

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010
1001000111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
11011100110010011100100100100110010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
0000111010001110010010010011001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
110011000110010011001001100100110101010100001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001000111001101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU



№ 3 (45) Т.3 2019



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111010010100110110101011000101101010110100100111010101 101001
1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

С.П. Столяров, к.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

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

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

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

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

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

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

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

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

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

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

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

190121, Russian Federation

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



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

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

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

С Юбилеем!

Редакция журнала
«Морские интеллектуальные технологии»





51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ		стр
О журнале.....		9
К 70-летию Александра Исааковича Фрумена		11
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА		
Великанов Н.Л., Корягин С.И., Шарков О.В. Определение остаточных напряжений в судовых конструкциях с сваренными жесткими элементами.....		12
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА		
Алсаид Мазен, Саламех Али Исследование прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при растяжении.....		18
Барышников С.О., Сухотерин М.В. Анализ строительства морских пассажирских судов на подводных крыльях.....		28
Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Напряженное состояние полимерных покрытий, примененных при ремонте судовых корпусных конструкций.....		37
Давыдов Е.В., Фомин Е.В., Фомин А.В. Совершенствование технологии финишной сборки нижнего редуктора движительно-рулевых колонок.....		43
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)		
Ватолин Д.С. Применение усиленного цикла Миллера в судовых ДВС.....		49
Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Методика проектирования ступеней осевых микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат.....		54
Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Оптимизация энергетической эффективности ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат.....		59
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением.....		64
Гнеденков А.С., Синебрюхов С.Л., Машталаяр Д.В., Вялый И.Е., Егоркин В.С., Минаев А.Н., Гнеденков С.В. Эффективная защита сварного соединения алюминиевого сплава 1579 от локального коррозионного разрушения.....		71
Матвеев В.Т., Дологлонян А.В., Очеретяный В.А. Замкнутые газотурбинные установки для пропульсивных комплексов подводной техники.....		77
Ибрагимов Д.И., Макаров Д.А., Поршкевич В.В., Камаев Н.А., Шилов А.М. Методика экспериментального определения электрического КПД индукторного тормоза.....		83
Синявский Н.Я., Корнева И.П., Кострикова Н.А. Применение инверсии интегрального преобразования в ультрафиолетовой-видимой абсорбционной спектроскопии для анализа судовых топлив и масел.....		89
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ		
Роенко В.В., Ищенко А.Д., Малыгин И.Г., Ложкин В.Н. Энергоэффективная экологически безопасная технология борьбы с обледенением кораблей.....		94
Мартынов В.Л., Голосной А.С., Красильников Р.В., Никитин Н.В. Перспективы использования лазерных технологий в морской робототехнике для арктического региона.....		101
Мартынов В.Л., Голосной А.С., Божук Н.М., Никитин Н.В. Исследование влияния помехи обратного рассеяния на дальность видимости подводных телевизионных систем.....		108
ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ		
Скороходов Д.А., Степанов И.В., Турусов С.Н., Никитин Н.В. Применение инструментов анализов рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решения.....		114
Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов С.А., Хасан Я.А., Абдулджаббар Н.-Т.М., Иванов А.В. Гибридный метод преобразования изображений морских судов.....		121

Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов Я.А., Калинина Е.С., Иванов А.В. Выделение контуров изображений морских судов.....	132
--	-----

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Бобков В.А., Морозов М.А., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Метод визуальной навигации для организации инспекции подводного трубопровода автономным роботом.....	143
Кукуи Ф. Д., Крылов Ю.Е., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Об обеспечении эффективного функционирования системы «несение судовой вахты».....	152
Стариченков А.Л., Модин Н.В. Сравнительная оценка современных интеллектуальных систем управления в задачах обработки навигационной информации.....	160
Краснодубец Л.А., Канов Л.Н., Конева С.А., Цалоев В.М. Терминальное управление процессом профильных измерений океанской среды.....	169

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Волянская Я.Б., Волянский С.М., Онищенко О.А., Шевченко В.А., Труднев С. Ю. Исследование возможностей для повышения точности стабилизации судна на курсе (на английском языке).....	174
Першин Н.В. Анализ количества полученной энергии от терминалов по регазификации сжиженного природного газа в Европе.....	182
Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Швартовка судна с колесным движительно-рулевым комплексом.....	191

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Исаев А.А., Мегей Е.С. Формирование системы обеспечения конкурентоспособности морских перевозок судоходного предприятия.....	196
---	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Федоровский Г.Д. О физико-математическом моделировании определяющих функциональных свойств и взаимосвязи свойств традиционных и наноструктурных материалов.....	201
--	-----

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Керестень И.А., Корнилова Е.В., Михайлов А.А. Конечно-элементное определение эффективных коэффициентов жесткости для силовых подводных кабелей с гетерогенной структурой.....	208
--	-----

CONTENTS	page
About journal	10
For Aleksander I. Frumen 's 70-th anniversary	11
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Nikolay L. Velikanov, Sergey I. Koryagin, Oleg V. Sharkov Determination of residual stresses in structures of ships with welded rigid elements.....	12
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Mazen Alsaïd, Salamekh Ali , The study of the strength characteristics of polymer composite materials under tension.....	18
Sergey O. Baryshnikov, Mikhail V. Sukhoterin Analysis of the production of marine passenger hydrofoil ships.....	28
Sergey I. Koryagin, Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov Stress state of polymeric coatings used by repair of ship hull structures.....	37
Egor V. Davydov, Evgeny V. Fomin, Alexandr V. Fomin Improvement technology finish assembly lower gear propulsion and steering columns.....	43
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Dmitrii S. Vatolin Strengthened Miller cycle application in the ship's ICE.....	49
Alexander A. Yurtaev, Andrey Y. Fershalov, Yuriy Ya. Fershalov, Viktor V. Porshkevich Design methodology of axial microturbine stages with partial integration of the rotor in the nozzles.....	54
Alexander A. Yurtaev, Andrey Y. Fershalov, Yuriy Ya. Fershalov, Viktor V. Porshkevich Optimization of the efficiency of axial microturbine stages with partial integration of the rotor in the nozzles.....	59
Valery YU. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Marin L. Marinov, Sergey N. Turusov Prospects for improving marine traffic control systems.....	64
Andrei S. Gnedenkov, Sergey L. Sinebryukhov, Dmitry V.h Mashtalyar, Igor E. Vyaly, Vladimir S. Egorkin, Alexander N. Minaev, Sergey V. Gnedenkov Effective protection of the welded joint of 1579 aluminum alloy against local corrosion destruction.....	71
Valeriy T. Matviienko, Andrey V. Dologlonyan, Vladimir A. Ocheretianyi The closed gas turbine plants for propulsive complexes of the underwater equipment.....	77
Damir I. Ibragimov, Dmitriy A. Makarov, Viktor V. Porshkevich, Nikita A. Kamaev, Aleksandr M. Shilov Experimental determination technique electric efficiency of the inductor brake.....	83
Nikolay Y. Sinyavsky, Irina P. Korneva, Natalya A. Kostrikova Integral transformation inverse application in ultraviolet-visible absorption spectroscopy for the analysis of ship fuels and oils.....	89
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Vladimir V. Roenko, Andrey D. Ishchenko, Igor G. Malygin, Vladimir N. Lozhkin Energy-efficient environmentally safe technology of ship icing control.....	94
Victor L. Martynov, Alexey S. Golosnoy, Roman V. Krasilnikov, Nikolay V. Nikitin Prospects of using laser technologies in maritime technologies for the arctic region.....	101
Victor L. Martynov, Alexey S. Golosnoy, Nikolai M. Bozuk, Nikolay V. Nikitin Study of the impact of backscattering interference for visibility of underwater television systems.....	108
INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS	
Dmitriy A. Skorokhodov, Ilya V. Stepanov, Sergey N. Turusov, Nikolay V. Nikitin Application of risk analysis for establishing decision rules in decision support systems.....	114
Shakeeb S. Fahmi, Natalya V. Shatalova, Svyatoslav A. Seliverstov, Yazeed A. Hasan, Nasr T. M. Abduljabbar, Alexander V. Ivanov. Hybrid conversion method of marine images.....	121
Shakeeb S. Fahmi, Natalya V. Shatalova, Yaroslav A. Seliverstov, Elena S. Kalinina, Alexander V. Ivanov. The contours allocation of marine images.....	132

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Valerii A. Bobkov, Mike A. Morozov, Alexander V. Inzartsev, Grigorii D. Eliseenko The method of visual navigation to organize inspection of the underwater pipeline with an autonomous robot.....	143
Firmin D. Kukui, Yuriy E. Krilov, Marin L. Marinov, Sergey N. Turusov. About ensuring effective functioning of the “ship’s wath keeping” system.....	152
Alexey L. Starichenkov, Nikita V. Modin Comparative evaluation of modern intellectual control systems in tasks of navigation information processing.....	160
Leonid A. Krasnodubets. Lev N. Kanov, Svetlana A. Koneva, Vladimir M. Tsaloev Terminal control of the process of profile measurements of the ocean environment.....	169

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Yana B. Volyanskaya, Serhey M. Volyanskiy, Oleh A. Onishchenko, Valerii A. Shevchenko, Sergey Yu. Trudnev Research of possibilities to increase the exactness of ship stabilizing on a course (in English).....	174
Nikita V. Pershin Analysis of the quantity of the obtained energy from terminals by regasification of liquefied natural gas in Europe	182
Lyudmila S. Grosheva, Vladimir I. Merzlyakov, Valeriy I. Pluyshchaev Mooring of a ship with wheel propulsion steering complex.....	191

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Alexander A. Isaev, Ekaterina S. Megey Formation of system ensuring the marine transport competitiveness for the shipping enterprise.....	196
--	-----

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Georgy D. Fedorovsky On the physico-mathematical modelling of the determining functional properties and interrelationship of properties of traditional and nanostructural materials.....	201
---	-----

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Ilya A. Keresten, Elena V. Kornilova, Alexander A. Michailov Finite element definition of effective stiffness coefficients for power submarine cable with heterogeneous structure.....	208
---	-----

О ЖУРНАЛЕ

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

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

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

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

The magazine subject corresponds to the following 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

К 70-летию Александра Исааковича Фрумена

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

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

В 1979 году он защитил кандидатскую диссертацию, результаты которой внедрены в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, на ЛМЗ и ряде КБ. В 1995г. получил звание доцента. Работал заведующим отраслевой НИЛ «Прочности и надежности судовых конструкций» (1978-1996), зам. декана по НР (1982-1991), заместителем исполнительного директора Ассоциации «Океанотехника» (1991-2001) и по совместительству, ученым секретарем факультета (2001-2007) и университета (с 2007 по н/в). Являлся руководителем актуальных научных работ: «Технология-АТПМУ», «Прототип-Отгрузка» и «Глайдер-НДС».



