS = \bar{0}. \quad (79)$$

Применяя к первому из этих уравнений формулу Гаусса-Остроградского и используя обычную в такого рода задачах процедуру, приходим к уравнению

$$\bar{\nabla} \cdot \underline{\underline{p}} = \bar{0}. \quad (80)$$

Так как, согласно (51), (16), (7) и (17),

$$\bar{\nabla} \cdot \underline{\underline{p}} = \left(\bar{e}_i \frac{\partial}{\partial x_i}\right) \cdot (\rho_{kj} \bar{e}_k \times \bar{e}_j) = \frac{\partial \rho_{kj}}{\partial x_i} \delta_{ik} \bar{e}_j = \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial x_i} \bar{e}_j, \quad (81)$$

то из (72) следует, что

$$\frac{\partial p_{ij}}{\partial x_i} \bar{e}_j = \bar{0}. \quad (82)$$

В его скалярной форме уравнение (81) приводится к системе

$$\frac{\partial p_{1j}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{2j}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{3j}}{\partial x_3} = 0 \quad (j=1;2;3). \quad (83)$$

Условие (79₂) так же, как и (79₁), может быть приведено к виду, допускающему использование формулы Гаусса-Остроградского. Так как $\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}$ – это вектор, то

$$\bar{r} \times (\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}) = -(\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}) \times \bar{r}. \quad (84)$$

Поэтому

$$\bar{r} \times (\underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{p}}) = -\underline{\underline{n}} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) \quad (85)$$

и, следовательно, наподобие (80), вместо условия (79₂) можно рассматривать условие

$$\bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) = \bar{0}. \quad (86)$$

Имея в виду, что

$$\bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) = \bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) + \bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) \quad (87)$$

и что, с учетом (80),

$$\bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) = (\bar{\nabla} \cdot \underline{\underline{p}}) \times \bar{r} = \bar{0}, \quad (88)$$

приходим к условию

$$\bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) = \bar{0}. \quad (89)$$

Полагая в (89)

$$\underline{\underline{p}} = p_{ij} \bar{e}_i \otimes \bar{e}_j, \quad \bar{\nabla} = \bar{e}_s \frac{\partial}{\partial x_s}, \quad \bar{r} = x_m \bar{e}_m \quad (90)$$

и учитывая, что

$$\frac{\partial x_m}{\partial x_s} = \delta_{ms}, \quad (91)$$

получим

$$\bar{\nabla} \cdot (\underline{\underline{p}} \times \bar{r}) = \bar{e}_s \cdot \left[(p_{ij} \bar{e}_i \otimes \bar{e}_j) \times \frac{\partial x_m}{\partial x_s} \bar{e}_m \right] = p_{ij} \bar{e}_j \times \bar{e}_m \delta_{si} \delta_{ms} = p_{ij} \bar{e}_i \times \bar{e}_m \delta_{mi} = p_{ij} \bar{e}_j \times \bar{e}_i \quad (92)$$

и, следовательно, условие (88) означает, что компоненты тензора $\underline{\underline{p}}$ должны удовлетворять условию

$$p_{ij} \bar{e}_j \times \bar{e}_i \equiv \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 p_{12} \bar{e}_2 \times \bar{e}_1 + p_{21} \bar{e}_1 \times \bar{e}_2 = (-p_{12} + p_{21}) \bar{e}_3 \quad (93)$$

которое представляет собой записанный в векторной форме закон парности касательных напряжений. Действительно, так как векторный квадрат вектора равен нулю, так что, например,

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 p_{ij} \bar{e}_j \times \bar{e}_i = p_{12} \bar{e}_2 \times \bar{e}_1 + p_{21} \bar{e}_1 \times \bar{e}_2 = (-p_{12} + p_{21}) \bar{e}_3 \quad (94)$$

то из (93) следует, что

$$p_{12} = p_{21} \quad (\text{см. также рис. 7})$$

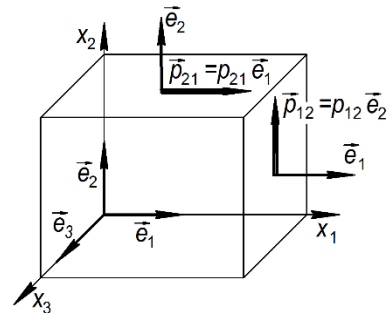


Рис. 7

Заключение

Опыт использования инженерных методов тензорного анализа показал, что их реализация не только упрощает процесс решения, но в целом ряде случаев способствует выяснению физического смысла полученных результатов. К числу таких задач относится учет влияния второй вязкости, доказательство закона парности касательных напряжений, вывод основных уравнений гидромеханики. Особое внимание хотелось бы обратить на задачу о вихревых движениях. Хотя решение этой задачи известно, но даже в таком капитальном сочинении, как знаменитая «Механика жидкости и газа» Л.Г. Лойцянского [13], часть имеющих принципиальное значение доказательств опускается, что иногда порождает ошибочные мнения о возможной области применения теории. С помощью тензорных методов удалось не только «поставить все точки над i», но и выявить принципиальную разницу между «гидродинамической» и «электрической» формулами Био - Савара - Лапласа. Еще одна задача, возможность решения которой другими методами представляется маловероятной, – это задача о силах инерции в потоках во вращающихся каналах. Было показано, что хотя Кориолисова сила

инерции равна сумме двух равных слагаемых, слагаемые, из которых состоит момент этой силы, друг другу не равны и, кроме того, что существенно с практической точки зрения, они проявляют себя по-разному [27 – 30]. Методы тензорного исчисления оказались полезными для решения задачи о построении гидродинамической модели ракетного движителя [31] и задачи

об обобщении основного уравнения теории турбин и лопастных машин на общий случай пространственного движения [29, 30]. В качестве удобного рабочего аппарата они использовались в теории прецессионных движений вращающихся валов [32] и в анализе геометрии эвольвентных профилей зубьев зубчатых колес [33].

Литература

1. Вильчевская Е.Н. Тензорная алгебра и тензорный анализ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 42 с.
2. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре. – М.: Изд-во Добросвет МЦНМО, 1998
3. Горшков А.Г., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды. – М.: Наука, 2000. – 214 с.
4. Курбатова Г.И., Филиппов В.Б. Элементы тензорного исчисления. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1998. – 232 с.
5. Itskov M. Tensor Algebra and Tensor Analysis for Engineers. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2009. – 247 p.
6. Димитриенко Ю.И. Тензорное исчисление: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.
7. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. – М.: Наука. Гл. редакция физико-математической литературы, 1979. – 500 с.
8. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
9. Жилин П.А. Векторы и тензоры второго ранга в трехмерном пространстве. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1992. – 86 с.
10. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. – М.: Наука, 1965. – 426 с.
11. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Перевод с немецкого. – М.: Изд-во ИЛ, 1951. – 575 с.
12. Работнов Ю.Н. Сопrotивление материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 455 с.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: ГИФМЛ, Наука, 1970. – 904 с.
14. Подольский М.Е. Физико-механические основы и некоторые инженерные приложения прямого тензорного исчисления: монография. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2011. – 466 с.
15. Подольский М.Е. Тензорное исчисление. Элементарные трактовки и примеры практических приложений // Морской вестник. – 2013. – №4 (48). – С. 97-100.
16. Подольский М.Е., Черенкова С.В. Инженерно-ориентированные методы тензорного анализа и задачи гидравлики // Сб. науч. тр. МНТК 9-10 июня 2016 года «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития». – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – С. 241-248.
17. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. Физико-механические и линейно-алгебраические основы инженерных методов тензорного анализа // Современное машиностроение: Наука и образование. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017, с. 140-151
18. Коренев Г.В. Тензорное исчисление. – М.: Изд-во МФТИ, 1996. – 240 с.
19. Подольский М.Е. Аксиоматика инженерных методов тензорного анализа. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2002. – 24 с.
20. Подольский М.Е. Прикладная тензорная алгебра. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2007. – 246 с.
21. Podolsky M.E. Axiomatics of direct tensor calculus // Tensor. New series. Vol. 70, N1. Published by Tensor Society. Chigasaki, Japan. 2008. P. 46-52.
22. Перышкин А.В. Физика. 7 кл. // Учебник для общеобразовательных учреждений. – М.: Дрофа, 2013 – 221 с.
23. Подольский М.Е., Черенкова С.В. О кинематике пространственного движения твердого тела // Теория механизмов и машин. – 2015. – Т. 13. – №1 (25). – С. 16-21.
24. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Смирнов В.Р. Формула П.А. Жилина в теории сферического движения твердого тела // Теория механизмов и машин. – 2015. – Т. 13. – № 2 (26). – С. 6-12.
25. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика: в 2 ч. – М.: ГИТТЛ, 1955. – Ч. 1
26. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.3. – М.: ГИФ-М, 1960. – 656 с.
27. Podolsky M.E. Coriolis inertia forces in the problem of Euler's turbine equation // Proc. of XLI Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 439-443.
28. Подольский М.Е., Черенкова С.В. Подход Эйлера и прямое тензорное исчисление в задаче о физической природе кориолисовых эффектов // Письма в ЖТФ, 2014. Т. 40, вып. 18. С. 54-57.
29. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. Основное уравнение теории турбин и лопастных машин в пространственной постановке // Морские интеллектуальные технологии. – 2016. – Т.1. – № 2 (32). – С. 95-101.
30. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. О кориолисовых эффектах во вращающихся потоках жидкостей // Морские интеллектуальные технологии. СПб, 2017, № 2 (36), Т.1, с. 35-43
31. Подольский М.Е., Иванова М.А., Черенкова С.В. Гидродинамическая модель ракетного движителя // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – Т. 2. – №2 (24). – С. 52-60.
32. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. К вопросу об обратной прецессии ротора // Теория механизмов и машин. – 2016. – Т. 14. – №4 (32). – С. 183-190.

33. Подольский М.Е., Иванова М.А. О радиусе кривизны эвольвенты // Теория механизмов и машин. – 2012. – Т. 10. – №2. – С. 30-32.

References

1. Vilchevskaya E.N. Tenzornaya algebra i tenzornyy analiz. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – 42 s.
2. Gelfand I.M. Lekcii po linejnoj algebre. – M.: Izd-vo Dobrosvet MCNMO, 1998
3. Gorshkov A.G., Rabinskij L.N., Tarlakovskij D.V. Osnovy tenzornogo analiza i mexanika sploshnoj sredy. – M.: Nauka, 2000. – 214 s.
4. Kurbatova G.I., Filippov V.B. Elementy tenzornogo ischisleniya. – SPb.: Izd-vo SPbGU, 1998. – 232 s.
5. Itskov M. Tensor Algebra and Tensor Analysis for Engineers. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg, 2009. – 247 p
6. Dimitrienko Yu.I. Tenzornoe ischislenie: Ucheb. posobie dlya vuzov. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 575 s.
7. Feodosev V.I. Soprotivlenie materialov. – M.: Nauka. Gl. redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 500 s.
8. Lure A.I. Nelinejnaya teoriya uprugosti. – M.: Nauka, 1980. – 512 s.
9. Zhilin P.A. Vektory i tenzory vtorogo ranga v trexmernom prostranstve. – SPb.: Izd-vo SPbGTU, 1992. – 86 s.
10. Kochin N.E. Vektornoe ischislenie i nachala tenzornogo ischisleniya. – M.: Nauka, 1965. – 426 s.
11. Prandtl L. Gidroaeromexanika. Perevod s nemeckogo. – M.: Izd-vo IL, 1951. – 575 s.
12. Rabotnov Yu.N. Soprotivlenie materialov. – M.: Fizmatgiz, 1962. – 455 s.
13. Lojcyanskij L.G. Mexanika zhidkosti i gaza. – M.: GIFML, Nauka, 1970. – 904 s.
14. Podolskij M.E. Fiziko-mexanicheskie osnovy i nekotorye inzhenernye prilozheniya pryamogo tenzornogo ischisleniya: monografiya. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2011. – 466 s.
15. Podolskij M.E. Tenzornoe ischislenie. Elementarnye traktovki i primery prakticheskix prilozhenij // Morskoy vestnik. – 2013. – №4 (48). – S. 97-100.
16. Podolskij M.E., Cherenkova S.V. Inzhenerno-orientirovannye metody tenzornogo analiza i zadachi gidravliki // Sb. nauch tr. MNTK 9-10 iyunya 2016 goda «Gidravlicheskie mashiny, gidropnevmooprivody i gidropnevmoavtomatika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya». – SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2016. – S. 241-248.
17. Podolskij M.E., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Fiziko-mexanicheskie i linejno-algebraicheskie osnovy inzhenernyx metodov tenzornogo analiza // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2017, s. 140-151
18. Korenev G.V. Tenzornoe ischislenie. – M.: Izd-vo MFTI, 1996. – 240 s.
19. Podolskij M.E. Aksiomatika inzhenernyx metodov tenzornogo analiza. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2002. – 24 s.
20. Podolskij M.E. Prikladnaya tenzornaya algebra. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2007. – 246 s.
21. Podolsky M.E. Axiomatics of direct tensor calculus // Tensor. New series. Vol. 70, N1. Published by Tensor Society. Chigasaki, Japan. 2008. P. 46-52.
22. Peryshkin A.V. Fizika. 7 kl. // Uchebnik dlya obshheobrazovatelnyx uchrezhdenij. – M.: Drofa, 2013 – 221 s.
23. Podolskij M.E., Cherenkova S.V. O kinematike prostranstvennogo dvizheniya tverdogo tela // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2015. – T. 13. – №1 (25). – S. 16-21.
24. Podolskij M.E., Cherenkova S.V., Smirnov V.R. Formula P.A. Zhilina v teorii sfericheskogo dvizheniya tverdogo tela // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2015. – T. 13. – № 2 (26). – S. 6-12.
25. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromexanika: v 2 ch. – M.: GITTL, 1955. – Ch. 1
26. Fixtengolc G.M. Kurs differencialnogo i integralnogo ischisleniya. T.3. – M.: GIF-M, 1960. – 656 s.
27. Podolsky M.E. Coriolis inertia forces in the problem of Euler's turbine equation // Proc. of XLI Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 439-443.
28. Podolskij M.E., Cherenkova S.V. Podxod Ejlera i pryamoe tenzornoe ischislenie v zadache o fizicheskoj prirode koriolisovyx effektorov // Pisma v ZhTF, 2014. T. 40, vyp. 18. S. 54-57.
29. Podolskij M.E., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Osnovnoe uravnenie teorii turbin i lopastnyx mashin v prostranstvennoj postanovke // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2016. – T.1. – № 2 (32). – S. 95-101.
30. Podolskij M.E., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. O koriolisovyx effektax vo vrashhayushhixy potokax zhidkostej // Morskie intellektualnye tehnologii. SPb, 2017, № 2 (36), T.1, s. 35-43
31. Podolskij M.E., Ivanova M.A., Cherenkova S.V. Gidrodinamicheskaya model raketnogo dvizhitelya // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2014. – T. 2. – №2 (24). – S. 52-60.
32. Podolskij M.E., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. K voprosu ob obratnoj precessii rotora // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2016. – T. 14. – №4 (32). – S. 183-190.
33. Podolskij M.E., Ivanova M.A. O radiuse krivizny evolventy // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2012. – T. 10. – №2. – S. 30-32.

УДК 004.523; УДК 621.377.037.3

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ДОМЕННАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИСЕНСОРНОГО МОНИТОРИНГА КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рогозинский Глеб Гендрихович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., 13
заместитель начальника НОЦ «Медиацентр»
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22
e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

Комашинский Владимир Ильич

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., 13
e-mail: kama3108@gmail.com

Аннотация

Большинство современных информационных систем сталкиваются с проблемой ограниченных возможностей восприятия пользователем значительных информационных потоков. Мультимедийные полимодальные человеко-машинные интерфейсы получают широкое применение в разнообразных технических системах, но создаются «творческим» путем, не имея систематизированного способа их описания и формулировки требований. В статье предлагается модель, позволяющая с единых позиций описывать значимые характеристики киберфизической системы, формулировать требования к мультимодальному интерфейсу.

Мультидоменная модель инфотелекоммуникаций позволяет формально описать взаимосвязь между объектами физического, информационного (кибернетического) и когнитивного доменов. Распространение ее принципов на подсистемы мониторинга, в частности, в рамках киберфизических систем, позволяет установить формальное описание процессов, протекающих в различных доменах, и использовать это при разработке дальнейших методов полимодального представления данных и проектировании соответствующих интерфейсов.

Даны основные определения доменной модели и ее модификация с учетом полимодальности представления данных. В конце статьи рассмотрены некоторые задачи в рамках акустического представления данных (сонификации).

Ключевые слова: сонификация, модифицированная доменная модель, инфотелекоммуникационные системы, киберфизические системы.

MODIFIED MULTI DOMAIN MODEL OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS MONITORING

Gleb G. Rogozinsky

PhD, principal researcher, laboratory of Ecology of Transport Systems
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
12th line of Vasilyevsky I., 13, St.Petersburg, 199178, Russia
Deputy Head of Medialabs
The Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications
Bolshevikov Pt., 22, St.Petersburg, 193232, Russia
e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

Vladimir I. Komashinsky

Sc.D., Deputy head
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
12th line of Vasilyevsky I., 13, St.Petersburg, 199178, Russia
e-mail: kama3108@gmail.com

Abstract

Modern informational systems tend to encounter the limitations of analysis and perception of significant information flow by human operator. Multimedia multimodal human-machine interfaces find their application in various technical systems, but due to mainly artistic design, there is no systematized approach for their description and requirements formulation. The paper presents a model of cyber-

physical system (CPS), which provides a unified description for significant characteristics of a system and to formulate multimodal interface requirements.

Multi-domain model of infocommunications allows formal description of interaction between objects of physical, informational (cybernetic) and cognitive domains. Its extension on monitoring subsystems, particularly in cyber-physical systems, gives a formalization of processes, which take place in different domains, and provides the basis for a set of methods of multimodal representation of data and corresponding interfaces design.

The paper gives main definitions of multi-domain model and its modification, considering multimodal data representation. In conclusion several tasks within the framework of auditory interface design principles, known as sonification, are given.

Key words: sonification, modified domain model, informational telecommunication systems, cyber-physical systems (CPS).

Введение

Киберфизические системы, как новая информационно-технологическая парадигма, подразумевающая конвергенцию кибернетических и физических объектов и процессов, стремительно проникает в различные отрасли, в том числе и в область морских интеллектуальных технологий, затрагивая широкий круг вопросов – от интеллектуального экологического мониторинга на основе сенсорных сетей [1] до решений в области управления стивидорными предприятиями [2]. Интеграция физического и информационного пространств в единое целое является основой концепции INDUSTRY 4.0 или Четвертой технологической революции.

В контексте сказанного выше одним из наиболее слабых звеньев любой системы становится человек-оператор, особенно в условиях увеличивающейся информационной нагрузки. Полное исключение человеческого фактора невозможно в силу очевидных причин. При этом в современной высокотехнологичной среде взаимодействие человека с информационно-техническими системами становится все более сложным и многообразным, что создает значительную нагрузку на оператора и приводит к ошибочным реакциям в контуре управления.

Подобные проблемы делают актуальным класс задач, направленных на разработку *полимодальных интерфейсов*, позволяющих обеспечить рациональное и эргономически-оптимальное распределение информационных потоков между органами оператора, отвечающими за восприятия различных типов сигналов (модальностей).

Описание мультидоменной модели

Проектирование эффективных (с точки зрения оптимального демультимплексирования информационных потоков между органами чувств человека-оператора системы) полимодальных интерфейсов взаимодействия в человеко-машинных системах требует разработки соответствующих методов описания, анализа и конструирования представлений свойств и характеристик объектов и процессов в киберфизических системах с заданными требованиями к адекватности и точности представления.

Управление техническими объектами и системами предполагает формирование решений о кибернетических воздействиях, изменяющих состояние системы в направлении роста значений целевой функции на основании информационных представлений о состоянии объекта.

В качестве фундаментальной основы для описания и анализа проблемы предлагается использовать модифицированную доменную модель инфокоммуникаций [3], позволяющую формально описать процессы информационного взаимодействия, обслуживаемые соответствующими интерфейсами участников процесса.

Рассматриваемая модель предполагает разделение пространства взаимодействия на три уровня (домена), каждый из которых связан с группами объектов общей природы – «физическими», «информационными» и «когнитивными».

Соответственно, перечисленные выше объекты представляют сущности трех доменов – физического (ФД), информационного (ИД) и когнитивного (КД).

На границах доменов реализуются соответствующие интерфейсы, позволяющие осуществлять информационное взаимодействие составляющих систему элементов.

Каждый объект/субъект системы обладает конечным набором различных состояний, представляемых его собственным тезаурусом.

Так, для объекта *A* физического домена, обладающего множеством состояний тезауруса, существует множество информационных

представлений $\langle A \rangle^{\xi^A}$ в тезаурусе ξ^A , являющихся сущностями информационного домена. Информационное взаимодействие состоит в изменении состояния «объекта-приемника» (его тезауруса) в ответ на воздействие сигнала, сформированного в соответствии с изменением состояния «объекта-передатчика».

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{Signal} \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^B} \cdot \quad (1)$$

Если учесть перенос «информации» между физическим, информационным и когнитивным

доменами, то выражение (1) примет вид:

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{Q_1} \langle C \rangle^{\xi^C} \xrightarrow{Q_2} \left\langle \left\langle \langle A \rangle^{\xi^A} \right\rangle^{\xi^C} \right\rangle^{\xi^B}, \quad (2)$$

где: Q_1, Q_2 – преобразования представлений объекта ФД при формировании сигнала, его трансформациях в процессе передачи и приема,

ξ^C, ξ^B – тезаурусы сигнала и приемника соответственно.

На рисунке 1 представлена упрощенная интерпретация доменной модели, в которой отдельно выделена подсистема мониторинга внутри информационного домена.

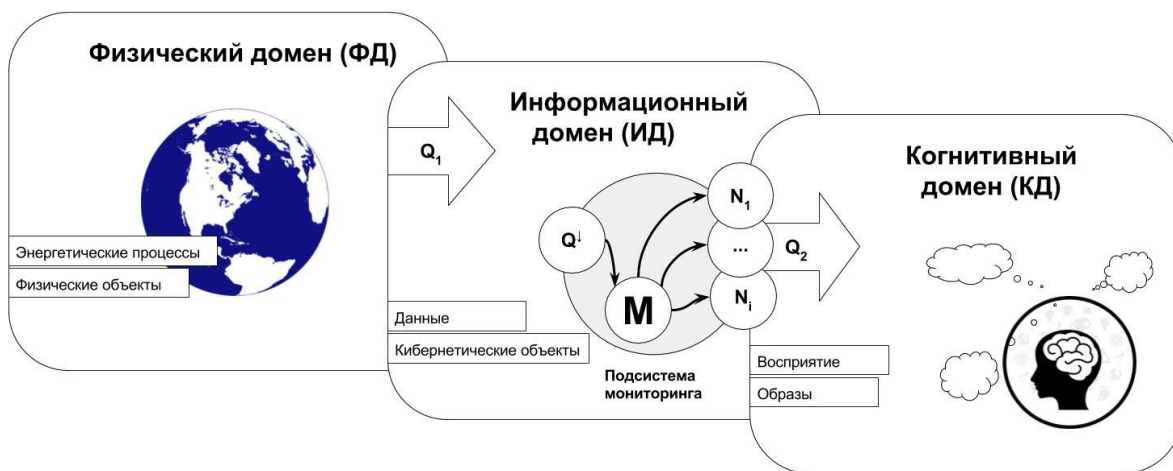


Рис. 1. Упрощенная интерпретация доменной модели с подсистемой мониторинга

Q_1 и Q_2 – преобразование представлений на границах ФД-ИД и ИД-КД, соответственно; Q^\downarrow – операция сокращения тезауруса, M – блок мэппинга; $N_1 - N_i$ – набор интерфейсов, представляющих данные в той или иной модальности.

Очевидно, что объектами систем компьютерного мониторинга являются сущности информационного домена, являющиеся отображениями физических объектов или существующие только в виртуальном пространстве. При этом логично, что любая система мониторинга будет использовать тезаурус, меньший, чем общий тезаурус информационного домена. Так, среди всего многообразия параметров, описывающих состояние некой системы, человеку-оператору для решения задач мониторинга требуется только определенный набор параметров.

Для дальнейшего формального описания введем оператор редукции тезауруса, такой что

$$Q^\downarrow : \xi^C \subset \xi^{\tilde{C}}, \quad (3)$$

то есть редуцированный (сокращенный) тезаурус $\xi^{\tilde{C}}$ является подмножеством тезауруса представления системы в информационном домене ξ^C .

Таким образом, в терминах доменной модели редукция тезауруса объекта будет записана как

$$\left\langle \left\langle \langle A \rangle^{\xi^A} \right\rangle^{\xi^C} \right\rangle^{\xi^B} \xrightarrow{Q^\downarrow} \left\langle \langle A \rangle^{\xi^A} \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}}, \quad (4)$$

или, эквивалентно,

$$\langle C \rangle^{\xi^C} \xrightarrow{Q^\downarrow} \langle C \rangle^{\xi^{\tilde{C}}}, \quad (5)$$

где C – кибернетический объект, являющийся «цифровой тенью» (digital shadow) физического объекта A .

Для общего случая полимодального представления информации, поступающей из системы для ее мониторинга, введем векторный оператор \bar{Z} , каждым элементом которого является оператор преобразования тезауруса объекта в информационном домене к тезаурусу соответствующего интерфейса представления информации. Данный оператор может включать в себя и некоторые специальные операции, направленные на повышение информационной плотности (различные преобразования типа спектрального преобразования), а ряд операций функционального отображения данных.

Так, в четырехмодальном случае,

$$\bar{Z} = \{Q^A; Q^V; Q^O; Q^T\}, \quad (6)$$

где Q^A, Q^V, Q^O, Q^T – аудиальный (слух), визуальный, ольфакторный (обоняние) и тактильный операторы преобразования тезауруса, соответственно.

Таким образом, в результате воздействия векторного оператора \bar{Z} в общем случае имеем

$$\langle C \rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \xrightarrow{\bar{Z}} \left\{ \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\}_{i=1..M_{\max}} \quad (7)$$

где M_i – i -ая мода, M_{\max} – максимальное количество мод представления данных в рассматриваемой системе.

Тогда переход от кибернетических объектов к их когнитивному восприятию человеком-оператором в результате анализа каким-либо органом чувств:

$$\left\{ \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\}_{i=1..M_{\max}} \xrightarrow{Q_i^N} \left\{ \left\langle \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\rangle^{\xi^{U_i}} \right\}_{i=1..M_{\max}}, \quad (8)$$

где ξ^{U_i} – тезаурус оператора в когнитивном домене. Раскрывая подробнее, имеем

$$\left| \left\langle C \right\rangle^{\xi^C} \xrightarrow{Q^{\downarrow}} \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \xrightarrow{\bar{Z}} \left\{ \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\}_{i=1..M_{\max}} \right\rangle_{ID} \xrightarrow{Q_i^N} \left\{ \left\langle \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\rangle^{\xi^{U_i}} \right\}_{i=1..M_{\max}} \right\rangle_{CD} \quad (9)$$

где ID – кибернетический домен, CD – когнитивный домен.

Для какой-либо отдельной моды, например, аудиальной, имеем:

$$\left| \left\langle C \right\rangle^{\xi^C} \xrightarrow{Q^{\downarrow}} \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \xrightarrow{Q^A} \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^A} \right\rangle_{ID} \xrightarrow{Q_A^N} \left\{ \left\langle \left\langle \left\langle C \right\rangle^{\xi^{\tilde{C}}} \right\rangle^{\xi^A} \right\rangle^{\xi^{U_A}} \right\}_{i=1..M_{\max}} \right\rangle_{CD}. \quad (10)$$

Альтернативные методы представления данных

На сегодняшний день второй модальностью после визуальной является аудиальная. Экспериментальные аудиальные интерфейсы имеют свою интересную историю развития [4]. Класс методов представления информации на основе неречевых акустических сигналов, известный как *сонификация* (sonification), развивается с конца XX века [5]. При этом использование именно неречевых акустических сигналов позволяет рассчитывать на сокращение времени реакции оператора за счет

использования биологических особенностей первичных акустико-аналитических отделов и структур головного мозга.

Информационными представлениями объектов физического домена могут являться как визуальные (графические), так и акустические объекты, которые представляют один из объектов исследования. Спектр подобных объектов может быть расширен за счет ароматических полей (ольфакторная модальность) и/или тактильных пространств [6] (Рис. 2).