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

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

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

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

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5:621.7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СУДОВЫХ
КОНСТРУКЦИЯХ С ВВАРЕННЫМИ ЖЕСТКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ****Николай Леонидович Великанов**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Сергей Иванович Корягин

доктор технических наук, профессор, директор инженерно-технического института
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Олег Васильевич Шарков

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения и технических систем
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: osharkov@kantiana.ru

Аннотация

При работе судовых корпусных конструкций одним из наиболее значительных параметров, определяющих работоспособность судна, являются поля остаточных напряжений. Применение сварки как основного метода создания неразъемных соединений в процессе формирования металлических конструкций корпуса судна обуславливает наличие полей остаточных сварочных напряжений. Актуальность определения этих напряжений особенно возрастает при решении задач судоремонта, когда в конструкциях выполняются отверстия. В работе предложена методика оценки полей остаточных сварочных напряжений. Методика позволяет проводить исследования нормальных и касательных напряжений при наличии вваренных жестких круглых элементов. Математические модели основаны на решении плоских задач теории упругости о вставке тел с натягом. В работе приведены эпюры остаточных сварочных напряжений. Установлено, что напряжения уменьшаются с удалением от сварного шва и затухают на расстоянии, равном радиусу отверстия. Влияние на величину напряжений оказывают значения модельных продольной и поперечной усадок сварного шва, геометрические размеры вставки и пластины, в которую она вварена.

Ключевые слова: судовые конструкции, остаточные напряжения, кольцевые пластины, вваренные жесткие элементы.

**DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN
STRUCTURES OF SHIPS WITH WELDED RIGID ELEMENTS****Nikolay L. Velikanov**

Dr.Sci.Tech., professor, head of the department of mechanical engineering and technical systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Sergey I. Koryagin

Dr.Sci.Tech., professor, director of the engineering and technology institute
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Oleg V. Sharkov

Dr.Sci.Tech., associate professor, professor of the department of engineering and technical systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: osharkov@kantiana.ru

Abstract

During the operation of ship hull structures one of the most significant parameters that determine the performance of the vessel are the residual stress fields. The use of welding as the main method of creating permanent joints in the process of forming metal structures of the ship's hull causes the presence of residual welding stress fields. The relevance of the determination of these stresses is particularly increased in solving problems of ship repair, when holes are made in the structures. In this paper we propose a methodology for the evaluation of the fields of residual welding stresses. The technique allows to study normal and tangential stresses in the presence of hard welded round elements. Mathematical

models are based on the solution of plane problems of the theory of elasticity on the insertion of bodies with tension. The paper presents diagrams of residual welding stresses. It is found that the stress decreases with distance from the weld and attenuate at a distance equal to the radius of the hole. The stress value is influenced by the values of the model longitudinal and transverse shrinkage of the weld, the geometric dimensions of the insert and the plate into which it is welded.

Key words: ship structures, residual stresses, ring plates, welded rigid elements.

Введение

Наличие в судовых конструкциях жестких элементов зачастую приводит к образованию трещин и, как следствие, их разрушению. Это объясняется тем, что жесткие элементы при воздействии внешних усилий становятся концентраторами напряжений.

Кроме этого, если жесткие элементы крепятся с помощью сварки, то остаточные напряжения могут привести к росту концентрации напряжения и потери конструкции работоспособности по критерию прочности [1–14].

Разработка расчетных схем для таких судовых конструкций – задача весьма актуальная для судостроения.

В частности, при определении остаточных напряжений в переборках уплотнений в местах прохода валопровода через поперечные водонепроницаемые переборки; крышках сварных кнехтов; водогазонепроницаемых крышках с устройствами центрального задривания; сварных фланцевых труб; усилениях труб в местах их прохода через переборки; конструкциях донных патрубков; приварных головках и др. судовых конструкций.

В этих случаях расчетной схемой является круглая пластина с вваренной круглой жесткой вставкой.

К настоящему времени, вопрос расчета напряженно-деформированного состояния кольцевых пластин достаточно хорошо разработан [15–26]. Однако авторам не удалось обнаружить зависимости, позволяющие непосредственно расчетным путем определять остаточные напряжения, возникающие в случае использования жесткой вваренной вставки.

Для определения напряжений в круглой пластине с жесткой вставкой, установленной при помощи сварки, при действии внешней нагрузки можно воспользоваться решением плоской задачи теории упругости для кольцевых пластин в полярных координатах [18, 19, 27, 28].

Полярными координатами точек являются полярный радиус r и полярный угол θ , а напряженное состояние определяется касательными $\tau_{r\theta}$, нормальными радиальными σ_r и тангенциальными σ_θ напряжениями (рис. 1).

1. Расчетная схема и математические модели

Определим остаточные напряжения в круглой пластине конечных размеров радиуса R_1 с абсолютно круглой жесткой вставкой радиуса R при отсутствии внешних усилий (рис. 1).

В этом случае скачек смещений точек пластины на границе со вставкой в декартовой системе координат равен

$$g = u + iv, \tag{1}$$

где $u = \Delta_x \cos \theta$ – перемещения точек в продольном (вдоль оси OX) направлении; $v = \Delta_y \sin \theta$ – перемещения в поперечном (вдоль оси OY) направлении; Δ_x, Δ_y – продольная и поперечная усадки сварного шва [29].

Представив радиальные u и тангенциальные v перемещения в полярных координатах как

$$\begin{cases} u = u \cos \theta + v \sin \theta; \\ v = -u \sin \theta + v \cos \theta. \end{cases} \tag{2}$$

получим

$$\begin{cases} u = 0,5(\Delta_x + \Delta_y) + 0,5(\Delta_x - \Delta_y) \cos 2\theta; \\ v = -0,5(\Delta_x - \Delta_y) \sin 2\theta. \end{cases} \tag{3}$$

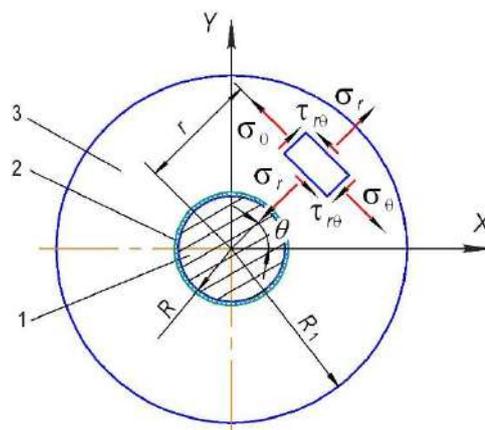


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния круглой пластины с жесткой круглой вставкой: 1 – жесткая вставка; 2 – сварной шов; 3 – круглая пластина.

Граничные условия на контуре $r = R$ запишутся как

$$\begin{cases} u(R, \theta) = 0,5(\Delta_x + \Delta_y) + (\Delta_x - \Delta_y) \cos 2\theta; \\ v(R, \theta) = -(\Delta_x - \Delta_y) \sin 2\theta. \end{cases} \tag{4}$$

Граничные условия на контуре $r = R_1$ запишутся как

$$\begin{cases} \sigma_r(R_1, \theta) = 0; \\ \tau_{r\theta}(R_1, \theta) = 0. \end{cases} \tag{5}$$

Для кольцевых пластин известно общее решение в форме бесконечного тригонометрического ряда по $\sin(n\theta)$ и $\cos(n\theta)$ (n – номер члена ряда).

Так как граничные условия (4, 5) однородны или содержат только члены разложения с номерами $n = 0$ и $n=2$ [30], то в общих выражениях для

напряжений достаточно оставить члены с указанными номерами и только те, которые определяют разложение перемещений u по косинусам, а v – по синусам.

Следовательно, перемещения можно определить по следующим выражениям:

$$\begin{cases} u(r, \theta) = \frac{2a_0 r(1-\mu)}{E} - \frac{a_1(1+\mu)}{Er} + \frac{\left(-a_2 r(\mu+1) + \frac{a_3(\mu+1)}{3r^3} - \frac{2a_4 r^3 \mu}{3} + \frac{2a_5}{r}\right) \cos 2\theta}{E}; \\ v(r, \theta) = \frac{-(\mu+1)(R^2 - R_1^2)}{Er} + \frac{\left(a_5 r(\mu+1) + \frac{a_3(\mu+1)}{3r^3} + \frac{a_4 r^3(\mu+3)}{3} - \frac{a_5(1-\mu)}{r}\right) \sin 2\theta}{E}, \end{cases} \quad (6)$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга); μ – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона); $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ –

неизвестные коэффициенты, которые необходимо определить.

Напряжения можно определить по следующим выражениям:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{a_1}{r^2} + 2a_0 - \left(a_2 + \frac{a_3}{r^4} + \frac{2a_5}{r^2}\right) \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta = -\frac{a_1}{r^2} + 2a_0 + \left(a_2 + 2a_4 r^2 + \frac{a_3}{r^4}\right) \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta} = \frac{(R^2 - R_1^2)}{r^2} + \left(a_2 - \frac{a_3}{r^4} + a_4 r^2 - \frac{a_5}{r^2}\right) \sin 2\theta. \end{cases} \quad (7)$$

Подставляя перемещения (1) и напряжения (2) в граничные условия при $r = R$ и $r = R_1$, определим неизвестные коэффициенты, приравняв свободные члены и коэффициенты при $\cos 2\theta, \sin 2\theta$.