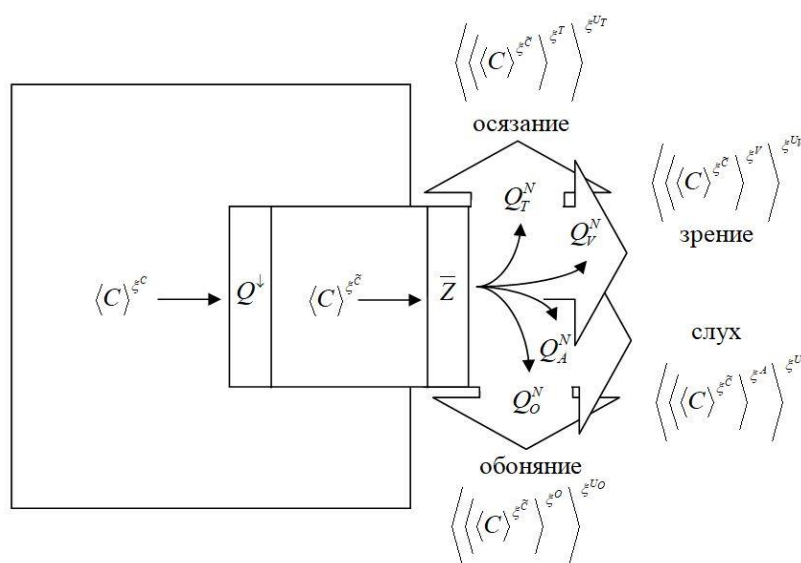


Рис. 2. Модель полимодального представления данных в киберфизической системе

Таким образом, при разработке человеко-машинных интерфейсов можно сформулировать следующие основные задачи:

1. Задача определения набора характеристик объектов, как источников информационных потоков, и анализ, включающий в себя выявление диапазонов их изменения, характерных особенностей изменения и т.д. В общем виде для объектов физического домена можно выделить следующие группы параметров:

- параметры и характеристики, определяющие собственные состояния объектов;
- параметры, определяющие пространственные положения объектов, скорости, ускорения и аналогичные параметры, связанные с координатными измерениями;
- параметры, относящиеся к событиям, связанным с объектами.

Обобщая, можно утверждать, что основными генераторами информационных потоков, требующих своего отражения в интерфейсах, выступают физические объекты, события и процессы, обладающие специфическим набором параметров и характеристик.

2. Задача определения параметров и характеристик слуховой системы, связанных с восприятием акустических сигналов. Данная задача представляется в значительной степени решенной, если опираться на существенный объем исследований в различных разделах акустики и физиологии слуха. Тем не менее, ряд вопросов, касающихся психологических аспектов восприятия по-прежнему нельзя считать полностью исследованными. Это можно подтвердить всей историей развития музыкального искусства и такими современными направлениями неформализованной творческой деятельности как, например, звуковой дизайн.

3. Задача адекватного и корректного отображения множества элементов тезауруса объектов физического домена на множество

элементов тезауруса информационного домена (параметров реальных наблюдаемых объектов в параметры акустических сигналов) для последующего отображения на множество образов когнитивного домена.

Следует отметить, что последняя задача не может быть эффективно решена формальным соотношением элементов двух тезаурусов, поскольку не учитывает психоэмоциональных аспектов восприятия акустических сигналов, и, в силу этого, требует специфических междисциплинарных подходов и формирования нетривиальных критериев оценки возможных решений.

Формируемые пространственно-акустические образы могут успешно использоваться не только в задачах мониторинга и управления техническими системами и объектами как реальными сущностями физического домена, но и такими перспективными направлениями как виртуальная (VR) и дополненная (AR) реальность. Отдельными интересными направлениями использования являются индустрия развлечений, в частности компьютерные игры, а также разнообразные творческие направления, включающие звуковой дизайн.

Выводы

1. Доменная модель инфокоммуникаций обеспечивает общую методологию, включающую как методы формального описания физических, кибернетических и киберфизических процессов, так и способы количественного анализа параметров и характеристик используемых систем. Одновременно с этим предоставляется возможность учитывать слабо формализованные компоненты интерфейсов, связанные с психофизиологическими и эмоциональными аспектами восприятия.

2. Использование неречевых акустических интерфейсов в сложных человеко-машинных

системах, в том числе и киберфизических системах, позволяет решить ряд актуальных задач, связанных с мониторингом, повышением устойчивости и эффективности использования подобных систем.

Литература

11. Малыгин, И.Г. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский, О.А. Королев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 3-12.
12. Киберфизическая система управления стивидорным предприятием CPS Stevedore Eye. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plm.pw/2017/06/cps-stevedore-eye.html>. Дата обращения: 30.08.2017.
13. Sotnikov, A.D., Rogozinsky G.G. (2017). The Multi-Domain Infocommunication Model as the Basis of an Auditory Interfaces Development for Multimedia Informational Systems. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 5(11), 77-82.
14. Worall, D. (2009). An Introduction to Data Sonification. *The Oxford Handbook of Computer Music*. Ed. Roger T. Dean. 624 pp.
15. *The Sonification Handbook*. / Hermann, T; Hunt, Andy; Neuhoff, J. Logos Verlag Berlin, 2011.
16. Basov O., Ronzhin A., Budkov V., Saitov I. (2015) Method of Defining Multimodal Information Falsity for Smart Telecommunication Systems. In Balandin S., Andreev S., Koucheryavy Y. (Eds.), *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2015. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9247. Springer, Heidelberg, pp. 163-173.

References

1. Malygin, I.G. Informationsionno-upravlyayushchie sistemy vodnogo transporta v period chetvertoy industrial'noy revolyutsii / I.G. Malygin, V.I. Komashinskiy, O.A. Korolev. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. – 2017. – № 8. – S. 3-12. (in Russian)
2. Kiberfizicheskaya sistema upravleniya stividornym predpriyatiem CPS Stevedore Eye. – <http://www.plm.pw/2017/06/cps-stevedore-eye.html>. Accessed 30.08.2017.
3. Sotnikov, A.D., Rogozinsky G.G. (2017). The Multi-Domain Infocommunication Model as the Basis of an Auditory Interfaces Development for Multimedia Informational Systems. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 5(11), 77-82.
4. Worall, D. (2009). An Introduction to Data Sonification. *The Oxford Handbook of Computer Music*. Ed. Roger T. Dean. 624 pp.
5. *The Sonification Handbook*. / Hermann, T; Hunt, Andy; Neuhoff, J. Logos Verlag Berlin, 2011.
6. Basov O., Ronzhin A., Budkov V., Saitov I. (2015) Method of Defining Multimodal Information Falsity for Smart Telecommunication Systems. In Balandin S., Andreev S., Koucheryavy Y. (Eds.), *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2015. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9247. Springer, Heidelberg, pp. 163-173.

УДК 51.74.

ЗАДАНИЕ ОБОСНОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Владимир Николаевич Сидоров

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
Российский университет транспорта (МИИТ), ул. Образцова. 969, Москва, 127994, Россия
профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика»
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Комсомольский пр., 29, Пермь 614990, Россия
профессор кафедры механики, металлических конструкций и компьютерных методов
Технический университет Кельце, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Кельце 25-314, Польша
e-mail:sidorov.vladimir@gmail.com

Катаржина Новак

магистр, ассистент кафедры механики, металлических конструкций и компьютерных методов
Технический университет Кельце, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Кельце 25-314, Польша
katarzyna.nowak4@wp.pl

Аннотация

В статье рассматривается подход к выбору и обоснованию компьютерных моделей реологических проявлений конструктивных материалов на примере модели ползучести бетона. При назначении параметров компьютерной модели, а также при окончательной оценке возможности использования построенной компьютерной модели используются результаты экспериментальных исследований ползучести бетонных образцов. Кроме того, эффективность компьютерной модели оценивалась в сравнении с результатами проведенного анализа ползучести бетонных образцов в соответствии с действующими нормативными требованиями. Для рассмотренного в статье исследования была выбрана обобщенная модель Максвелла вязкоупругого материала. Математическим представлением модели Максвелла в этом подходе является ряд Прони, реализующий экспоненциальный характер изменений деформаций ползучести во времени. Для выбора оптимальных параметров ряда Прони, соответствующих реальным физическим свойствам материала, использован метод наименьших квадратов. Исследование компьютерной модели ползучести проводится в программной среде SIMULIA Abaqus.

Ключевые слова: реологическая модель; ползучесть бетона; модель вязкоупругого материала Максвелла; калибровка компьютерной модели.

ASSIGNMENT OF VALID COMPUTER MODELS OF CONSTRUCTIVE MATERIALS WITH RHEOLOGICAL PROPERTIES

Vladimir N.Sidorov

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department "Building structures, buildings and constructions"
Russian University of Transport, Obrazcova st. 9b9, Moscow 127994, Russian Federation
the professor of department "Building constructions and computing mechanics"
Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky av. 29, Perm 614990, Russian Federation
the professor of department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods
Kielce University of Technology, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce 25-314, Poland
e-mail:sidorov.vladimir@gmail.com\

Katarzyna Nowak

mr., the assistant of department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods
Kielce University of Technology, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce 25-314, Poland
katarzyna.nowak4@wp.pl

Abstract

The article examines the way of choosing and substantiating the rheological computer model of constructive material using the example of creep modeling of concrete. When assigning the parameters of the computer model, as well as in the final assessment of the possibility of using the

constructed computer model, the results of experimental studies of the creep of concrete samples are used. In addition, the efficiency of the computer model was evaluated in comparison with the results of the analysis of creep of concrete samples made in accordance with current regulatory requirements. For the study considered in the article, the generalized Maxwell model of a viscoelastic material is chosen. The mathematical representation of Maxwell's model in this approach is the Prony series, realizing the exponential nature of changes in creep deformation in time. To select the optimal parameters of the Prony series, corresponding to the real physical properties of the material, the least squares method is used. Studies of the computer creep model are performed in the software environment of SIMULIA Abaqus.

Key words: The rheological model; concrete creep; Maxwell viscoelastic material model; computer model calibration.

Введение

Имеются показательные примеры аварий сооружений и инженерных систем, вызванных реологическими проявлениями свойств используемых конструктивных материалов, таких как металлы, бетон и др. Причинами таких аварий являются не столько неблагоприятные изменения во времени напряженно-деформированного состояния, сколько принципиальное изменение конструктивной схемы объекта. Более того, конструктивная схема становится такой, что она больше не может обеспечить безопасную работу инженерного строительного объекта. При расчётном анализе конструкции важно выбрать адекватную компьютерную реологическую модель и обосновать соответствие её параметров фактическому поведению конструктивного материала.

1. Выбор реологической модели

Конструкции, материалы которых работают в течение длительного периода их эксплуатации в упругой стадии, могут быть рассчитаны с использованием линейных реологических моделей, предложенных например в [1], [2] или [3]. Вместе с этим при моделировании изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени можно предположить, что такие временные явления, как деформация ползучести или релаксация напряжений, могут быть идентифицированы с вязкоупругим поведением материала. В свою очередь, известная обобщенная модель Максвелла вполне приемлема для моделирования вязкоупругих свойств изотропного материала, см. [4]. Механическая интерпретация этой модели представляет собой комбинацию параллельно и последовательно соединенных пружин и демпферов (рис.1).

В таком случае участие пружин в механической схеме модели Максвелла математически представлено зависимостью между напряжениями и деформациями по закону Гука. А участие демпферов в этой механической модели представлено соотношением между напряжениями и скоростями деформации с коэффициентом вязкости материала η , в свою очередь устанавливающим эту пропорцию.

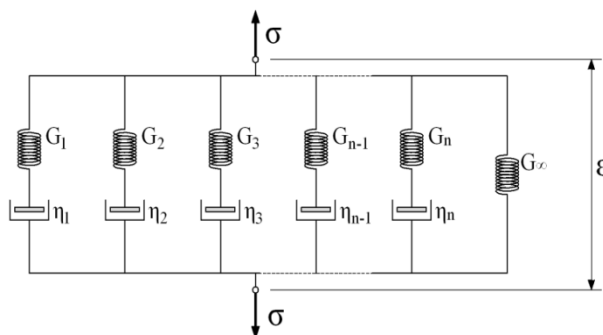


Рис. 1. Механическая схема обобщенной модели Максвелла с параллельными и последовательно соединенными пружинками и демпферами.

σ – напряжение, соответствующее вязкоупругой деформации ϵ ; G_i and η_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) – комбинация n модулей сдвига материала и n коэффициентов вязкости материала; n – количество элементов, включённых в модель; G_∞ – модуль сдвига, соответствующий мгновенному (начальному) модулю упругости материала.

2. Данные эксперимента для назначения параметров и оценки работоспособности компьютерной модели

Для обоснования назначения параметров компьютерной реологической модели были использованы результаты экспериментальных исследований, полученных в работе [5]. При проведении этого эксперимента в течение времени измерялась деформация ползучести бетонных образцов цилиндрической формы. Параметры бетона, из которого были изготовлены образцы, показаны в таблице 1. Размеры, условия закрепления и параметры постоянной во времени нагрузки показаны на рис. 2. Вертикальная нагрузка, сжимающая образец, распределенная по его верхней поверхности, не превышала 40% от величины разрушающей нагрузки для марки используемого бетона.

Для построения и анализа численной модели ползучести были использованы результаты испытаний бетонных образцов в двух режимах:

- 1 режим испытаний: нагрузка 2,47 МПа прикладывалась через 1 день после изготовления бетонных образцов, и в этих условиях образцы находились 13 дней при влажности окружающей среды 95% и при температуре 20-22° С;

Table 1
 Параметры бетона, использованного для изготовления экспериментальных образцов

MIX PROPORTION	AMOUNT OF COMPONENT [kg/m ³]
Cement CEM III/A	350
32,5 N-LH/HSR/NA	
Water	175
Agreggate 0/2	561
Agreggate 2/8	1309

- 2 режим испытаний: нагрузка 10,76 МПа была приложена через 28 дней после изготовления бетонных образцов, и в этих условиях образцы были 11 дней в условиях влажности 95% и при температуре 20-22° С.

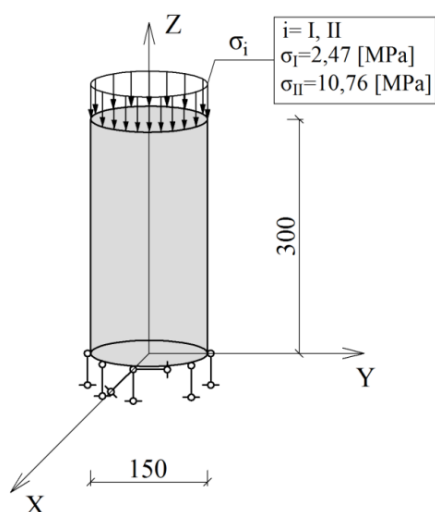


Рис. 2. Схема экспериментальных образцов и их вычислительная модель.

В работе [5] подробно описывается программа проведенных лабораторных испытаний и представлены результаты проведенных экспериментальных исследований.