Введя обозначение $k = R_1/R$ и подставляя значения коэффициентов в выражения (2), получим следующие выражения для остаточных напряжений при вварке в пластину радиуса R_1 абсолютно жесткой вставки радиуса R :

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{E(\Delta_x + \Delta_y)}{2R(\mu k^2 - \mu + k^2 + 1)} \left(1 - \left[\frac{kR}{r}\right]^2\right) - \frac{E(\Delta_x - \Delta_y)R^{11}k^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]}{A+B} \times \\ & \times \left(\frac{\mu - 3 + k^4[3\mu - 4k^2(\mu+1) + 3]}{2R^2k^2[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \frac{3R^2k^2[k^4(\mu+1) - \mu + 3]}{2r^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} + \frac{2}{r^2}\right) \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{E(\Delta_x + \Delta_y)}{2R(\mu k^2 - \mu + k^2 + 1)} \left(1 - \left[\frac{kR}{r}\right]^2\right) - \frac{E(\Delta_x - \Delta_y)R^{11}k^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]}{A+B} \times \\ & \times \left(\frac{\mu - 3 + k^4[3\mu - 4k^2(\mu+1) + 3]}{2R^2k^2[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \frac{3R^2k^2[k^4(\mu+1) - \mu + 3]}{2r^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \frac{6(\mu+1)(k^2 - 1)r^2}{R^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]}\right) \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} = & \frac{E(\Delta_x - \Delta_y)R^{11}k^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]}{A+B} \times \left(\frac{\mu - 3 + k^4[3\mu - 4k^2(\mu+1) + 3]}{2R^2k^2[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \right. \\ & \left. - \frac{3R^2k^2[k^4(\mu+1) - \mu + 3]}{2r^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \frac{3(\mu+1)(k^2 - 1)r^2}{R^4[k^6(\mu+1) - \mu + 3]} - \frac{1}{r^2}\right) \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

где введены следующие обозначения

$$\begin{aligned} A = & -3R^{10}(\mu+1)(k^2 - 1)[k^4(\mu+1) - \mu + 3]; \\ B = & -R^4[k^2(\mu k^2 - 4\mu - 3k^2 - 4) + 3\mu + 3]. \end{aligned}$$

2. Результаты расчетов и дискуссия

Формулы (1)-(10) определяют математическую основу методики расчета поля остаточных напряжений в кольцевой пластине при наличии

абсолютно жесткой концентрической вставки при отсутствии внешней нагрузки.

Характер изменения величин остаточных напряжений в зависимости от текущего радиуса и величин усадок сварного шва Δ_x, Δ_y представлен на рис. 2 и 3. Исходными данными для

расчетов приняты: радиус жесткой вставки $r = 300$ мм; радиус пластины $R_1 = 1900$ мм; модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластины $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа и $\mu = 0,3$.

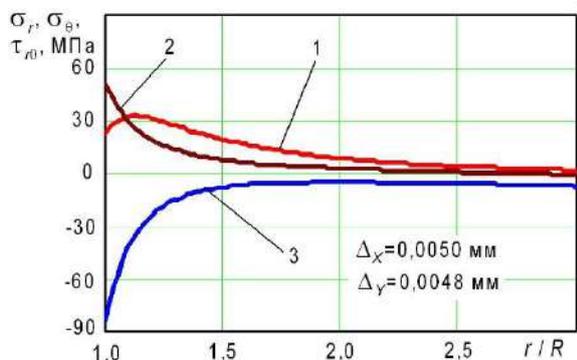


Рис. 2. Распределение напряжений в зависимости от текущего радиуса: 1 - σ_r ; 2 - σ_θ ; 3 - $\tau_{r\theta}$.

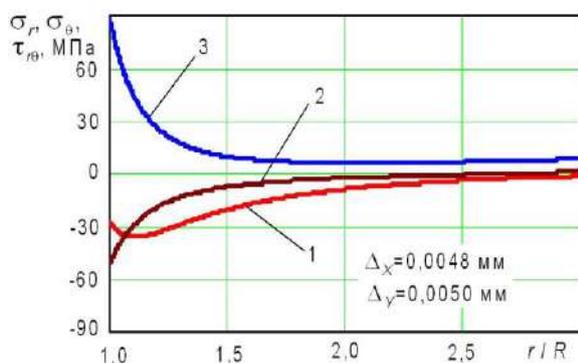


Рис. 3. Распределение напряжений в зависимости от текущего радиуса: 1 - σ_r ; 2 - σ_θ ; 3 - $\tau_{r\theta}$.

Как видно из полученных результатов наибольшие остаточные напряжения возникают около жесткой вставки при изменении текущего радиуса в диапазоне $r \leq (1,0 \dots 1,5)R$. При дальнейшем увеличении текущего радиуса до $r \geq (2,0 \dots 2,5)R$ остаточные напряжения уменьшаются и стремятся по величине к нулю.

На рис. 4 показано изменение остаточных напряжений в зависимости от текущего полярного угла θ . Так как согласно зависимостям (8)–(10) величины напряжений по периодическим функциям ограничимся рассмотрением половины пластины. Как видно из представленных результатов наиболее напряженные участки пластины определяются текущими углами $\theta = 10 \dots 45^\circ$ и $\theta = 135 \dots 170^\circ$.

На рис. 5 показано изменение остаточных напряжений в зависимости от отношения внешнего радиуса пластины к радиусу жесткой вставки R_1/R . Как видно из полученных результатов при увеличении размеров пластины происходит нелинейный рост остаточных напряжений. По-

видимому, это можно объяснить следующим. При увеличении внешнего радиуса пластины R_1 точка с координатой $r = 1,3R = const$ в относительных единицах смещается ближе к вставке, что согласно рис. 2 и 3 вызывает нелинейный рост напряжений.

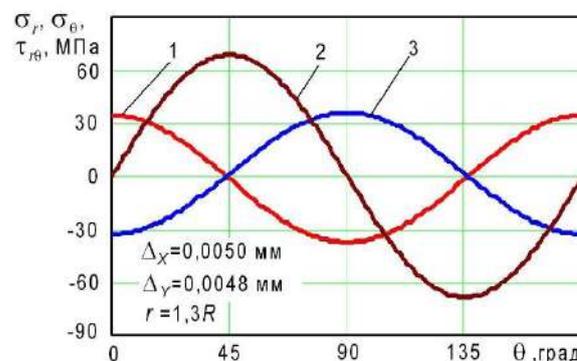


Рис. 4. Распределение напряжений в зависимости от текущего полярного угла: 1 - σ_r ; 2 - σ_θ ; 3 - $\tau_{r\theta}$.

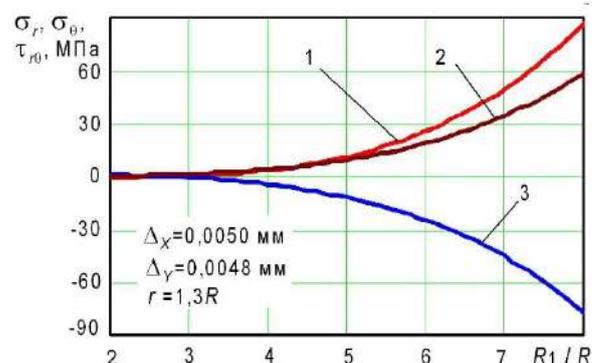


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в зависимости от внешнего радиуса пластины: 1 - σ_r ; 2 - σ_θ ; 3 - $\tau_{r\theta}$.

Заключение

Установлено, что величина зоны существенного влияния жесткой вставки на распределение остаточных напряжений зависит от её размера.

Наибольшие по величине остаточные напряжения возникают около жесткой вставки на расстоянии от нее равном одному радиусу вставки. Остаточные напряжения на участках пластины, расположенных ближе к её краю нелинейно уменьшаются и стремятся к нулю.

При увеличении размеров пластины происходит нелинейный рост остаточных напряжений в точке с постоянной относительной координатой.

Варьированием параметров сварки можно изменять поле остаточных напряжений. Возможность определения остаточных напряжений расчетным путем позволяет улучшить прочностные характеристики судовых конструкций на стадии их проектирования.

Литература

1. Baltayev T.A., Korolev A.V. Mathematical modeling of elastic hysteresis phenomenon in round plates in presence of residual tension // *Procedia engineering*. 2016. V.150. Pp. 81-85.
2. Smitha M.C., Smithb A.C. Advances in weld residual stress prediction: A review of the NeTTG4 simulation round robin // *International journal of pressure vessels and piping*. 2018. V.164. Pp. 109-129.
3. Velikanov N.L., Sharkov O.V. Modeling residual welding voltages in ship hull structures // *Marine intellectual technologies*. 2018. V.3(4). Pp. 31–35.
4. Doerk O., Fricke W., Weissenborn C. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints // *International journal of fatigue*. 2003. V.25(5). Pp. 359-369.
5. Pherson N.A. Thin plate distortion—the ongoing problem in shipbuilding // *Journal of ship production*. 2007 V.23(2) Pp. 94-117.
6. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. Stresses in circular plates with rigid elements // *Journal of physics: Conference series*. 2018. V.1015, 052028. doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052028.
7. Rieger T., Gazdag S., Prah U., Mokrov O., Rossiter E., Reisgen U. Simulation of welding and distortion in ship building // *Advanced engineering materials*. 2010. V.12(3). Pp. 153-157.
8. Алферов В.И. Методы расчета сварочных деформаций и напряжений судовых корпусных конструкций. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2019. 332 с.
9. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П., Васильченко Н.П. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. Т.1. №3(41). С. 45-54.
10. Крыжевич Г.Б. Прочность толстолистовых сварных конструкций судов и океанотехники в арктических условиях // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2017. №2(380). С. 32-41.
11. Розинов А.Я., Шатилов В.А., Логунов В.В. Оценка целесообразности изменения последовательности сборки и сварки монтажных соединений тонколистовых судовых конструкций // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. №3. С. 35-40.
12. Коростылёв Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2016. №3(37). С. 104-118.
13. Нгуен З.Л. Дефекты сварки и их влияние на прочностные характеристики корпусов судов при их постройке // *Научная дискуссия: вопросы технических наук*. 2017. №2(42). С. 35-40.
14. Алферов В.И., Александров А.В., Платонов В.В., Шапошников В.М. Оценка влияния технологического фактора на несущую способность судовых корпусных конструкций // *Судостроение*. 2016. №1(824). С. 30-34.
15. Zappalorto M. Mode I generalised stress Intensity factors for rounded notches in orthotropic plates // *Theoretical and applied fracture mechanics*. 2019. V.101. Pp. 356-364.
16. Fricke W., Coddia M., Feltz O., Garbatov Y., Remes H., Risso G., Rizzo C., Romanoff J. Round robin study on local stress and fatigue assessment of lap joints and doubler plates // *Ships and offshore structures*. 2013. V.8(6) Pp. 621-627.
17. Najafzadeh M.M., Eslami M.R. Buckling analysis of circular plates of functionally graded materials under uniform radial compression // *International journal of mechanical sciences*. 2002. V.44(12). Pp. 2479-2493.
18. Reddy J.N. *Theory and analysis of elastic plates and shells*, 2006. Boca Raton: CRC Press. 568 p.
19. Ventsel E., Krauthammer T. *Thin plates and shells: theory, analysis, and applications*. 2001. Boca Raton: CRC Press. 688 p.
20. Биргер И.А. *Стержни, пластинки, оболочки*. Москва: Физматлит, 1992. 390 с.
21. Чижевский К.Г. *Расчет круглых и кольцевых пластин справочное пособие*. Ленинград: Машиностроение, 1977. 184 с.
22. Тимербаев Р.М., Хайруллин Ф.С., Хакимов Р.Г. Задача о деформировании круглой пластины с отверстием // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т.16. №6. С. 179-182.
23. Сапожников А.И., Мишичев А.И. Численный анализ напряженного состояния деформирования пластины с вмятиной при растяжении // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2007. №12(588). С. 95-100.
24. Ермоченко С.А. Расчет напряженно-деформированного состояния кольцевой пластины с эксцентрическим вырезом методом конечных разностей // *Вестник Витебского государственного университета*. 2008. №3(49). С. 121-125.
25. Притыкин А.И. Распределение и концентрация напряжений во флорах с овальными и круглыми вырезами // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т.1. №3(37). С. 29-34.
26. Банщикова И.А. Напряженно-деформированное состояние и длительность до разрушения кольцевых пластин в условиях ползучести // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2015. Т.8. №4. С. 359-368.
27. Rytel A., Kiusalaas J. *Mechanics of materials*. Boston: Cengage Learning, 2012. 570 p.
28. Липовцев Ю.В., Русин М.Ю. *Прикладная теория упругости*. Москва: Дрофа, 2008. 319 с.
29. Великанов Н.Л. Напряжения в круглых пластинах с вваренным жестким элементом // *Повышение надежности и долговечности механизмов и машин рыбообрабатывающих производств: сборник научных трудов*. Калининград: Издательство КГТУ, 1992. С.4-16.
30. Корн Г.А., Корн Т.М. *Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы*. СанктПетербург: Лань, 2003. 831 с.

References

1. Baltayev T.A., Korolev A.V. (2016) Mathematical modeling of elastic hysteresis phenomenon in round plates in presence of residual tension // *Procedia engineering*. V.150. Pp. 81-85.
2. Smitha M.C., Smithb A.C. (2018) Advances in weld residual stress prediction: A review of the NeTTG4 simulation round robin. *International journal of pressure vessels and piping*. V.164. Pp. 109-129.
3. Velikanov N.L., Sharkov O.V. (2018) Modeling residual welding voltages in ship hull structures // *Marine intellectual technologies*. V.3(4). Pp. 31–35.
4. Doerk O., Fricke W., Weissenborn C. (2003) Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints. *International journal of fatigue*. V.25(5). Pp. 359-369.
5. Pherson N.A. (2007) Thin plate distortion—the ongoing problem in shipbuilding. *Journal of ship production*. V.23(2) Pp. 94-117.
6. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. (2018) Stresses in circular plates with rigid elements. *Journal of physics: Conference series*. V.1015, 052028. doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052028.
7. Rieger T., Gazdag S., Prah U., Mokrov O., Rossiter E., Reisinger U. (2010) Simulation of welding and distortion in ship building. *Advanced engineering materials*. V.12(3). Pp. 153-157.
8. Alferov V.I. *Metody rascheta svarochnykh deformatsiy i napryazheniy sudovykh korpusnykh konstruksiy*. Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2019. 332 p.
9. Molokov K.A., Novikov V.V., Turmov G.P., Vasil'chenko N.P. (2018) Otsenka nadezhnosti sudovykh konstruksiy s mikrotreshchinami i ostatochnymi svarochnymi napryazheniyami. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. V.1. No3(41). pp. 45-54.
10. Kryzhevich G.B. (2017) Prochnost' tolstolistovykh svarnykh konstruksiy sudov i okeanotekhniki v arkticheskikh usloviyakh. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. No2(380). pp. 32-41.
11. Rozinov A.Ya., Shatilov V.A., Logunov V.V. (2014) Otsenka tselesoobraznosti izmeneniya posledovatel'nosti sborki i svarki montazhnykh soedineniy tonkolistovykh sudovykh konstruksiy. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. No3. pp. 35-40.
12. Korostylev L.I., Litvinenko D.Yu. (2016) Analiz i klassifikatsiya metodov otsenki ustalostnoy prochnosti svarnykh tonkostennykh konstruksiy korpusa sudna. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechno-go flota im. admirala S.O. Makarova*. No3(37). pp. 104-118.
13. Nguen Z.L. (2017) Defekty svarki i ikh vliyaniye na prochnostnyye kharakteristiki korpusov sudov pri ikh postroyke. *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk*. No2(42). pp. 35-40.
14. Alferov V.I., Aleksandrov A.V., Platonov V.V., Shaposhnikov V.M. (2016) Otsenka vliyaniya tekhnologicheskogo faktora na nesushchuyu sposobnost' sudovykh korpusnykh konstruksiy. *Sudostroenie*. No1(824). pp. 30-34.
15. Zappalorto M. (2019) Mode i generalised stress Intensity factors for rounded notches in orthotropic plates. *Theoretical and applied fracture mechanics*. V.101. Pp. 356-364.
16. Fricke W., Codda M., Feltz O., Garbatov Y., Remes H., Risso G., Rizzo C., Romanoff J. (2013) Round robin study on local stress and fatigue assessment of lap joints and doubler plates. *Ships and offshore structures*. V.8(6) Pp. 621-627.
17. Najafizadeh M.M., Eslami M.R. (2002) Buckling analysis of circular plates of functionally graded materials under uniform radial compression. *International journal of mechanical sciences*. V.44(12). Pp. 2479-2493.
18. Reddy J.N. *Theory and analysis of elastic plates and shells*, 2006. Boca Raton: CRC Press. 568 p.
19. Ventsel E., Krauthammer T. *Thin plates and shells: theory, analysis, and applications*. 2001. Boca Raton: CRC Press. 688 p.
20. Birger I.A. *Sterzhni, plastinki, obolochki*. Moskva: Fizmatlit, 1992. 390 p.
21. Chizhevskiy K.G. *Raschet kruglykh i kol'tsevykh plastin spravochnoe posobie*. Leningrad: Mashinostroenie, 1977. 184 p.
22. Timerbaev R.M., Khayrullin F.S., Khakimov R.G. (2013) Zadacha o deformirovaniy krugloy plastiny s otverstiem. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. V.16. No6. pp. 179-182.
23. Sapozhnikov A.I., Mishichev A.I. (2007) Chislennyy analiz napryazhennoy sostoyaniya deformirovaniya plastiny s vmyatinoy pri rastyazhenii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. No12(588). pp. 95-100.
24. Ermochenko S.A. (2008) Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kol'tsevoy plastiny s ekstsentrirchye-skim vyrezom metodom konechnykh raznostey. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta*. No3(49). pp. 121-125.
25. Pritykin A.I. (2017) Raspredelenie i kontsentratsiya napryazheniy vo florakh s oval'nymi i kruglymi vyrezami. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. V.1. No3(37). pp. 29-34.
26. Banshchikova I.A. (2015) Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i dlitel'nost' do razrusheniya kol'tsevykh plastin v usloviyakh polzuchesti. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. V.8. No4. pp. 359-368.
27. Pytel A., Kiusalaas J. *Mechanics of materials*. Boston: Cengage Learning, 2012. 570 p.
28. Lipovtsev Yu.V., Rusin M.Yu. *Prikladnaya teoriya uprugosti*. Moskva: Drofa, 2008. 319 p.
29. Velikanov N.L. *Napryazheniya v kruglykh plastinakh s vvarenym zhestkim elementov. Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti mekhanizmov i mashin ryboobrabatyvayushchikh proizvodstv: sbornik nauchnykh trudov*. Kaliningrad: Izdatel'stvo KGTU, 1992 pp. 4-16.
30. Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya. Teoriya. Formuly*. Sankt-Peterburg: Lan', 2003. 831 p.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 620.172.242

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Мазен Алсаид

аспирант кафедры "Судостроение и энергетические комплексы морской техники"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: mazenal60@yahoo.com

Али Саламех

кандидат технических наук, доцент кафедры «Судостроение и энергетические
комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: a.salameh@mail.ru

Аннотация

В настоящее время полимерные композиционные материалы являются одним из перспективных судостроительных материалов. При этом прочностные свойства полимерных композиционных материалов является объектом проведенного исследования.

В данной работе исследованы механические свойства полимерных композиционных материалов. Рассмотрена технология изготовления образцов из полимерных композиционных материалов, армирующихся стеклянными волокнами. Задачей данной работы является изучение влияния количества слоев армирующих наполнителей на предел прочности при растяжении. Для решения поставленной задачи были изготовлены две группы образцов с разными количествами слоев. В состав образцов первой группы (А) входят стекломат марки EMC-600-1250-Е в качестве наполнителя, и полиэфирная смола «Яркопол-110» в качестве матрицы. В состав образцов второй группы (В) кроме выше указанного состава входит также ровинговая стеклоткань марки EWR 560. Проведена серия механических испытаний на растяжение.

Результаты проведенных испытаний показывают существенное влияние количества и порядка расположения слоев на предел прочности полимерных композиционных материалов, при этом разрушающая нагрузка образцов увеличивается с повышением количества слоев, а предел прочности снижается. Также установлено, что наличие ровинговой стеклоткани в составе ПКМ увеличивает предел прочности при растяжении на 12–20%.