3. Численная модель вязкоупругого материала

Экспоненциальный характер изменения деформации ползучести во времени, который, в частности, отражает модель Максвелла вязкоупругости, алгоритмически моделируется представлением эффективного модуля упругости в виде ряда Прони [4]:

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (1)$$

где G_∞ – величина долговременного модуля релаксации сдвига, определяемая в зависимости от мгновенного модуля упругости материала, $G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i$, – начальный модуль упругости сдвига, t – время, G_i и τ_i – параметры ряда Прони ($i = 1, 2, \dots, n$) назначаемые для определённого материала, при этом τ_i – время релаксации (2),

n – количество элементов, составляющих обобщенную модель Максвелла (см. рис.1) и число выбираемых членов ряда Прони.

$$\tau_i = \frac{\eta_i}{G_i}, \quad (2)$$

где η_i – коэффициент вязкости материала.

Для выполнения и проверки результатов численного анализа ползучести бетонных образцов была выбрана численная модель вязкоупругого материала, реализованная в программе SIMULIA Abaqus [6]. В этой программной среде при использовании модели вязкоупругого материала, основанной на выражении ряда Прони, назначаются безразмерные модули релаксации (3) и (4). Это модуль релаксации сдвига:

$$gr(t) = \frac{G(t)}{G_0} = 1 - \sum_{i=1}^n G_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (3)$$

где G_0 – мгновенный модуль упругости сдвига, который зависит от мгновенного модуля упругости E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 : $G_0 = E_0/2(1+\nu_0)$; и модуль объёмной релаксации:

$$kr(t) = \frac{K(t)}{K_0} = 1 - \sum_{i=1}^n K_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (4)$$

где: K_0 – коэффициент объёмной жесткости, зависящий от мгновенного модуля упругости E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 : $K_0 = E_0/3(1-2\nu_0)$, G_i и K_i – параметры ряда Прони, которые назначаются для определённого материала.

При постоянных во времени значениях напряжений удобно использовать так называемый эффективный модуль упругости:

$$E_{c,eff} = \frac{E_0}{1+\varphi(t,t_0)} \quad (5)$$

где $\varphi(t, t_0)$ – коэффициент ползучести.

Коэффициент ползучести $\varphi(t, t_0)$, устанавливается для конкретного возраста бетона t и зависит, в том числе, от времени приложения нагрузки t_0 . Его значение регулируется нормативными документами, например [7].

Таким образом, безразмерный модуль релаксации сдвига (3) может быть представлен с участием эффективного модуля упругости (1) формулой:

$$gr(t) = \frac{G(t)}{G_0} = \frac{1}{1+\varphi(t,t_0)} \quad (3a)$$

Таким же образом может быть представлен модуль объёмной релаксации:

$$kr(t) = \frac{K(t)}{K_0} = \frac{1}{1+\varphi(t,t_0)} \quad (4a)$$

Алгоритм вычисления коэффициента ползучести $\varphi(t, t_0)$, составленный в соответствии с методикой стандарта [7], был запрограммирован в среде Mathcad. В этом алгоритме среди исходных данных были заданы площадь поперечного сечения образца $A_c = 17671.46 \text{ mm}^2$, окружность образца, контактирующую с внешней средой $u = 471.24 \text{ mm}$, средняя прочность бетона в возрасте 28 дней $f_{cm} = 28,4 \text{ MPa}$, параметр $\alpha = -1$ соответствующий бетону класса C.

Значения коэффициента ползучести, вычисленные таким образом для первого и второго тестовых режимов (образцов), приведены в таблице 2. На основе этих данных определялись значения безразмерных модулей

релаксации (3а) и (4а) для любого временного интервала, которые затем и были использованы для построения вязкоупругой модели в программной среде SIMULIA Abaqus. Вместе с этим были заданы и другие параметры материала: коэффициент Пуассона $\nu = 0.2$, и модуль Юнга $E = 36200 \text{ MPa}$. Они были получены из лабораторных испытаний бетонных образцов в возрасте 28 дней. Кроме того, для 1-го тестового режима компьютерное моделирование проводилось в предположении уменьшения значения модуля Юнга до значения $E = 22201.18 \text{ MPa}$, определенного для однодневного бетона в соответствии с рекомендациями пункта 3.1.3. стандарта [7].

Таблица 2

Коэффициент ползучести $\varphi(t, t_0)$ и модули релаксации, полученные для 1 и 2 тестовых режимов

I SAMPLE			II SAMPLE		
AGE OF CONCRETE	CREEP COEFFICIENT (corrected in view of respect to temperature and type of cement)	MODULE $kr(t)$ and $gr(t)$	AGE OF CONCRETE	CREEP COEFFICIENT (corrected in view of respect to temperature and type of cement)	MODULE $kr(t)$ and $gr(t)$
t [days]	$\varphi(t, t_0)$	$\frac{1}{1+\varphi(t, t_0)}$	t [days]	$\varphi(t, t_0)$	$\frac{1}{1+\varphi(t, t_0)}$
1	0	1	28	0	1
2	0,5365	0,650829808	29	0,3147	0,760629801
3	0,6143	0,619463545	30	0,3326	0,750412727
4	0,6741	0,597335882	31	0,3486	0,741509714
5	0,7235	0,580214679	32	0,3629	0,733729547
6	0,766	0,566251416	33	0,3761	0,726691374
7	0,8036	0,554446662	34	0,3882	0,720357297
8	0,8374	0,544247306	35	0,3995	0,714540907
9	0,8683	0,535245946	36	0,4101	0,709169562
10	0,8968	0,527203712	37	0,4201	0,704175762
11	0,9233	0,519939687	38	0,4295	0,699545296
12	0,9481	0,513320671			
13	0,9714	0,507253728			

4. Результаты тестирования численной модели ползучести

В результате численных расчетов бетонных образцов в программной среде SIMULIA Abaqus были получены значения деформации ползучести во времени с использованием модели вязкоупругого материала. Эти значения деформации ползучести сравнивались с аналогичными значениями, измеренными в лабораторных испытаниях [5], а также с величинами деформации ползучести $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$, рассчитанными для этих образцов в соответствии с нормами [7] по формуле (6):

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \varphi(t, t_0) \quad (6)$$

где: t – рассматриваемый возраст бетона, $\varphi(t, t_0)$ – коэффициент ползучести, E_{ci} – модуль упругости бетона в возрасте 28 дней.

На рисунке 3 показаны значения деформации ползучести, полученные для оценки результатов численного моделирования бетонных образцов в

1-м тестовом режиме, в сравнении с результатами их лабораторных испытаний и с соответствующими нормативными значениями. Из сравнения графиков, представляющих зависимость деформации ползучести от времени, можно видеть, что величины деформации ползучести, полученные численно, заметно меньше, чем полученные в экспериментальных исследованиях. Здесь также очевидно, что значения модуля Юнга, принимаемые в численном моделировании, оказывают заметное влияние на полученные результаты. На рисунке 3 также показано, что представленные результаты численного моделирования выше соответствующих расчётных нормативных значений.

На рисунке 4 показаны зависимости деформации ползучести во времени, полученные для второго тестового режима (образца). Сравнение графиков показывает, что результаты численного моделирования деформаций ползучести дают более высокие значения, чем соответствующие значения, полученные в результате эксперимента.

При вычислении нормативных значений ситуация - численные значения деформации ползучести имеет место противоположная

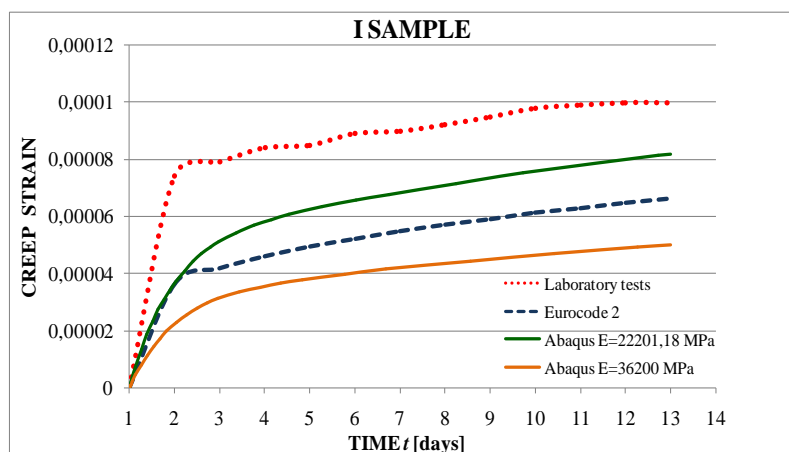


Рис. 3. Сравнение значений деформации ползучести в бетонных образцах для 1-го тестового режима.

зучести меньше её нормативных значений. Более того, глядя на графики, показанные на Рис. 4, можно сделать вывод, что деформации, вычисленные в соответствии с нормативными

требованиями и относящиеся к бетону в возрасте 28 дней, по сравнению с экспериментальными измерениями, соответствуют ожидаемым в [5].

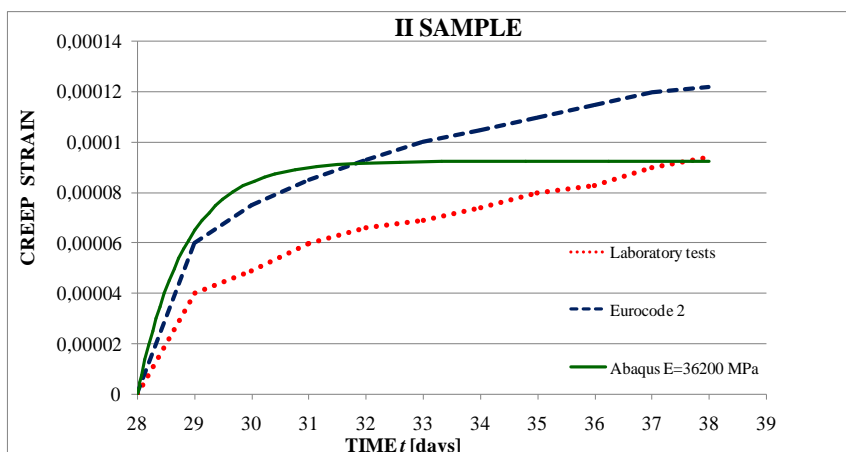


Рис. 4. Сравнение значений деформации ползучести в бетонных образцах для 2-го тестового режима.

Литература

1. Илюшин А.А. Труды. Т.3. Теория термовязкоупругости. Физматлит, 2007.
2. Харлаб В.Д. Принципиальные вопросы линейной теории ползучести (с привязкой к бетону), СПбГАСУ, СПб, 2014., 217 стр.
3. Bazant, Z.P. Scaling of Structural Strength. 2-nd updated ed., Elsevier, London, 2005.
4. Schiessel H., Metzler R., Blumen A., Nonnenmacher T.F. Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions, Journal of Physics A: Mathematical and General United Kingdom, 28, 1995, pp. 6567-6584.
5. Błyszko J. Porównawcza analiza pełzania twardniejącego betonu zwykłego oraz modyfikowanego zbrojeniem rozproszonym, Rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2015 (польский).
6. SIMULIA Abaqus. Time domain viscoelasticity. 19.7.1 Analysis User's Manual, 6.14 edition, 2014.
7. Eurokod 2, 2008. Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 1992-1-1:2008, PKN, Warszawa (польский).

References

32. Iljushin A.A. Trudy. Vol. 3. Teoria termovjaskouprugosti. Fizmatlit, 2007 (in russian).
33. Charlab V.D. Principialnyje voprosy linejnoj teorii polzutchesti. SPbGASU, 2014, 217 p. (in russian).
34. Bazant Z.P. Scaling of Structural Strength. 2-nd updated ed., Elsevier, London, 2005.

35. Schiessel, H., Metzler, R., Blumen, A., Nonnenmacher, T.F. Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions, *Journal of Physics A: Mathematical and General United Kingdom*, 28, 1995, pp. 6567-6584.
36. Błyszko J. Porównawcza analiza pełzania twardniejącego betonu zwykłego oraz modyfikowanego zbrojeniem rozproszonym, *Rozprawa doktorska*, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2015 (in polish).
37. SIMULIA Abaqus. Time domain viscoelasticity. 19.7.1 Analysis User's Manual, 6.14 edition, 2014.
38. Eurokod 2, 2008. Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 1992-1-1:2008, PKN, Warszawa (in polish).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУЛЛЕРЕНАМИ

Мария Михайловна Бузмакова

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
e-mail: mariya_nazarova@mail.ru

Аннотация

В работе предложена континуальная перколяционная модель структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами. Полимерная матрица представлена кубом с линейным размером L , в роли фуллеренов выступают непересекающиеся сферы с радиусом r , имеющие проницаемые оболочки шириной d , которые характеризуют межфазные области нанокompозита. Взаимодействие между фуллеренами пропорционально силам Ван дер Ваальса. Моделирование проводилось с использованием периодических граничных условий. Для равномерного распределения сфер в системе использовался эффективный алгоритм, разработанный автором, с использованием генератора случайных чисел «Вихрь Мерсенна». Для распределения сфер по кластерам использован модифицированный алгоритм Хошена-Копельмана. Поиск перколяционного кластера производился с помощью алгоритма Дейкстры. Порог перколяции соответствует концентрации сфер в кубе, при которой вероятность возникновения перколяционного кластера равна 50 %. Порог перколяции является критерием определения критической концентрации фуллеренов в полимере, при которой наноматериал улучшает или приобретает новые свойства. Основным результатом работы является зависимость порога перколяции от толщины проницаемой оболочки сферы. Кроме этого, получена взаимосвязь изменения свойств наноматериала от таких характеристик перколяционной системы как распределение сфер по кластерам, мощность перколяционного кластера.

Ключевые слова: полимерные нанокompозиты, эпоксидная смола, фуллерены, компьютерное моделирование

THE COMPUTER MODELING OF THE STRUCTURE OF THE EPOXY, MODIFIED BY THE FULLERENES

Mariya M. Buzmakova

The candidate of Physical and Mathematical Sciences,
The senior lecturer of department of the applied mathematics and informatics
Perm state university
Bukireva, 15, St. Perm 614990, Russian Federation
e-mail: mariya_nazarova@mail.ru

Abstract

For the investigation of the polymer nanocomposite's structure and properties the continuum percolation model of the epoxy, modified by fullerenes, is proposed in the present work. From the model the polymer is presented by the cube with linear size L and fullerenes are no crossed spheres with radius r . The spheres have the soft shells of the size d , which are presented the interfacial areas. The interaction between the fullerenes is characterized by the van der Waals' forces. The simulation is carried out with using periodic boundary conditions. For the uniform distribution of spheres in the percolation system an effective author's algorithm is used with the random number generator "Mersenne Twister". For the distribution spheres on the clusters the modified Hoshen-Kopelman's algorithm is used. The percolation cluster is searched with using Dijkstra's algorithm. The percolation threshold corresponds to the concentration of spheres in the cube at which the probability of the percolation cluster formation is equal to 50%. The percolation threshold corresponds to the critical concentration of fullerenes in the polymer, wherein the nanomaterial acquires or improves their properties. For the model the dependence of the percolation threshold from the soft shells' thickness is obtained. Besides, the behavior of the as characteristics of the percolation system as the clusters size distribution and the strength of the percolation cluster.