Результаты исследования позволили установить математическую зависимость предела прочности от количества слоев армирующих наполнителей. Установленная зависимость позволять принимать рациональное решение на этапе проектирования судовых конструкций из полимерных композиционных материалов, в частности, при применении их в качестве конструкционного материала для судовых надстроек и рубок.

Ключевые слова: судостроение, полимерные композиционные материалы, стеклянные волокна, механические свойства, испытание на растяжение, предел прочности, наполнителя, стекломат, смола.

THE RESEARCH OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMERIC COMPOSITION MATERIALS UNDER TENSION

Mazen Alsaïd

Postgraduate Student, Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering
Astrakhan State Technical University
414056, Astrakhan, Tatishcheva, 16
e-mail: mazenal60@yahoo.com

Ali Salameh

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Shipbuilding
and Power Complexes of Marine Engineering
Astrakhan State Technical University
414056, Astrakhan, Tatishcheva, 16
e-mail: a.salameh@mail.ru

Abstract

At present, polymer composite materials are one of the most promising shipbuilding materials. In this case, the strength properties of polymer composites are the subject of the study.

In this paper, the mechanical properties of polymer composite materials were investigated. The technology of manufacturing samples from polymer composite materials reinforced with glass fibers is

reviewed. The objective of this work is to study the effect of the number of layers of reinforcing fillers on the tensile strength. To solve the problem, two groups of samples with different number of layers were manufactured. The composition of the samples of the first group (A) includes glass-fiber mat of the trade mark EMC-600-1250-E as a filler, and polyester resin "Yarkopol-110" as a matrix. The composition of the samples of the second group (B) in addition to the above composition also includes woven roving fiberglass of the trade mark EWR 560. A series of mechanical tensile tests was carried out.

The test results show a significant effect of the number and order of layers on the tensile strength of polymer composite materials, while the breaking load of the samples increases with increasing number of layers, and the tensile strength decreases. It was also found that the presence of woven roving fiberglass in the composition of the PCM increases the tensile strength by 12–20%.

The results of the study allowed establishing the mathematical dependence of the tensile strength on the number of layers of reinforcing fillers. The established dependence will make it possible to make a rational decision at the design stage of ship structures made of polymer composite materials, in particular, when using them as a structural material for ship superstructures and wheelhouses.

Key words: shipbuilding, polymer composites, glass fibers, mechanical properties, tensile test, tensile strength, filler, glass-fiber mat, resin.

Введение

В настоящее время одним из основных показателей промышленного прогресса является происходящая во всем мире замена традиционных изделий из металла на изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1].

ПКМ широко применяются в разных промышленных отраслях, таких как авиастроение, автомобилестроение и городские инфраструктуры. В судостроении ПКМ впервые использовали после второй мировой войны, когда в США применили их для постройки небольших катеров [2]. С того времени применение ПКМ постоянно расширяется как в надводном, так и в подводном судостроении [3]. При этом важным поворотом в отношении классификационных морских обществ был в 2002 г. когда в правила СОЛАС вступила новая поправка (правила номер 17), которая допускает применение альтернативные материалы, в том числе ПКМ, в судовых конструкциях гражданских судов в случае обеспечения требуемого уровня противопожарной безопасности [4].

ПКМ имеют свои особенные характеристики, позволяющие им быть конкурентоспособными в сравнении с традиционными конструкционными материалами, применяемыми в судостроении, такими как сталь и алюминиевые сплавы. ПКМ имеют хорошую прочность с малым удельным весом, что уменьшает вес конструкций и, следовательно, экономит расход топлива. Также они обладают высокой стойкостью против агрессивных сред и не подвергаются коррозии, в результате чего, затраты на техническое обслуживание конструкций из ПКМ существенно меньше чем у конструкций из традиционных материалов. Несмотря на высокую стоимость технологии изготовления конструкций из ПКМ, стоимость их жизненного цикла меньше чем традиционных материалов [5].

Изучение прочностных характеристик ПКМ для применения в судовых конструкциях является важным объектом для исследования, который привлек внимание многих исследователей. Влияние различных факторов, на прочностные свойства ПКМ было представлено как в российской, так и в зарубежной литературе.

Поскольку ПКМ имеют неоднородную структуру, состоящую из непрерывной полимерной фазы

(матрицы) и армирующего элемента (наполнителя), то на их прочность в большой степени влияют следующие факторы:

- количество и порядок укладки слоёв армирующего элемента;
- свойства и соотношение количеств использованных армирующего элемента и связующего;
- направление волокон армирующего материала относительно оси воздействия нагрузок;
- применяемый метод изготовления.

В работе [6] проведено исследование о влиянии типа армирующих наполнителей на прочность композиционного материала и установлено, что предел прочности при растяжении ПКМ на основе углеродных наполнителей выше на 30% по сравнению с гибридными ПКМ на основе углеродных и стеклянных наполнителей, и на 37% больше чем ПКМ, армированных только стеклянными наполнителями.

Полученные результаты в работе [7] исследования ПКМ с разными ориентациями волокон относительно направления воздействующей нагрузки (0°, 35°, 45°, 90°), подтверждают, что при угле ориентации 35° ПКМ имеет лучшие механические характеристики при растяжении и изгибе.

Результаты, полученные в работе [8] показали существенное влияние методов изготовления ПКМ на основе стеклянных волокон (контактное формование, напыление, вакуумное обжатие и прессование) на прочность при растяжении, срезе, изгибе, сжатии и ударную вязкость. В таком же направлении, исследование [9] подтверждает, что предел прочности при растяжении образцов, изготовленных с применением указанных выше технологий в 3 раза больше чем предел прочности образцов, изготовленных ручной формовкой.

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования является влияние количества слоев армирующих наполнителей на механические свойства ПКМ, так как подобные исследования не проводились. Таким образом, задача исследования – изучение влияния количества слоев и состав ПКМ на их предел прочности при растяжении.

Объектом исследования служат образцы, изготовленные на основе стеклянных волокон с

разным составом и с разным количеством слоев армирующих наполнителей.

1. Материалы для проведения испытаний

Правила Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС) распространяются на конструкционные ПКМ на основе армирующих наполнителей из стеклянных или/и углеродных, а также арамидных волокон, термореактивных полимерных связующих - полиэфирных, винилэфирных и эпоксидных, которые применяются для изготовления корпусов и надстроек судов различного водоизмещения, в том числе катеров и лодок [10].

В судостроении широкое применение нашли ПКМ, армированные стеклянными волокнами, это связано, во-первых, с их высокой механической прочностью и хорошими тепло- и электроизоляционными свойствами. Во-вторых, стеклянные волокна обладают стапельной стойкостью против воздействия агрессивных сред в различных условиях климата. В-третьих, ПКМ присуща доступность, относительно низкая стоимость и простота методов изготовления.

Перечисленные факторы позволяют применять стеклянные волокна в судовых конструкциях [11].

В данной работе для определения влияния количества слоев наполнителя на предел прочности ПКМ при растяжении были изготовлены две группы пластин (А, В) по пять партий в каждой группе с разным количеством слоев (n = 3, 6, 9, 12, 15). В состав пластин группы (А) входят стекломат марки EMC-600-1250-Е в качестве наполнителя, и термореактивная ортофталевая полиэфирная смола «Яркопол-110» в качестве матрицы, обеспечивающая монолитность материала. В состав пластин группы (В), дополнительно входит ровинговая стеклоткань (Рогожа) марки EWR 560 – двунаправленная ткань, сотканная из переплетённых между собой нитей прямого стеклоровинга. В данном исследовании также рассмотрено влияние содержания ровинговой стеклоткани на прочностные свойства ПКМ при растяжении. Основные физико-механические свойства упоминаемых компонентов приведены в таблице 1 [12-14].

Таблица 1

Физико- механические свойства выбранных компонентов

EMC-600-1250-E		Яркопол-110		EWR 560	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Поверхностная масса, г/м ²	600 ± 7,5	Плотность, при t = 23 °С, г/см ³	1,13–1,14	Поверхностная масса, г/м ²	560
Содержание связующего, %	3,5 ± 1,1	Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	70–100	Содержание влаги, %	≤ 0,15
Прочность на разрыв, Н	≥ 160	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	90–140	Содержание замасливателя, %	0,6 ± 0,2
Удельная разрывная нагрузка по вертикали, Н/мм	60	Относительное удлинение при разрыве, %	3–5	Разрывная нагрузка по вертикали, Н	2800
Удельная разрывная нагрузка по горизонтали, Н/мм	60	Прочность при разрыве, МПа	45–65	Разрывная нагрузка по горизонтали, Н	2800

2. Технология изготовления пластин

Для изготовления пластин из ПКМ на основе стеклянных волокон использовался метод ручной формовки, при которой оформление пластин производится в следующий последовательности: укладка ткани наполнителя → пропитка смолой → прокатывание металлическим валиком для удаления воздушных пузырьков, которые являются дефектами в структуре ПКМ и ухудшают прочностные свойства. Для обеспечения отверждения пластин перемешивают смолу с отвердителем марки «Бутанокс М-50» (Butanox M-50). Доза отвердителя по требованию технических нормативов изготовленного материала составляет 1 см³ на 100 см³ смолы. Первый слой: наполнитель пропитывают смолой с повышенным добавлением отвердителя (3 см³ на 100 см³ смолы) так как, первый слой считается основанием для остальных слоёв, и он должен прочно крепиться к матрице. Необходимо отметить что, для каждого слоя наполнителя применялось фиксированное количество смолы (400 см³) в целях

исключения влияния смолы на результаты планируемых испытаний.

Согласно ГОСТу 33345-2015 [15], изготовленные пластины должны иметь квадратную форму с размером 600×600 мм. В конце оформления пластин их необходимо оставить для высыхания на 48 ч при температуре окружающей среды, затем провести процесс кондиционирования не менее 16 ч при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %. После процесса кондиционирования пластины подвергаются механической обработке для придания им правильной формы, к которой относятся: шлифовка поверхности, обрезка излишков стеклопластика или отвержденной полиэфирной смолы по краям листов. Обрезают пластину с каждой стороны не менее чем на 10 мм.

На прочностные свойства ПКМ значительно влияет схема армирования слоев, поэтому при изготовлении пластин группы (В) с укладкой ровинговой стеклоткани между слоями стекломата EMC-600-1250-Е учитывалась симметричность структуры для исключения возможности

возникновения межслойного сдвига, при этом соотношение количества слоёв стекломата к количеству слоёв ровинговой стеклоткани составляет 1 : 3 (рис 1).

В таблице 2 показана структура армирования пластин групп (А, В).

Таблица 2

Структура армирования изготовленных пластин

№	Общее количество слоёв	Количество слоёв ровинговой стеклоткани	Количество слоёв стекломата
А-3	3	—	3
А-6	6	—	6
А-9	9	—	9
А-12	12	—	12
А-15	15	—	15
В-3	3	1	2
В-6	6	2	4
В-9	9	3	6
В-12	12	4	8
В-15	15	5	10

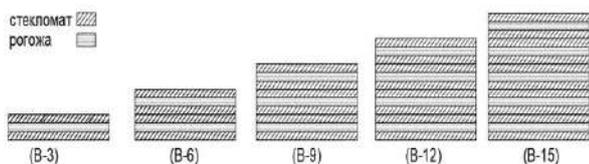


Рис. 1. Схема армирования изготовленных пластин группы (В)

3. Объект исследования и метод проведения испытаний

Испытание ПКМ проводилось на плоских образцах без головки (рис.2) согласно ГОСТ 11262–2017 [16]. Основные размеры образцов приведены в таблице 3.

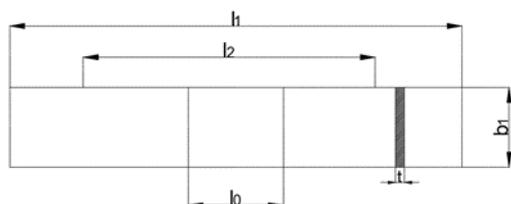


Рис. 2. Форма образцов для проведения испытаний на растяжение

Таблица 3

Основные размеры образцов для испытания на растяжение ПКМ

Параметр	Значение, мм
Общая длина l_1 , не менее	250
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце l_2	170 ± 5
Расчетная длина l_0	50 ± 1
Ширина головки b_1	25 ± 1

Изготовленные образцы, после отрезки их от пластин с помощью ленточной пилы со скоростью

резания не менее 915 м/мин при числе зубьев на метр ленты – 400 ÷ 550 согласно ГОСТ 33345–2015 [15]. При этом шероховатость поверхности образцов должно быть не более $Ra = 6,3$ мкм. На рисунках 3, 4 показаны вырезанные образцы для испытаний на растяжение.



Рис. 3. Образцы для проведения испытаний на растяжение группы А



Рис. 4. Образцы для проведения испытаний на растяжение группы В

Для определения предела прочности при растяжении, изготовленные образцы были испытаны на гидравлической универсальной машине «АМСЛЕР» типа 50 SZBDA 223 (рис.5). Процесс нагружения выполняется вдоль образца при фиксированной скорости ($V = 5$ мм/мин) перемещения захватов машины и продолжается до тех пор, пока образец не сломается.

В результате испытаний определены значения силы F_{max} , при которой происходит разрыв образцов. Предел прочности при растяжении определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{F_{max}}{A}, \quad (1)$$

где F_{max} – разрушающая нагрузка, Н;

$A = b \cdot h$ – площадь поперечного сечения образца, мм².

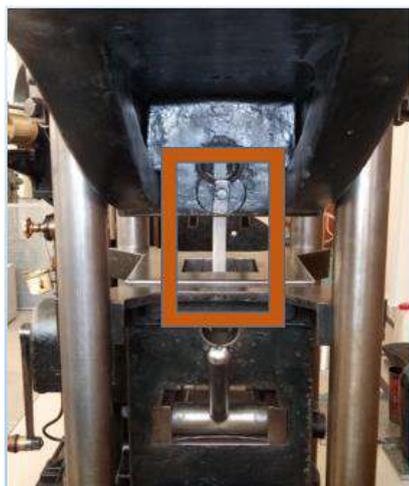


Рис. 5. Образцы на машине испытания «АМСЛЕР»

4. Результаты испытаний

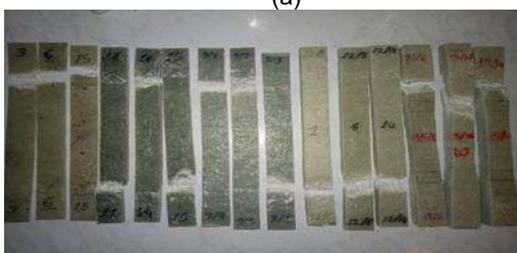
4.1. Разрушающие нагрузки при испытании образцов на растяжение

Для изучения влияния количества слоев наполнителя на прочностные свойства при растяжении проведена серия механических испытаний образцов группы А (на основе стекломата марки EMC-600-1250-Е и полиэфирной смолы «Яркопол-110») и образцов группы В (на основе стекломата марки EMC-600-1250-Е, полиэфирной смолы «Яркопол-110» и ровинговой стеклоткани марки EWR 560) по 15 образцов для каждой партии с разным количеством слоев ($n = 3, 6, 9, 12, 15$).

В ходе испытаний записаны нагрузки F_{max} , при которых происходит разрушение образца, следует отметить, что образцы, разрушенные вне рабочей части (в захватах машины), не учитываются и исключаются из дальнейшего расчета (рис.6).



(а)



(б)

Рис. 6. Исключенные образцы из расчета а - образцы группы А; б - образцы группы В

Значения разрушающих нагрузок для образцов группы А показаны на рисунках 7 – 11.

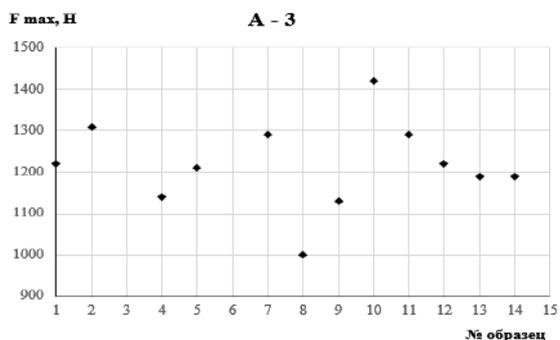


Рис. 7. Значения разрушающих нагрузок для образцов (А-3)

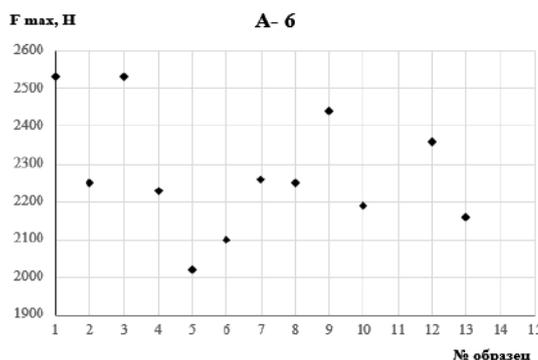


Рис. 8. Значения разрушающих нагрузок для образцов (А-6)

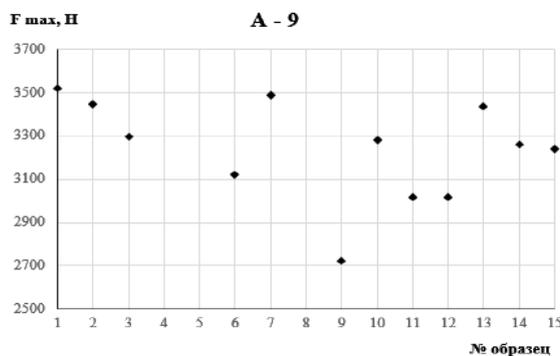


Рис. 9. Значения разрушающих нагрузок для образцов (А-9)

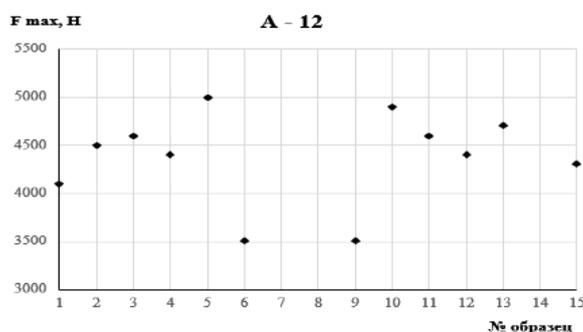


Рис. 10. Значения разрушающих нагрузок для образцов (А-12)

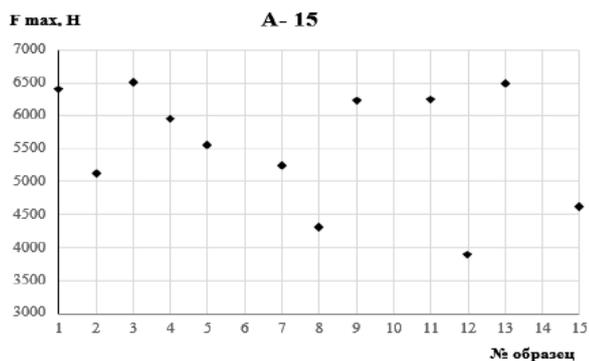


Рис. 11. Значения разрушающих нагрузок для образцов (А-15)

таким же образом значения разрушающих нагрузок для образцов группы В графически иллюстрируемые на рисунках 12–16.