Key words: the polymer nanocomposite, the epoxy, the fullerene, the computer modeling

Введение

Полимерные нанокомпозиты заняли немаловажное место практически во всех отраслях промышленности в силу своих уникальных приобретаемых свойств с добавлением наномодификаторов. Производство таких наноматериалов представляет собой высокотехнологичную и трудоемкую отрасль, и возникает потребность в теоретическом изучении и прогнозировании свойств полимеров, модифицированных наночастицами. Для исследования структуры и свойств полимерных нанокомпозитов успешно используются методы компьютерного моделирования с применением теории перколяции и теории фракталов [1-4]. Установлено, что для таких наноматериалов характерно перколяционное поведение - пороговое изменение свойств с ростом концентрации нанонаполнителя. Основным вопросом в изучении структуры полимерного наноматериала является значение критической концентрации нанонаполнителя, при которой материал скачкообразно меняет или приобретает новые свойства. Существует разброс в экспериментальных исследованиях по значению критической концентрации. Также у исследователей разные данные по поведению наноматериала при дальнейшем увеличении концентрации наномодификаторов. Некоторые утверждают, что с ростом концентрации свойства продолжают улучшаться монотонно [1, 2]. Однако есть работы, в том числе и эксперимент автора настоящей работы, в которых показано, что свойства не только не улучшаются, но становятся прежним или даже ухудшаются с дальнейшим ростом концентрации наномодификатора в полимере [3-5]. В перколяционных моделях улучшение свойства материала классически связано с ростом вероятности возникновения перколяционного кластера, который, в свою очередь, растет с увеличением концентрации наночастиц. Следовательно, актуальным является вопрос о взаимосвязи изменения свойства материала и других характеристик перколяционной модели (не вероятности возникновения перколяционного кластера).

В настоящей работа предложена континуальная перколяционная модель структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами. В рамках модели изучена зависимость значения критической концентрации наномодификатора от величины межфазных областей и исследована взаимосвязь изменения свойств наноматериала и таких характеристик перколяционной модели, как распределение сфер по кластерам, мощность перколяционного кластера.

1. Постановка задачи

Перколяционная модель структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами, представлена кубом с линейным размером L , в котором случайным образом

равномерно распределены непересекающиеся сферы одинакового радиуса r , имеющие проницаемые оболочки шириной d . Куб – это полимерная матрица, сферы – фуллерены, проницаемые оболочки сфер – межфазные области. Взаимодействие между фуллеренами характеризуется силами Ван-дер-Ваальса

$$P_{bond} = \frac{U}{U_{max}}, \tag{1}$$

где U_{max} – это потенциал при расстоянии между фуллеренами, равным 0.154 нм.

Величина межфазных областей (толщина проницаемой оболочки) характеризуется способностью атома углерода фуллерена связаться с атомом азота эпоксидной смолы, при этом образуется простая связь C-N длиной 0.147 нм, что соответствует минимальному значению толщины межфазного слоя.

Математическая модель структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами, может быть описана следующим соотношением

$$M = \langle L, R_N, p, k, r, d, p_{bond} \rangle, \tag{2}$$

где L – линейный размер куба, $R_N = \{x_i, y_i, z_i\}$ – координаты i -ой сферы ($i = \overline{1, N}$; N – количество сфер), p – концентрация сфер, k – количество испытаний, r – радиус сферы, d – толщина проницаемой оболочки сферы, p_{bond} – вероятность связи между сферами.

Основной задачей моделирования является определение порога перколяции, такой концентрация сфер в кубе, при которой вероятность возникновения перколяционного кластера – кластера, пронизывающего всю систему, равна 50 %. Порог перколяции соответствует значению критической концентрации фуллеренов в полимере, при котором наноматериал приобретает или улучшает свои свойства. Кроме значения порога перколяции с помощью моделирования определяются такие характеристики как распределение кластеров по размерам, средний размер кластера и мощность перколяционного кластера, в качестве которой полагается вероятность того, что случайно выбранная сфера принадлежит перколяционному кластеру

$$P_{\infty}(p) = \frac{N_{\infty}}{N}, \tag{3}$$

где N_{∞} – количество сфер, принадлежащих перколяционному кластеру.

2. Методы моделирования

Для проведения вычислительного эксперимента по нахождению порога перколяции и других характеристик предложенной перколяционной модели структуры эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами была написана программа на языке C++. Для равномерного распределения сфер в кубе использовался эффективный алгоритм, разработанный автором [6]. Для генерации координат центров сфер был использован генератор случайных чисел «Вихрь Мерсенна» [7]. Для распределения сфер по кластерам реализован модифицированный алгоритм Хошена-Копельмана [8]. Поиск перколяционного кластера производился с помощью алгоритма Дейкстры [9]. При моделировании перколяционной системы были введены периодические граничные условия по всем направлениям.

Для каждого набора входных параметров модели проводится необходимое количество испытаний и выходными данными программы являются следующие результаты: значения вероятности возникновения перколяционного кластера, распределения кластеров по размерам, мощности перколяционного кластера для различных значений концентрации сфер в кубе. Все данные записываются в текстовых файлах, которые потом подлежат анализу в приложениях, позволяющих строить графики, проводить аппроксимацию данных и т.п.

3. Результаты и обсуждение

Результаты компьютерного моделирования получены для следующих входных параметров модели $L = 50$; $p = 0, \dots, 0.01$; $k = 100$; $r = 0.357$; $d = 0.147, 0.357, 0.714, \dots, 3.57$. На основании полученных значений вероятности возникновения перколяционного кластера были определены значения порогов перколяции при различных значениях толщины проницаемой оболочки по стандартной методике, применяемой в теории перколяции [10]. Основным результатом настоящей работы являются полученные значения порога перколяции для различных значений толщины проницаемой оболочки (смотреть рис. 1).

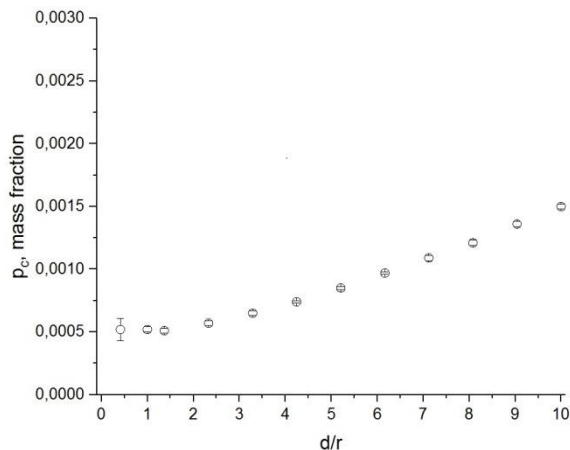


Рис. 1. Значения порога перколяции при различных значениях отношения проницаемой оболочки к радиусу сферы

При увеличении проницаемой оболочки (межфазного слоя) порог перколяции растет, то есть увеличение межфазных областей в наноматериале способствует увеличению значения концентрации фуллеренов в полимере, при которой материал приобретает улучшенные свойства.

Автором настоящей работы были получены экспериментально значения модуля Юнга при различных значениях концентрации фуллеренов в полимере [5]. Получено, что для толщины межфазного слоя, равному $6r$, наблюдается идентичное поведение роста модуля Юнга и изменения вероятности возникновения перколяционного кластера. При этом значении толщины межфазного слоя порог перколяции равен $p_c = 0.097 \pm 0.001$.

При дальнейшем увеличении концентрации фуллеренов в полимере модуль Юнга снижается вплоть до начального значения. Такое поведение свойства наноматериала связано с распределением кластеров по размерам для различных значений концентрации наполнителя. Распределение кластеров по размерам для нанокompозита ведет себя отличительно от распределения кластеров по размерам для микро- и макросистем: в наносистеме уже при малых концентрациях еще до порога перколяции кроме кластеров малого размера все время существует один большой кластер, хотя известно, что для микро- и макросистем до порога перколяции характерно только наличие множества маленьких кластеров. Таким образом, наночастицы обладают большей способностью к агрегации, чем обычные наполнители, и большое количество таких агрегатов в системе приводит к ухудшению свойств наноматериала, например, к увеличению хрупкости.

Значения мощности перколяционного кластера при различных значениях концентрации нанонаполнителя и при $d = 6r$ показано на рисунке 2, последние точки рассчитаны с большим интервалом по концентрации для экономии временных ресурсов. Видно, что

мощность перколяционного кластера стремительно возрастает в области порога перколяции и далее асимптотически стремится к 1. Поведение мощности перколяционного кластера для нано-, микро- и макросистем идентично.

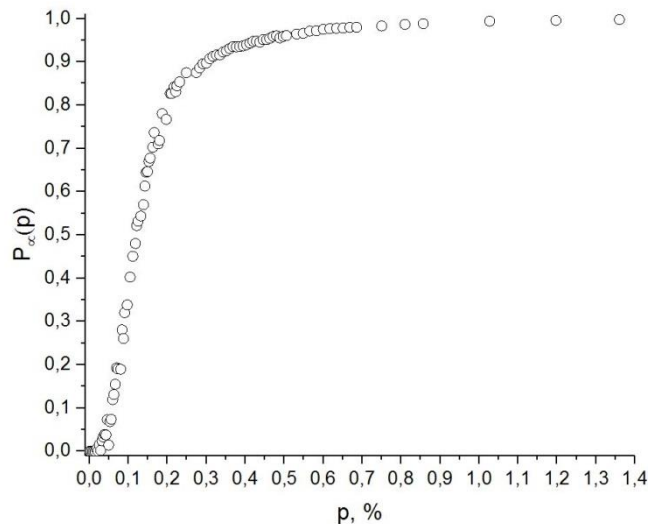


Рис. 2. Значения мощности перколяционного кластера при различных значениях концентрации сфер

Заключение

В настоящей работе было проведено компьютерное моделирование структуры и изменения свойств эпоксидной смолы в зависимости от количества наномодификатора – фуллеренов. Выявлено, что при увеличении концентрации нанонаполнителя свойства меняются немонотонно, сначала происходит улучшение свойств, далее при достижении определенного значения концентрации фуллеренов свойства начинают снова ухудшаться

вплоть до прежних значений. Ухудшение свойства связано с высокой способностью фуллеренов к агломерации, что подтверждает поведение распределения кластеров по размерам. При сопоставлении результатов численного и натурального эксперимента выявлено, что величина межфазного слоя в шесть раз превышает радиус фуллерена. Поведение мощности перколяционного кластера для нано-, микро- и макросистем идентично.

Дополнительная информация

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-31-00064, № 15-0107946, № 17-41-590649).

Литература

1. Домкин К. И., Спиридонов Н. А., Юрков Н. К. Моделирование проводимости полимерно-углеродных нанодисперсных композиций. URL: http://mgutupenza.ru/mni/content/files/2012_Domkin,%20Spiridonov,%20Urkov.pdf (дата обращения: 07.11.2017)
2. Выровой В. Н., Гергега А. Н. Ансамбль перколяционных кластеров фаз как основа самоподобной структуры композитов. *Вестник ДНАБА*. 2012. выпуск 1(93). С. 53-57.
3. Арбузов А. А. Влияние добавок фуллеренов и их производных на прочностные свойства эпоксидных композиций и поливинилового спирта. Автореферат на соискание ученой степени кандидата химических наук 02.00.04 – физическая химия; 02.00.06 – высокомолекулярные соединения, Черноголовка, 2011. – 27 с.
4. Зуев В. В., Иванова Ю. Г. Полимерные нанокompозиты на основе полиамида 6, модифицированного фуллероидными наполнителями. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2011. Т. 53, № 5. С. 733-738.
5. Бузмакова М. М., Гилев В. Г., Мерзляков А. Ф., Русаков С. В. Исследование изменения свойств эпоксидной смолы, модифицированной фуллеренами C_{60} . *Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы международного симпозиума*. 2017. С. 80-84.

6. Бузмакова М.М., Русаков С.В. Алгоритмы диспергирования частиц в неупорядоченной среде. *Фундаментальные исследования*. 2016. № 7-2. С. 213-217.
7. Matsumoto M. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations*. 1998. Vol. 8. P. 3-30.
8. Hoshen, J., Kopelman R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review B*. 1976. Vol. 14, No 8. P. 3438-3445.
9. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. Vol. 1, Iss. 1. P. 269-271.
10. Бузмакова М. М. Компьютерное моделирование континуальной перколяции сфер и эллипсоидов с проницаемыми оболочками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, Астрахань, 2013. – 168 с.

References

1. Domkin K. I., Spiridonov N. A., Yurkov N. K. Modelirovanie provodimosti polimerno-uglerodnykh nanodispersnykh kompozitsiy. URL: http://mgutupenza.ru/mni/content/files/2012_Domkin,%20Spiridonov,%20Urkov.pdf (data obrashcheniya: 07.11.2017)
2. Vyrovoy V. N., Gerega A. N. Ansambli' perkolyatsionnykh klasterov faz kak osnova samopodobnoy struktury kompozitov. *Vestnik DNABA*. (2012). № 1(93). S. 53-57.
3. Arbuzov A. A. Vliyaniye dobavok fullerenov i ikh proizvodnykh na prochnostnyye svoystva epoksiaminnykh kompozitsiy i polivinilovogo spirita. Avtoreferat na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata khimicheskikh nauk 02.00.04 – fizicheskaya khimiya; 02.00.06 – vysokomolekulyarnye soedineniya, Chernogolovka, (2011). – 27 s.
4. Zuev V. V., Ivanova Yu. G. Polimernye nanokompozity na osnove poliamida 6, modifitsirovannogo fulleroidnymi napolnitelyami. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*. 2011. T. 53, № 5. S. 733-738.
5. Buzmakova M. M., Gilev V. G., Merzlyakov A. F., Rusakov S. V. Issledovaniye izmeneniya svoystv epoksidnoy smoly, modifitsirovannoy fullerunami S₆₀. Neravnovesnyye protsessy v sploshnykh sre-dakh: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma. (2017). S. 80-84.
6. Buzmakova M.M., Rusakov S.V. Algoritmy dispergirovaniya chastits v neuporyadochennoy srede. *Fundamental'nye issledovaniya*. (2016). № 7-2. S. 213-217.
7. Matsumoto M. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations*. (1998). Vol. 8. P. 3-30.
8. Hoshen, J., Kopelman R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review B*. (1976). Vol. 14, No 8. P. 3438-3445.
9. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. (1959). Vol. 1, Iss. 1. P. 269-271.
10. Buzmakova M. M. Komp'yuternoye modelirovaniye kontinual'noy perkolyatsii sfer i ellipsoidov s pronitsaemymi obolochkami. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk 05.13.18 – matematicheskoye modelirovaniye, chislennyye metody i kompleksy programm, Astrakhan', (2013). – 168 s.

УДК 534

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В 2FSI ПОДСИСТЕМЕ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Бутымова Лилия Николаевна

инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614099, Пермь, Комсомольский проспект, 29
e-mail: liliya85@gmail.com

Модорский Владимир Яковлевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614099, Пермь, Комсомольский проспект, 29
e-mail: modorsky@mail.ru

Аннотация

В уплотнениях лабиринтного типа рабочая среда герметизируется за счет дросселирования ее при движении газа в осевом направлении через последовательно расположенные сужения и расширения. Однако чтобы обеспечить аэровиброустойчивость, необходимо учитывать процессы движения рабочей среды, протекающие в окружном направлении лабиринтного уплотнения (ЛУ) при вибрациях ротора. В публикациях, связанных с вибрационными процессами в ЛУ, обычно рассматривается влияние прецессии, геометрических характеристик ЛУ и не учитывается влияние газодинамических сил. В данной работе моделирование проводится с использованием программного продукта ANSYS, в трехмерной постановке. Показано взаимовлияние в 2FSI подсистеме ЛУ компрессора газоперекачивающего агрегата (ГПА). Проведен анализ работы газодинамических сил в ЛУ центробежных компрессоров ГПА. Получены временные зависимости работы, совершаемой газодинамической силой, возникающей в районе ЛУ. Обнаружена возможность возникновения резонансных колебательных режимов в ЛУ. Предлагается учитывать возможность возникновения резонанса в ЛУ при формировании программы набора скорости.

Ключевые слова: математическое моделирование, лабиринтные уплотнения, развертка ЛУ ГПА, геометрические характеристики, колебания ротора, лопаточная частота, резонансные режимы, работа газодинамических сил.

NUMERICAL MODELLING OF GAS DYNAMIC FORCE WORK IN 2 FSI SUBSYSTEMS OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR LABYRINTH SEALS

Liliia N. Butymova

engineer of Center of high-performance computing systems
Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolsky prospekt, Perm krai, Russian Federation, 614990
e-mail: liliya85@gmail.com

Vladimir Ya. Modorskii

the associate professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of mechanics of composite materials and structures
Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolsky prospekt, Perm krai, Russian Federation, 614990
e-mail: modorsky@mail.ru

Abstract

In labyrinth type seals working environment is sealed due to its throttling when gas is moving in axial direction through consecutive contractions and expansions. To ensure such aero-vibro-stability, however, the environmental processes occurring in labyrinth seal (LS) radial direction due to rotor vibrations should be taken into account. In publications related to vibration processes in LS the effects of precession and LS geometrical characteristics are usually considered, whereas the impact of gas dynamic force is not taken into account. In this paper simulation has been carried out using ANSYS software product in three-dimensional formulation. Interference of a FA compressor of

a gas compressor unit (GCA) in 2FSI subsystem is shown. Gas force performance in LS of GCA centrifugal compressors is analyzed. Time dependence of work caused by gas-dynamic force occurring in LS has been obtained. The possibility of resonant vibration mode formation in LS has been discovered. It is proposed that the possibility of resonance in LS should be considered in forming acceleration programs.

Key words: mathematical modelling, labyrinth seals ,GCA LS scan, geometrical characteristics, variations in rotor blade frequency (изменения частоты лопаточной части ротора - имеет смысл, но не соответствует русскому переводу), resonant modes, gas force work.

Важным фактором, влияющим на колебательные процессы в ЛУ центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата (ЦК ГПА) являются волны возмущений [5-6] в газодинамическом потоке в окружном направлении ЛУ [1]. При анализе причин возникновения опасных условий эксплуатации ЛУ, учитывались собственная частота газодинамической полости ЛУ, лопаточная и роторная частоты конструкции. Расчетная модель задачи подразумевает

возможность анализа отклика газодинамической полости ЛУ на различные компоненты спектра колебаний ротора, в т.ч. соответствующие лопаточным частотам [2-4]. В данной работе учитываются не все компоненты спектра. На данном этапе исследований проведены расчеты колебаний конструкции на роторной частоте. Твердотельная и сеточная модели представлены на рис.1.

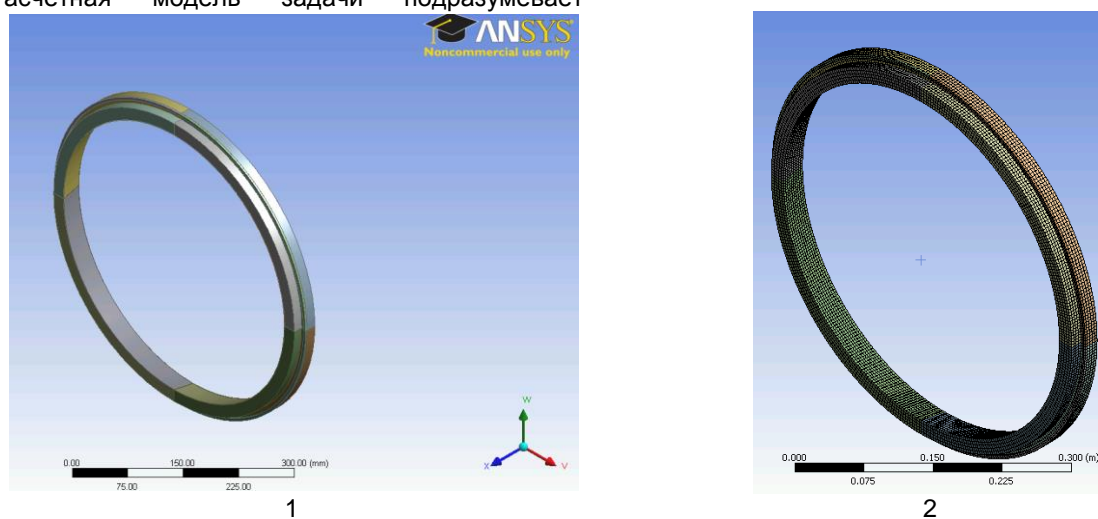


Рис. 1. Модель в 2FSI подсистеме ЛУ ГПА (2FSI постановка):

1 – твердотельная модель в 2FSI подсистеме ЛУ ГПА; 2 – сеточная модель в 2FSI подсистеме ЛУ ГПА

В качестве модели рассматривается деформируемое кольцо ЛУ и газодинамическая полость. К внутреннему диаметру газодинамической полости ЛУ прикладывается периодически изменяющаяся нагрузка, с определенными частотой и амплитудой. Таким образом, мы можем описать движение ротора в газодинамической полости ЛУ и определить меру газодинамической составляющей силы в "раскачку" ротора.

Моделирование проводится с использованием программного продукта ANSYS, в трехмерной постановке.

Расчет газодинамической силы проводился для поверхности соответствующей внутреннему диаметру ротора. Учитывалось изменение давления в газодинамической полости при

взаимодействии с кольцом ЛУ и ротором и ответной реакции на это взаимодействие в деформируемом кольце ЛУ.

В данной работе рассматриваются результаты влияния геометрических характеристик ЛУ на газодинамическую силу, возникающую в газодинамической зазоре ЛУ.

Обработка результатов вычислительных экспериментов, проведенных при изменении значений диаметра ротора в зоне ЛУ от 148 мм до 275 мм позволила построить зависимость амплитуды газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ от диаметра ротора(рис.2).

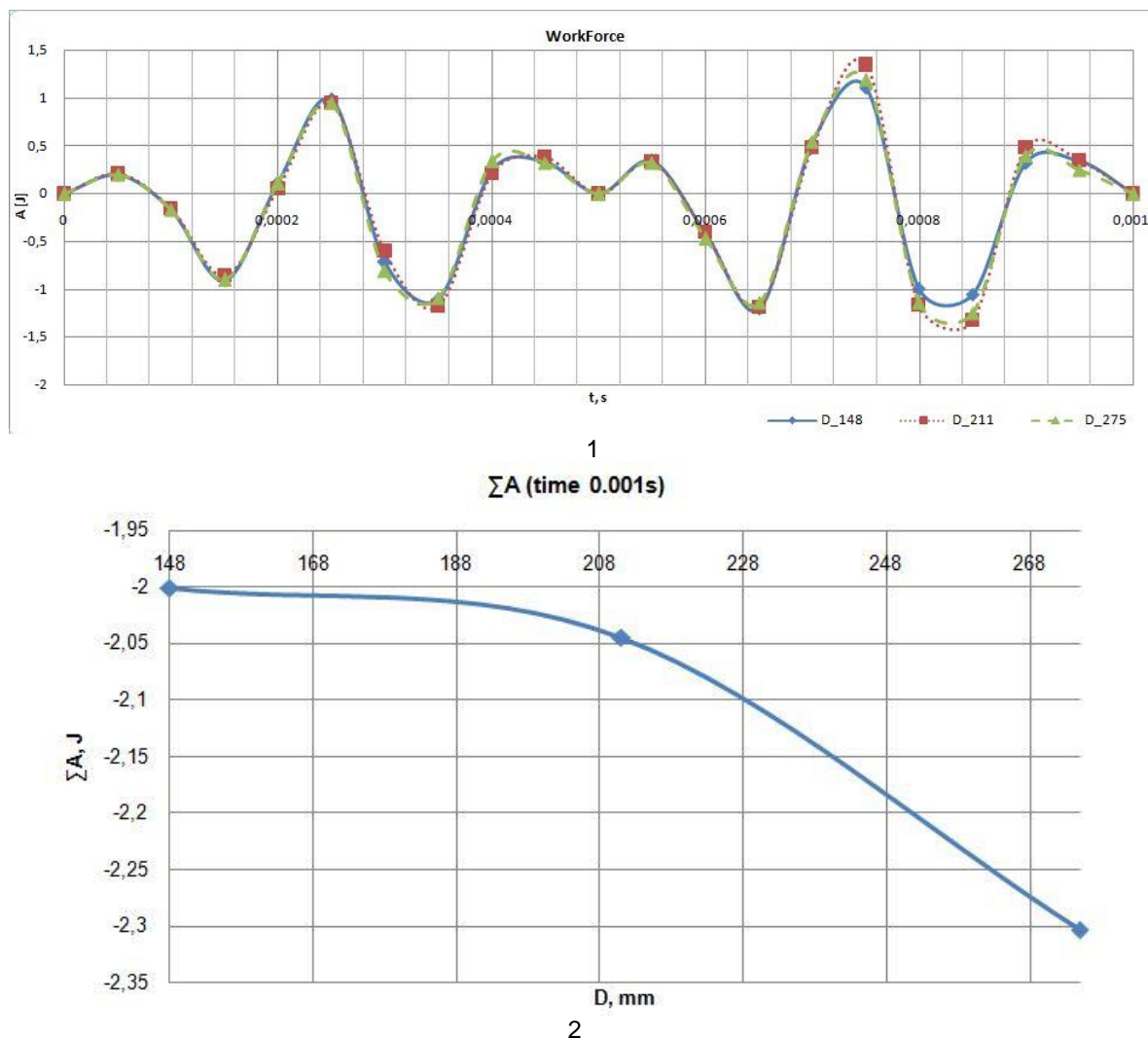


Рис. 2. Зависимость амплитуды газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ от диаметра ротора
 1 – зависимость газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ при различных значениях диаметра; 2 – зависимость газодинамической силы, действующей на ротор в зоне ЛУ при различных значениях диаметра на определенном временном интервале

При анализе влияния геометрических характеристик ЛУ выявлено, что при заданных условиях колебаний и диаметре ротора меньше 150 мм наблюдается переход значения работы газодинамической силы в отрицательную область, что соответствует "раскачке".

Обнаружено, что при равенстве собственной частоты газодинамического зазора ЛУ частоте ротора при диаметре 174 мм.

Анализ работы газодинамической силы выявил тенденцию увеличения газодинамической силы с уменьшением диаметра ротора в рассматриваемом диапазоне значений.

Получена временная зависимость работы, совершаемой газодинамической силой, возникающей в зазоре ЛУ (Таблица 1).
 еменном интервале.

С учетом взаимовлияния (2FSI) в подсистеме ЛУ ГПА ожидается, что при положительном значении работы имеет место усиление колебаний в районе ЛУ. Если работа

газодинамических сил меньше нуля, то вибрации в районе ЛУ затухают.

Таблица 1
 Зависимость работы газодинамических сил в ЛУ от геометрических характеристик ротора

N/ N	Диаметр ротора, мм	Частота газодинамической полости, Гц	Работа, совершаемая газодинамическими силами, Н*м
1.	148	710	-2,000599824
2.	211	498	-2,044509804
3.	275	382	-2,303799812

Работа рассчитывалась на определенном времени. Важен знак работы газодинамических сил, а ее величина не полностью отражает динамические эффекты процесса. Более представительным критерием оценки взаимовлияния газа и конструкции может являться импульс, учитывающий скорость процесса нагружения.

Обнаружено, что для исключения резонансных режимов в ЛУ, возникающих при изменении скорости вращения некоторых значениях среднего диаметра ЛУ необходимо реализовывать программу ротора при ступенчатого изменения скорости вращения [1].

Исследование выполнено в Центре коллективного пользования на базе Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Acknowledgements

The study was performed with a grant from the Russian Science Foundation (project №14-19-00877).

Литература

1. Бутымова Л.Н. Влияние вибраций на газодинамические процессы в лабиринтных уплотнениях центробежного модельного компрессора газоперекачивающего агрегата / Л.Н. Бутымова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 47. – С. 243-259.
2. Butymova, L.N. Modorskii, V. Ya., Petrov, V. Yu. (2016) Numerical modeling of interaction in the dynamic system "gas-structure" with harmonic motion of the piston in the variable section pipe. AIP Conference Proceedings, 1770, 030103-1-030103-5.
3. Mekhonoshina, E. V., Modorskii, V. Ya. (2016) Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units. AIP Conference Proceedings, 1770, 030113-1-030113-5.
4. Nishii Kazufumi, Furukawa Akinori, Watanabe Satoshi, Miyake Kunihiro (2010) Experimental Study on Leakage Flow in Labyrinth Seals with Asymmetric Geometries. AIP Conference Proceedings, 1225 (1), 91.
5. Дзева И.Ю. Математическое моделирование работы бесконтактного пальчикового уплотнения турбомшины: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015.
6. Vedeneev, A.V. Guvernyuk S., Zubkov A., Kolotnikov M. (2010) Experimental investigation of single-mode panel flutter in supersonic gas flow. Fluid Dynamics, 45(2), 312.