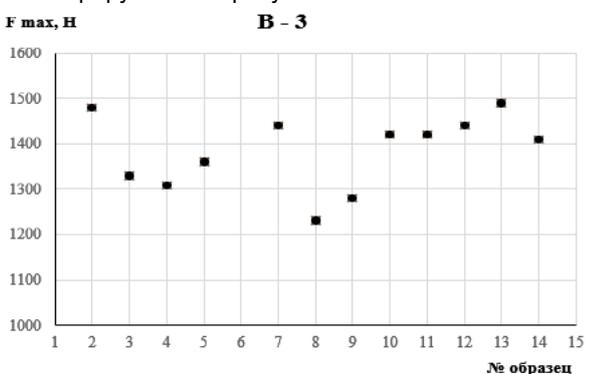


Рис. 12. Значения разрушающих нагрузок для образцов (В-3)

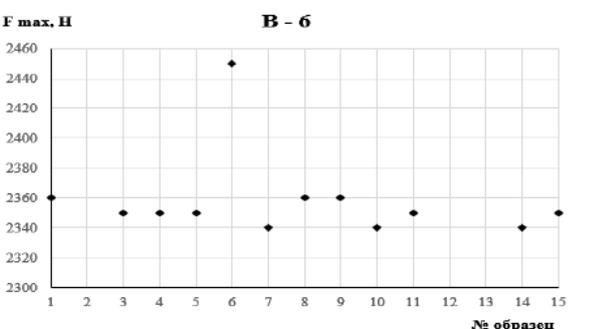


Рис. 13. Значения разрушающих нагрузок для образцов (В-6)

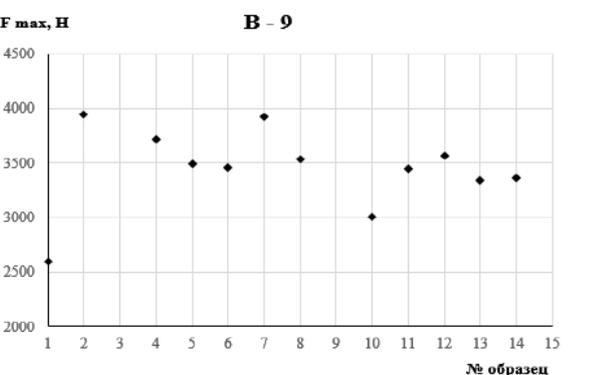


Рис. 14. Значения разрушающих нагрузок для образцов (В-9)

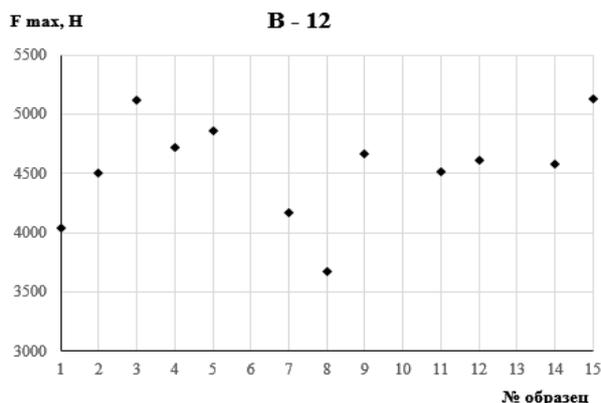


Рис. 15. Значения разрушающих нагрузок для образцов (В-12)

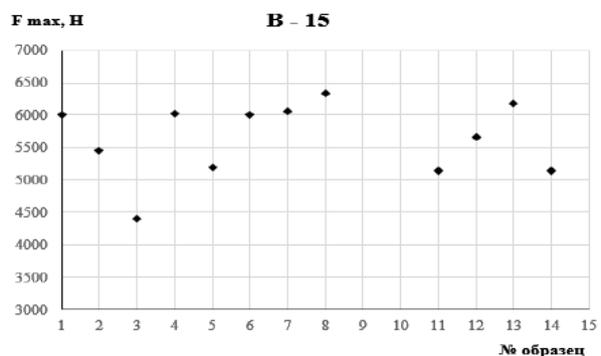


Рис. 16. Значения разрушающих нагрузок для образцов (В-15)

Анализ средних значений разрушающих нагрузок свидетельствует о том, что с повышением количества слоев наполнителя для обеих групп образцов, без и с наличием ровинговой стеклоткани (А и В), разрушающая нагрузка увеличивается с одной стороны, а с другой стороны образцы с добавкой ровинговой стеклоткани (В) выдерживают большую нагрузку, чем образцы на основе стекломата в качестве наполнителя (А) (рис. 17).

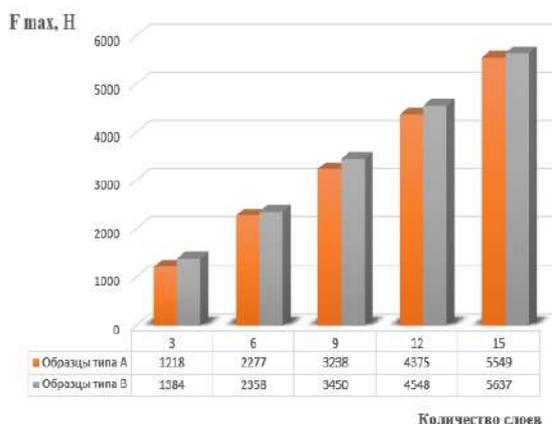


Рис. 17. Сравнение средних значений разрушающих нагрузок для образцов А, В

4.2. Предел прочности при испытании образцов на растяжение

Предел прочности при растяжении является основным информативным показателем прочностных характеристик для практических рекомендаций использования ПКМ в определенных условиях работы под воздействием нагрузок. В результате испытаний образцов на растяжение с помощью формулы (1) определены значения предела прочности на растяжение. В таблице 4 приведены результаты расчета для образцов группы А, в структуру которых входит стекломат марки EMC-600-1250-Е в качестве наполнителя, и смола «Яркопол-110».

Таблица 4

Пределы прочности на растяжение ПКМ группы А

№	Предел прочности на растяжение				
	А-3	А-6	А-9	А-12	А-15
1	133	134	119	101	129
2	139	119	120	120	105
3	122	143	122	123	128
4	120	119	110	111	118
5	129	108	110	132	112
6	101	106	113	89	138
7	157	120	124	133	99
8	111	107	109	133	86
9	126	108	94	91	122
10	145	123	118	125	130
11	126	108	108	118	124
12	128	105	105	118	76
13	127	116	122	122	126
14	124	104	115	138	131
15	100	105	115	105	95
$\bar{\sigma}_B$	130,44	117,25	114,56	112,91	109,82

Примечание: ■ - разрушение образца произошло вне рабочей зоны, результаты в расчет не принимаются.

Статистическая обработка полученных результатов выполнялась на основе стандартных методов, приведённых в работах [17], [18] с использованием пакета статистических программ Minitab 18.1. (Пробная тридцатидневная версия) Эта программа выполняет необходимые расчеты по статистической обработке данных на основе выбранного исследователем уровня значимости (P). При этом любая нулевая статистическая гипотеза отклоняется, если получен уровень значимости при расчете меньше уровня значимости, определенного пользователем. В данной работе выбран уровень значимости P = 0,05. В результате выполнения статистической обработки значений пределов прочности образцов группы А на основе метода дисперсионного анализа (ANOVA) подтверждена значимость влияния количества слоев наполнителя на предел прочности ПКМ на основе выбранных компонентов. Также по результату регрессионного

анализа (рис. 18) установлено, что математическая зависимость между количеством слоев n и пределом прочности при растяжении σ_B имеет следующий вид:

$$\sigma_B = 130,7 - 1,519 \cdot n \quad (2)$$

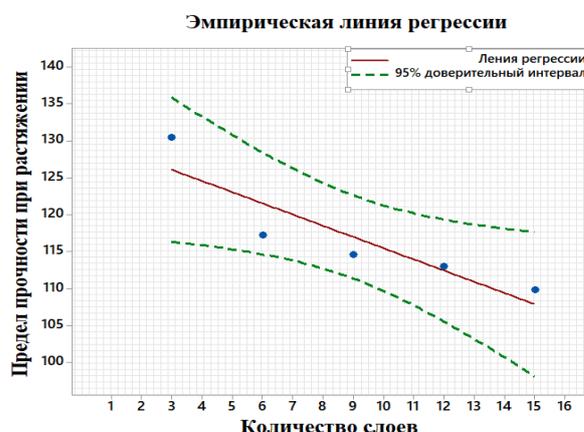


Рис. 18. Зависимость предела прочности при растяжении от количества слоев для образцов группы А

Аналогичном образом, значения пределов прочности образцов группы В приведены в таблице 5. В результате статистической обработки установлена линейная зависимость предела прочности при растяжении от количества слоев (рис.19). Математическая формула имеет следующий вид:

$$\sigma_B = 159,53 - 2,522 \cdot n \quad (3)$$

Таблица 5

Пределы прочности на растяжение ПКМ группы В

№	Предел прочности на растяжение				
	В-3	В-6	В-9	В-12	В-15
1	143	136	108	119	129
2	159	150	143	125	122
3	151	142	105	152	95
4	157	139	146	131	123
5	149	136	135	136	113
6	134	141	127	157	135
7	159	150	150	124	128
8	140	140	142	109	130
9	147	132	134	137	89
10	157	154	117	77	148
11	157	142	132	133	109
12	161	137	151	135	127
13	165	138	134	153	131
14	166	134	128	134	121
15	136	136	105	147	91
$\bar{\sigma}_B$	155,63	140,21	134,49	131,86	121,97

Примечание: ■ - разрушение образца произошло вне рабочей зоны, результаты в расчет не принимаются.

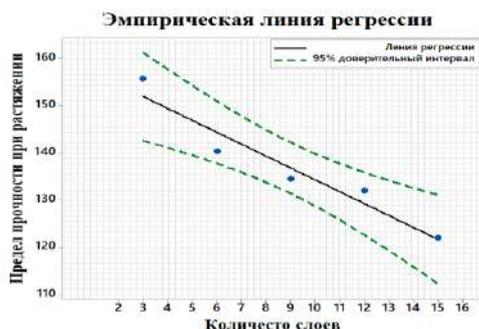


Рис. 19. Зависимость предела прочности при растяжении от количества слоев для образцов группы В

При анализе результатов исследования видно, что для обеих групп образцов с увеличением количества слоев наполнителя увеличивается разрушающая нагрузка, однако предел прочности при растяжении уменьшается. Это объясняется двумя факторами:

- во-первых, увеличение площади сечения образцов за счет увеличения количества слоев;
- во-вторых, характеристиками связующего, а именно, хрупкостью, так как с увеличением количества слоев, одновременно увеличивается доля участия связующего в принятии нагрузки.

Результаты испытания образцов данных материалов показали, что изменение количества слоев значительно влияет на предел прочности при растяжении. Наличие в составе ПКМ ровинговой стеклоткани (рогожи) увеличивает предел прочность при растяжении на 12 ÷ 20 % (рис.20).