References

1. Butymova, L.N. (2016) Vliyaniye vibratsiy na gazodinamicheskiye protsessy v labirintnykh uplotneniyyakh tsentrobezhnogo model'nogo kompressora gazoperekachivayushchego agregata (Vibration effect on gasdynamic processes in the labyrinth seals of model centrifugal compressor of gas-compressor unit). Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, 47, 243-259.
2. Butymova, L.N. Modorskii, V. Ya., Petrov, V. Yu. (2016) Numerical modeling of interaction in the dynamic system "gas-structure" with harmonic motion of the piston in the variable section pipe. AIP Conference Proceedings, 1770, 030103-1-030103-5.
3. Mekhonoshina, E. V., Modorskii, V. Ya. (2016) Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units. AIP Conference Proceedings, 1770, 030113-1-030113-5.
4. Nishii Kazufumi, Furukawa Akinori, Watanabe Satoshi, Miyake Kunihiro (2010) Experimental Study on Leakage Flow in Labyrinth Seals with Asymmetric Geometries. AIP Conference Proceedings, 1225 (1), 91.
5. Dzeva, I. Yu. (2015) Matematicheskoye modelirovaniye raboty beskontaktnogo pal'chikovogo uplotneniya turbomashiny (Mathematical modeling of the operation of a non-contact finger seal of a turbomachine): dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow
6. Vedeneev, A.V. Guvernyuk S., Zubkov A., Kolotnikov M. (2010) Experimental investigation of single-mode panel flutter in supersonic gas flow. Fluid Dynamics, 45(2), 312.

УДК 004.942; 51-7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА И ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РАБОТЕ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕСВЯЗАННЫХ И СВЯЗАННОЙ BFSI ПОСТАНОВКАХ

Евгения Викторовна Мехоношина

инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 15
e-mail: mevpstu@gmail.com

Владимир Яковлевич Модорский

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 15
e-mail: modorsky@pstu.ru

Аннотация

Вибрации роторов компрессоров газоперекачивающих агрегатов на сегодняшний день не поддаются надежному прогнозированию. В настоящей работе, в ходе вычислительных экспериментов, моделируются колебательные режимы в рабочих колесах ротора центробежного компрессора, с учетом взаимовлияния в системе «газодинамический поток – ротор компрессора в опорах жесткого типа». Проведено сравнение с результатами, полученными в классических постановках: нестационарная газодинамика, нестационарный расчет по оценке компонент напряженно-деформированного состояния (НДС). Расчеты проведены с использованием системы инженерного анализа ANSYS 15.0. В качестве методов исследования использованы метод конечных объемов для газодинамики и метод конечных элементов для оценки компонент НДС.

С использованием программного обеспечения PowerGraph выполнен спектральный анализ полученных зависимостей. Получены АЧХ и ФЧХ колебаний давления и перемещений, полученных в аэроупругой (BFSI) и несвязанных нестационарных постановках. Обнаружено, что значения амплитуд колебаний газа и конструкции в постановке BFSI выше. BFSI расчет позволяет выявить резонансные явления в системе "газодинамический поток – ротор компрессора в опорах жесткого типа". Получены поля распределения давления и перемещений конструкции. Результаты, полученные при расчете параметров газодинамического потока и компонент НДС конструкции в постановке BFSI отличаются от результатов, полученных в несвязанных постановках. Таким образом, для оценки срывных зон и вибраций ротора компрессора рекомендуется рассматривать постановку BFSI.

Ключевые слова: аэроупругость, BFSI расчет, ANSYS, вибрации, компрессор, газоперекачивающий агрегат, численные методы, колебания

GAS FLOW NUMERICAL MODELING AND STRUCTURE DEFORMATION IN OPERATION OF THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE IN NONSTATIONARY UNBOUND AND BOUND BFSI FORMULATIONS

Evgeniia V. Mekhonoshina

engineer in the High-performance Computer Systems Centre
Perm National Research University
Akademika Koroleva, 15, Perm 614013, Russian Federation
e-mail: mevpstu@gmail.com

Vladimir Ja. Modorskiy

the associate professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of mechanics of composite materials and structures
Perm National Research University
Akademika Koroleva, 15, Perm 614013, Russian Federation
e-mail: modorsky@pstu.ru

Abstract

Vibration of compressor rotors of gas transmittal units to date cannot be reliably predicted. In the present work in the course of computational experiments, oscillatory modes in the rotor impellers of the centrifugal compressor are modeled taking into account mutual influence in the system "gas dynamic flow – compressor rotor in rigid type supports". Comparison with the results obtained in classical formulations is made: nonstationary gas dynamics, nonstationary calculation for evaluating stress-strain components (SSS). The calculations are carried out using the ANSYS 15.0 engineering analysis system. Finite volume method for gas dynamics and finite element method for estimating SSS components are used.

Spectral analysis of the obtained dependences is performed with the use of PowerGraph software. The amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of pressure and displacement oscillations in aeroelastic (BFSI) and unbound nonstationary formulations are obtained. It is found that oscillation amplitude values of the gas and the structure in the BFSI setting are higher. BFSI calculation allows to identify resonant phenomena in the system "gas dynamic flow - compressor rotor in rigid type supports". Distribution fields of pressure and displacement of the structure are obtained. The results obtained in calculating the gas-dynamic flow parameters and the SSS components in BFSI formulation differ from the results obtained in unbound formulations. Thus, to evaluate separated-flow regions and compressor rotor vibrations, it is recommended to consider BFSI formulation.

Keywords: aeroelasticity, BFSI calculation, ANSYS, vibration, compressor, gas transmittal unit, numerical methods, oscillations.

Введение

В настоящее время является актуальной проблема снижения вибраций при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА), т.к. она тесно связана с надежностью функционирования ГПА, вопросами обеспечения безопасности труда обслуживающего персонала, высокими материальными и временными затратами на ее устранение.

Современная тенденция к росту нагруженности конструкции, а также к снижению ее материалоемкости и жесткости приводит к увеличению вероятности возникновения аэроупругих колебательных процессов [1, 2, 3, 4]. Такие процессы ведут к повышенным вибрациям на валу. Эта проблема является общей для турбомашиностроения.

Общепринято в качестве факторов, оказывающих влияние на вибрации турбомашин, рассматривать дисбалансы, возникающие при изготовлении и сборке конструкции [5], геометрию проточной части [6].

В настоящее время существующие методики расчета компрессоров ГПА не учитывают аэроупругих эффектов. Так, расчет критических скоростей вращения проводится для "изолированного" ротора и базируется на применении аналитических методов, реже – численных, причем в рамках только теории упругости; а расчет напорной характеристики – только для газодинамического домена. При этом вибрационные процессы в турбомашине возникают непрогнозируемо [1, 10–12].

В качестве новых факторов предлагается рассматривать аэроупругие эффекты на лопатках компрессора и в лабиринтных уплотнениях в составе ротора [7, 8, 9]. Ранее в работах [1, 6–8] было приведено сравнение аэроупругих колебаний и колебаний, рассчитанных в «классической» нестационарной постановке как по амплитуде, так и начальной фазе. Обнаружено расхождение по частоте колебаний на некоторых скоростях вращения ротора. Это подтверждает

необходимость проведения исследований центробежных компрессоров ГПА в аэроупругой постановке.

1. Объект исследования

В данной статье авторы изучают особенности аэроупругих процессов в рабочем колесе центробежного компрессора с расходом 445 кг/с [11].

Объектом исследования являются колебательные процессы в газодинамическом тракте и элементах конструкции ротора модельной ступени компрессора.

В данной работе в качестве инструмента численного моделирования в работе использована система инженерного анализа ANSYS. Расчеты проведены с использованием мощностей Центра коллективного пользования на базе Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИГУ.

2. Методы и математическая модель

Решение междисциплинарной задачи выполняется в рамках метода конечных объемов (для расчетов газодинамики) и метода конечных элементов (для оценки компонент напряженно-деформированного состояния (НДС)). При этом реализуется схема двунаправленного BFSI (bidirectional Fluid Structure Interaction) расчета в ANSYS, представленная в [12]. Решение отыскивается итерационным способом. Два решателя – Transient Structural (нестационарная механика, метод конечного элемента) и CFX Transient (газодинамика, метод конечного объема) объединены передачей данных. Рассчитанные параметры газодинамического потока являются исходными данными для расчета граничных условий задачи об оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции. В свою очередь рассчитанные параметры НДС являются основой для описания граничных условий газодинамики. При этом

подготовка решателя BFSI осуществляется в два этапа:

1-й этап – подготовка подмодели конструкции в решателе НДС Transient Structural;

2-й этап – подготовка подмодели газодинамического тракта в решателе CFX Transient.

В качестве системы связи через общую сетку на границах между доменами использован интерфейс Transient Rotor Stator – между доменами рабочего колеса и выходного аппарата [13].

Математическая модель включает в себя две подмодели. Подмодель газодинамики базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии, уравнении состояния совершенного сжимаемого газа и замыкается начальными и граничными условиями. Математическая подмодель для оценки НДС описана в [14, 15].

3. Расчет центробежного компрессора

3.1. Физическая модель

В газодинамической подмодели рассмотрен ротор, вращающийся с постоянной угловой скоростью. Рассматривается течение нереагирующего совершенного газа, поток однофазный. В расчете по оценке компонент динамического НДС рассматривается ротор в сборе, включая вал, рабочее колесо и опоры жесткого типа. Производится учет технологических дисбалансов участков вала. Эксцентриситет моделируется эквивалентным грузиком [16]. Расчеты проведены с учетом гравитации. Стенки конструкции адиабатические, шероховатые. Производится учет взаимовлияния газодинамического потока и деформируемого ротора.

3.2. Граничные условия подмодели газодинамического тракта в решателе CFX Transient и подмодели ротора в решателе НДС Transient Structural

Трехмерная расчетная подмодель газодинамики (BFSI) представлена на рис. 1. При нестационарном расчете по оценке газодинамических параметров (НГ) поверхности 3–6 (рис.1) представляют собой неподвижные стенки.

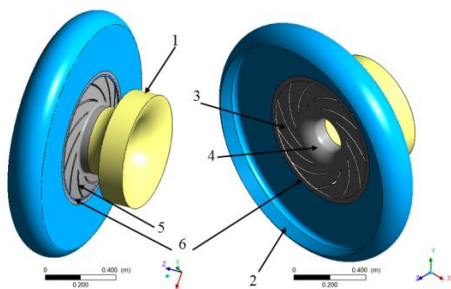


Рис.1. Расчетная схема газодинамики компрессора: 1 – вход; 2 – выход; 3 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на трех поверхностях каждой из

лопаток); 4 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на поверхности покрывного диска и втулочного обвода); 5 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на поверхности покрывного диска); 6 – интерфейс «газ-конструкция» (реализуется на торцах покрывных дисков и лопаток).

Трехмерная расчетная подмодель по оценке компонент НДС (BFSI) представлена на рис. 2. При нестационарном расчете по оценке компонент НДС (ННДС) на поверхность 4 (рис.2а) приложено постоянное давление $P=7,96$ МПа; на поверхность 5 (рис.2а) – $P=7,407$ МПа; на поверхность 6 (рис.2а) – $P=7,323$ МПа; на поверхность 1 (рис.2б) – $P=7,233$ МПа.

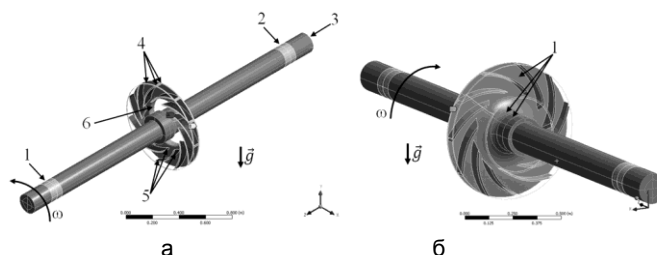


Рис.2. Расчетная схема по оценке компонент НДС компрессора: а – показано без переднего диска (1 и 2 – опоры жесткого типа; 3 – запрет перемещений по нормали к поверхности (трансмиссия); 4 – интерфейс «конструкция – газ» на торцах покрывных дисков и лопаток; 5 – интерфейс «конструкция – газ» на поверхностях лопаток; б – интерфейс «конструкция – газ» в области внешнего обвода); б – показано без заднего диска (1 – интерфейс «конструкция – газ» в области втулочного обвода).

4. Результаты исследования

В ходе исследования получены зависимости амплитуд и частот колебаний ротора и газодинамического потока в контрольных точках (рис.3), поля газодинамических давлений в КТ2 и перемещений конструкции в КТ1.

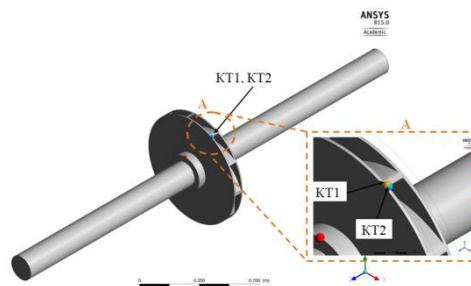


Рис. 3. Расположение контрольных точек: КТ1 – на роторе, КТ2 – в области газа (показано без входного и выходного аппаратов)

На рис.4а представлены зависимости полного давления в КТ3 в BFSI постановке и в НГ. На рис.4б представлены зависимости полных перемещений в КТ2 в BFSI постановке и в ННДС. Черным показаны результаты в постановке BFSI.

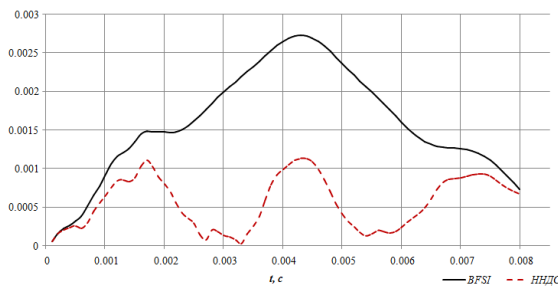
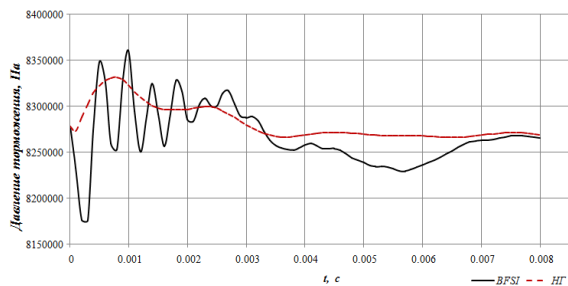


Рис. 4. Зависимости от времени: а – давления торможения в КТ2; б – перемещений в КТ1

С использованием ПО PowerGraph был проведен спектральный анализ полученных сигналов методом быстрого преобразования Фурье. По результатам спектрального анализа получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ). Результаты АЧХ сведены в табл.1. Результаты BFSI и НГ сведены в один график на рис. 5 (ФЧХ BFSI – черный, ФЧХ НГ – красный). Результаты BFSI и HНДС сведены в один график на рис. 6 (ФЧХ BFSI – черный, ФЧХ HНДС – красный).

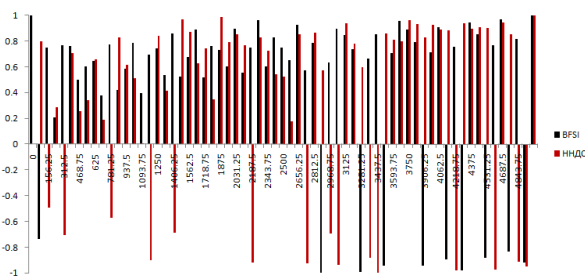


Рис. 6. Совмещенная ФЧХ перемещений (для BFSI и HНДС)

АЧХ

Таблица 1

№ п.п.	ν, Гц	Амплитуда колебаний перемещений, *10 ⁻⁵ м		Амплитуда колебаний давлений, Па	
		BFSI	HНДС	BFSI	HГ
1	0	1,215	0,422	10803,9	9177,8
2	78,12	36,578	5,099	18773	18729
3	156,25	57,772	5,345	17732	7007
4	234,38	11,262	3,389	7135	6475
5	312,5	14,112	23,077	4422	2264
6	390,62	16,144	25,634	3455	2894
7	468,75	9,38	8,371	3300	3424
8	546,88	12,968	1,193	7631	4569
9	625	5,21	4,584	5648	4034
10	703,12	8,752	3,567	4326	2091
11	937,5	6,916	1,675	5037	2002
12	2187,5	3,052	0,601	8011	675

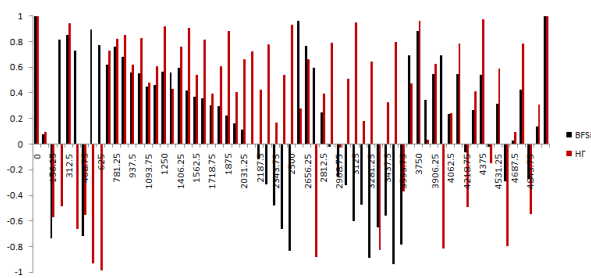


Рис. 5. Совмещенная ФЧХ колебаний давления торможения (для BFSI и HГ)

Рассмотрим результаты спектрального анализа в газодинамической полости. Максимальные значения амплитуд колебаний давления торможения в КТ2 в обеих постановках (BFSI и HГ) проявляются на одинаковых частотах (в данном случае №1–3, 8). Наблюдается сдвиг фаз между колебаниями, рассчитанными в BFSI и HГ (рис. 5).

Рассмотрим результаты спектрального анализа для конструкции. Максимальные амплитуды колебаний перемещений в КТ1 в различных постановках (BFSI и HНДС) проявляются на разных частотах. Так, в постановке BFSI это частоты №2, 3 и 6; а в постановке HНДС – 5-7. Наблюдается сдвиг фаз между колебаниями, рассчитанными в BFSI и HНДС (рис. 6).

Значения амплитуд колебаний газа и конструкции в постановке BFSI выше.

Таким образом, BFSI расчет позволяет выявить резонансные явления в системе "газодинамический поток – ротор компрессора в опорах жесткого типа". Раздельные расчеты HГ и HНДС могут не выявить совпадения колебаний в газе и конструкции.

На рис.7 показаны вычисленные распределения статического давления в момент времени t=0.0005 с, когда разница между BFSI (рис. 7а) и расчетом параметров газа без FSI (рис. 7б) наиболее отличны.

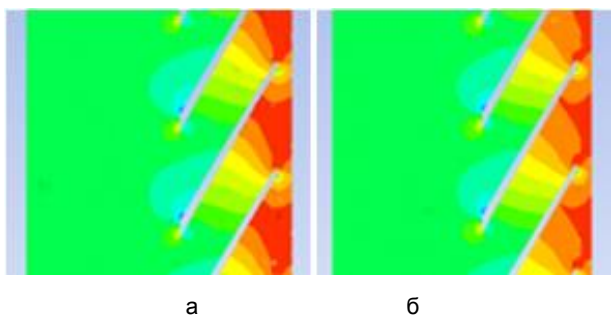


Рис. 7. Увеличенные фрагменты распределения статического давления в момент времени $t=0,0005$: а – в постановке BFSI; б – в расчете НГ

Из рис. 7 видно, что в постановке BFSI зона максимального давления шире, чем в расчете без учета FSI. Таким образом, при оценке срывных зон рекомендуется рассматривать постановку BFSI.

На рис. 8 представлены поля перемещений участка вала и рабочего колеса в постановках BFSI и ННДС для различных моментов времени. Зона максимумов в постановке BFSI выше, также наблюдается различный характер деформирования конструкции в постановках BFSI и ННДС.

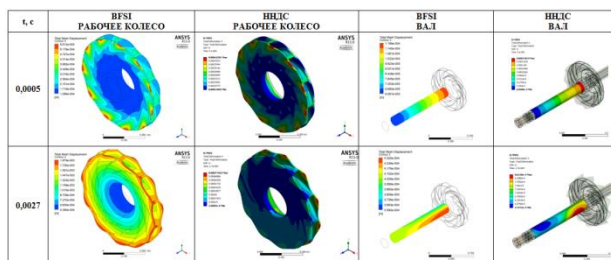


Рис. 8 Поля перемещений участка вала и рабочего колеса в постановках BFSI и ННДС для различных моментов времени

Результаты, полученные при расчете параметров газодинамического потока и компонент НДС конструкции в постановке BFSI отличаются от результатов, полученных в несвязанных постановках. Это свидетельствует о том, что характер течения потока и вибрации ротора зависят от взаимовлияния "в системе" "газ–конструкция". Такое взаимовлияние может являться еще одним источником возникновения вибраций ротора центробежного компрессора.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Acknowledgements

The study was performed with a grant from the Russian Science Foundation (project №14-19-00877).

Литература

1. Модорский В.Я. Газоупругие процессы в энергетических установках / В.Я Модорский, Ю.В Соколкин – Москва: Наука, 2007. – 176 с.
2. Kalyulin S.L., Modorskii V.Ya., Paduchev, A.P. Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel. // AIP Conference Proceedings, 2016, No.1770, pp.030110-1-030110-4.
3. Sayed M.A., Lutz T., Kramer E. Aero-elastic Analysis and Classical Flutter of a Multi-Megawatt slender bladed horizontal-axis wind turbine. // 2nd International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, 2016, pp.617–626.
4. Модорский В.Я. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц. Исследование актуальных проблем механики и машиностроения / М.Ж. Ажолов, П.М. Алабужев, А.В. Алиев, Л.М. Артищева, Л.Г. Бойко, Н.Л. Горский, Ю.А. Гришин, И.М. Давыдова, М.Ю. Егоров, И.Х. Еникеев, В.М. Кельберг, В.А. Комочков, В.В. Кондрашев, П.И. Косовцев, В.А. Котельников, А.Е. Котин, М.Г. Круглов, А.М. Липанов, В.И. Макаров, О.Г. Маслова, В.Я. Модорский и др. – Москва: Национальная Академия прикладных наук, Международная ассоциация разработчиков и пользователей метода крупных частиц, 1995. –Том 5. – 1658 С.
5. Белобородов С.М. Имитационные методы коррекции дисбаланса. // Компрессорная техника и пневматика, 2009, №8. – С. 35-37.
6. Арбузов И.А., Ташкинов А.А., Щенятский Д.В., Кириевский Б.Е., Бульбович Р.В., Модорский В.Я., Писарев П.В. Анализ влияния конструкции входа в соединительный канал на колебательные процессы в первой ступени модельного двухступенчатого насоса. // Научно-технический вестник Поволжья, 2012, № 6. – С. 108-111.
7. Бутымова Л.Н. Влияние вибраций на газодинамические процессы в лабиринтных уплотнениях ГПА. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника? 2016, №47. – С. 243-259.
8. Butymova L.N., Modorskii V.Ya., Petrov V. Yu. Numerical modeling of interaction in the dynamic system "gas-structure" with harmonic motion of the piston in the variable section pipe. // AIP Conference Proceedings, 2016, No.1770, pp. 030103-1-030103-1-5.

9. Shmakov A. F., Modorskii V.Ya. Numerical simulation of gas-dynamic, thermal processes and evaluation of the stress-strain state in the modeling compressor of the gas-distributing unit. // AIP Conference Proceedings, 2016, No.1770, pp. 030108-1-030108-5.
10. Копысов С.П., Тонков Л.Е., Чернова А.А. Двухстороннее связывание при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой пластины. Сравнение численных схем и результатов эксперимента. // Вычисл. мех. сплош. сред, 2013, Т. 6 (№ 1). – С. 78-85.
11. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya. Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units. // AIP Conference Proceedings, 2016, No. 1770, pp. 030113-1-030113-5.
12. Jianping Z., Liang G., Helen W., Aixi Zh., Danmei H., Jianxing R. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction. // Ocean Engineering, 2014, №84, pp.14-19.
13. Измайлов Р.А., Лопуллан Х.Д., Норимарна Г.С. Численное моделирование нестационарного течения в ступени центробежного компрессора. // Компрессорная техника и пневматика, 2011, № 5, С. 10-15.
14. ANSYS Structural Analysis Guide, Release 15.0 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/Accessed> (дата обращения 15.01.2016).
15. Wang E., Nelson T. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS, 2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://easc.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resource library/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-200.PDF> Accessed (дата обращения 30.03.2015).
16. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya., Petrov V.Yu. Influence of Kinematic, Physical and Mechanical Structure Parameters on Aeroelastic GTU Shaft Vibrations in Magnetic Bearings. // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 2016, №10, pp. 613-622.

References

1. Modorskii, V.Ya., Sokolkin, Yu.V. (2007). *Gazouprugie protsessy v energeticheskikh ustanovkakh*. Moscow, Nauka, 176 p.
2. Kalyulin, S.L., Modorskii, V.Ya., Paduchev, A.P. (2016). Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel. AIP Conference Proceedings, 1770, 030110-1-030110-4.
3. Sayed, M.A., Lutz, T., Kramer, E. (2016). Aero-elastic Analysis and Classical Flutter of a Multi-Megawatt slender bladed horizontal-axis wind turbine, Proc. 2nd International Conference on Renewable Energies Offshore. Lisbon, 617–626.
4. Akzholov, M.Zh., Alabuzhev, P.M., Aliev, A.V., Artishcheva, L.M., Boyko, L.G., Gorskiy, N.L., Grishin, Yu.A., Davydova, I.M., Egorov, M.Yu., Enikeev, I.Kh., Kel'berg, V.M., Komochkov, V.A., Kondrashev, V.V., Kosovtsev, P.I., Kotel'nikov, V.A., Kotin, A.E., Kruglov, M.G., Lipanov, A.M., Makarov, V.I., Maslova, O.G., Modorskiyi, V.Ya. et al. (1995). *Chislennoe issledovanie aktual'nykh problem mashinostroeniya i mekhaniki sploshnykh i sypuchikh sred metodom krupnykh chastits. Issledovanie aktual'nykh problem mekhaniki i mashinostroeniya. (Numerical study of actual problems of mechanical engineering and mechanics of solid and bulk materials with the large particles method. National Academy of Applied Sciences, the International Association of developers and users of the method of large particles)*. Moscow, Natsional'naya Akademiya prikladnykh nauk, Mezhdunarodnaya assotsiatsiya razrabotchikov i pol'zovateley metoda krupnykh chastits, 1658 p.
5. Beloborodov, S.M. (2009). Imitatsionnye metody korrektsii disbalansa. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 8, 35-37.
6. Arbutov, I.A., Tashkinov, A.A., Shchenyatskiy, D.V., Kirievskiy, B.E., Bul'bovich, R.V., Modorskiy, V.Ya., Pisarev, P.V. (2012). Analiz vliyaniya konstruksii vkhoda v soedinitel'nyy kanal na kolebatel'nye protsessy v pervoy stupeni model'nogo dvukhstupenchatogo nasosa. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 6, 108-111.
7. Butymova, L.N. (2016). Vliyaniye vibratsiy na gazodinamicheskie protsessy v labirintnykh uplotneniyakh GPA. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 47, 243-259.
8. Butymova, L.N., Modorskii, V.Ya., Petrov, V. Yu. (2016). Numerical modeling of interaction in the dynamic system “gas-structure” with harmonic motion of the piston in the variable section pipe. AIP Conference Proceedings, 1770, 030103-1-030103-1-5.
9. Shmakov, A. F., Modorskii, V.Ya. (2016). Numerical simulation of gas-dynamic, thermal processes and evaluation of the stress-strain state in the modeling compressor of the gas-distributing unit. AIP Conference Proceedings, 1770, 030108-1-030108-5.
10. Kopysov, S.P., Tonkov, L.E., Chernova, A.A. (2013). Dvukhstoronnee svyazyvanie pri modelirovanii vzaimodeystviya sverkhzvukovogo potoka i deformiruemoy plastiny. *Sravnienie chislennykh skhem i rezul'tatov eksperimenta. Vychisl. mekh. splosh. sred*, 6(1), 78-85.
11. Mekhonoshina, E.V., Modorskii, V.Ya. (2016). Impact of magnetic suspension stiffness on aeroelastic compressor rotor vibrations of gas pumping units. AIP Conference Proceedings, 1770, 030113-1-030113-5.
12. Jianping, Z., Liang, G., Helen, W., Aixi, Zh., Danmei, H., Jianxing, R. (2014). The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction. *Ocean Engineering*, 84, 14-19.
13. Izmaylov, R.A., Lopullan, Kh.D., Norimarna, G.S. (2011). Chislennoe modelirovanie nestatsionarnogo techeniya v stupeni tsentrobezhnogo kompressora. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 5, 10-15.
14. ANSYS Structural Analysis Guide, Release 15.0. URL link: <http://www.ansys.com/Accessed> (seen on 15.01.2016).
15. Wang, E., Nelson, T. (2002). Structural Dynamic Capabilities of ANSYS. URL link : <http://easc.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resource library/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-200.PDF> Accessed (seen on 30.03.2015).

16. Mekhonoshina, E.V., Modorskii, V.Ya., Petrov, V.Yu. (2016). Influence of Kinematic, Physical and Mechanical Structure Parameters on Aeroelastic GTU Shaft Vibrations in Magnetic Bearings. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 10, 613-622.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

www.morintex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – 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

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).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

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 9000 рублей по выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала

"МОРСКИЕ 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**