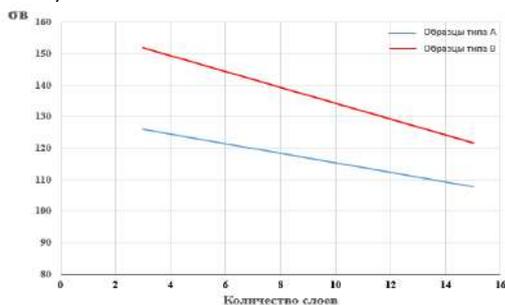


Рис. 20. Сравнение отношения предела прочности на растяжение от количества слоев

Заключение

В данном исследовании рассмотрено влияние количества слоев наполнителя на механические свойства ПКМ на основе стеклянных волокон. Были исследованы две группы образцов испытанием их на растяжение. В состав материала образцов первой группы входят стекломат и полиэфирная смола, а в состав материала образцов второй группы дополнительно входит ровинговая стеклоткань. Полученные результаты испытаний образцов на растяжение подтверждают существенное влияние количества слоев на разрушающую нагрузку и, следовательно, на предел прочности при растяжении. Разрушающая нагрузка при увеличении количества слоев увеличивается, а предел прочности снижается, что объясняет важную роль содержания смолы в работе ПКМ под воздействием нагрузок. Также сравнение результатов испытаний обеих групп образцов показывает, что добавка ровинговой стеклоткани в соотношении с основным наполнителем 1 : 3 в структуре ПКМ увеличивает предел прочности на 12 ÷ 20%. Результаты данной работы могут служить основанием для рационального выбора компонентов и количества слоев наполнителя в состав ПКМ на этапе проектирования судовых конструкций. Для дальнейшего исследования актуальным вопросом является изучение влияния количества слоев на механические свойства при других видах нагружения, в частности, на сжатие и изгиб, и исследование влияния ровинговой стеклоткани с другими соотношениями относительно количества основного наполнителя.

Благодарности

Механические испытания на растяжение проведены на базе «лаборатория по изучению износостойкости и испытаниям материалов» Каспийского института морского и речного транспорта, филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Волжский государственный университет водного транспорта"

Литература

1. Мельников Д.А. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие/ Д.А. Мельников, А.В. Ильичев, М.И. Вавилова //Труды ВИАМ.— 2017. — № 3 (51). — С. 55-64.
2. Boyd. S.W. Strength and Durability of Steel to Composite Joints for Marine Application: Thesis ... for the Degree of Doctor of Philosophy- SHIPSCIENCE/ Stephen William Boyd. – University of Southampton. – 2006. – 224p.
3. Никитин В.С. Современное состояние и перспективы применения композитов в зарубежном подводном кораблестроении/В.С. Никитин, В.Н. Половинкин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 4 (328). — С. 57-74.
4. IMO, SOLAS e International Convention for the Safety of Life at Sea, Ch. II-2, Reg. 11e2, pp. 17.

5. Tawfik B. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials/B. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, T. Elsayed// International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. Vol. 9. Is. 2. Pp. 185-198.
6. Belgacema. L. Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy) / L. Belgacema, D. Ouinas, J. A.V. Olay, A.A. Amado// Composites Part B. 2018. Vol. 145. Pp. 189 – 196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.03.026.
7. Rahmani H. Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites: Effects of Number of Plies, Fiber Contents, and Angle-Ply Layers/ H. Rahmani, S. Saffarzadeh-Matin, S. H. M. Najafi, A. Ashori// Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol.33(8). Pp.733 – 740. DOI: 10.1002/pen.23820.
8. Карпов, Я.С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я.С. Карпов, О. В. Ивановская. — Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т, 2001. — 153с.
9. Максим. И. М. Технология формирования корпуса судна из листового композиционного материала/ И. М. Максим, А. Р. Рубан // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 1 (39). — С. 71 – 76.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов. —СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019,151с.
11. Курносоев А. О., Мельников Д. А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодекоративных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2015. — № 11. — С. 14–17.
12. E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).
13. Характеристики смолы «Яркопол-110». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf (дата обращения:11.02.2019)
14. Ровинговая стеклоткань марки EWR 560. EZIM. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.e-zim.ru/products/rovingovaya-tkan/> (дата обращения:10.02.2019).
15. ГОСТ 33345-2015. Композиты полимерные. Производство пластин для изготовления образцов для испытаний. Общие технические требования. - М.: Стандартинформ, 2015. - 24 с.
16. ГОСТ 11262-2017.Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
17. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник / М.Н.Степнов. —М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
18. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н. Ш. Кремер. — М.: миметика, 2016. — 514 с.

References

1. Mel'nikov D.A., Il'ichev A.V., & Vavilova M.I.(2017) Svravnenie standartov dlja provedenija mehanicheskikh ispytaniy stekloplastikov na szhatie. Trudy VIAM,3 (51),55-64.
2. Boyd. S.W. Strength and Durability of Steel to Composite Joints for Marine Application: Thesis ... for the Degree of Doctor of Philosophy- SHIP SCIENCE/ Stephen William Boyd. - University of Southampton. 2006. 224p.
3. Nikitin V.S. &Polovinkin V.N. (2017)Sovremennoe sostojanie i perspektivy primeneniya kompozitov v zarubezhnom podvodnom korablestroenii. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 4 (328), 57-74.
4. IMO, SOLAS e International Convention for the Safety of Life at Sea, Ch. II-2, Reg. 11e2, pp. 17.
5. Tawfik B. Leheta H., Elhewy A., &Elsayed T. (2017). "Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, Is. 2, 185-198.
6. Belgacema. L, Ouinas D., Olay J. A.V., Amado A.A. (2018) Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy). Composites Part B, Vol. 145, Pp. 189 -196.
7. Rahmani H. Saffarzadeh-Matin S., Najafi S. H. M., Ashori A. (2014) Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites: Effects of Number of Plies, Fiber Contents, and Angle-Ply Layers. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.33(8), Pp.733 - 740.
8. Karpov, Ya.S., O. V. Ivanovskaya. Kompozitsionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdeliya .Khar'kov: Natsional'nyy aerokosmicheskij un-t, 2001, 153pp.
9. Maksim. I. M. Ruban A. R. (2018) Tekhnologiya formirovaniya korpusa sudna iz listovogo kompozitsionnogo materiala. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 1 (39),Pp 71- 76.
10. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' XVI. Konstruktsiya i prochnost' korpusov sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. SPb: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019, 151 pp.
11. Kurnosov A. O., Mel'nikov D. A. (2015) Kharakteristiki stekloplastikov na osnove vysokodeformativnykh rasplavnykh svyazuyushchikh v usloviyakh vozdeystviya ekspluatatsionnykh faktorov . Vse materialy. Entsiklopedicheskij spravochnik, VOL11, Pp14-17.
12. E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (data obrashcheniya: 11.02.2019).
13. Kharakteristiki smoly «Yarkopol-110». [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf (data obrashcheniya:11.02.2019)
14. Rovingovaya steklotkan' marki EWR 560. EZIM. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.e-zim.ru/products/rovingovaya-tkan/> (data obrashcheniya:10.02.2019).
15. GOST 33345-2015. Kompozity polimernye. Proizvodstvo plastin dlya izgotovleniya obraztsov dlya ispytaniy.

- Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. - M.: Standartinform, 2015. 24 s.
16. GOST 11262-2017. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie. M.: Standartinform, 2018. 24 s.
17. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: Spravochnik / M.N. Stepnov. -M.: Mashinostroenie, 1985. 232 s.
18. Kremer, N. Sh. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika / N. Sh. Kremer. M.: mimetika, 2016. 514.

УДК 629.12

АНАЛИЗ СТРОИТЕЛЬСТВА МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Сергей Олегович Барышников

доктор технических наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой основ инженерного проектирования
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

Михаил Васильевич Сухотерин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Аннотация

В современной литературе отсутствует общая картина основных этапов строительства морских судов на подводных крыльях (СПК) и причин спада производства как в нашей стране, так и за рубежом. В настоящее время в стране проявляется практический интерес к возобновлению масштабных скоростных речных и морских перевозок судами на подводных крыльях, которые пережили периоды расцвета и забвения во второй половине прошлого века. В статье представлена краткая история развития зарубежных и отечественных СПК, приведены их основные характеристики, годы постройки, объемы строительства, районы эксплуатации, указаны судостроительные компании, производившие СПК. Впервые в хронологическом порядке приводятся систематизированные данные об основных серийных и экспериментальных моделях морских зарубежных и отечественных СПК. Исследуются причины спада производства в конце XX века, дается оценка современного состояния и рассматриваются перспективы строительства новых скоростных судов. Рассматриваются особенности конструкции корпуса, двигателей и подводных крыльев. Сравниваются модели разных судостроительных компаний, выявляются достоинства и недостатки. Проводится экономический анализ эффективности эксплуатации СПК. Целью работы является установление приоритетов создания и эксплуатации морских СПК в нашей стране в современных условиях.

Ключевые слова: Морские скоростные суда, подводные крылья, характеристики, история создания, перспективы развития

ANALYSIS OF HYDROFOIL SEA-GOING PASSENGER SHIP CONSTRUCTION

Sergey O. Baryshnikov

Dr.Sci.Tech, Professor, Rector, Head of the Department of Engineering Design Fundamentals
State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov
198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

Mikhail V. Sukhoterin

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of Higher Mathematics Department
State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov
198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7
e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Abstract

In modern literature there is no overall picture of the main milestones in construction of hydrofoil ships and the reasons for decline in production both in our country and abroad. Currently, the country has a practical interest in the resumption of large-scale high-speed river and sea transportation by hydrofoil ships that have experienced periods of flourishing and oblivion in the second half of the last century. The article presents a brief history of development of foreign and domestic hydrofoil ships, their main characteristics, and years of construction, construction volumes, areas of operation, and shipbuilding companies that produced hydrofoil ships. For the first time in a chronological order, systematic data on the main serial and experimental models of marine foreign and domestic hydrofoil ships are given. The reasons for the decline in production at the end of the 20th century are examined, the current state is assessed and the prospects for building new high-speed vessels are reviewed. The design features of the hull, engines and hydrofoils are studied. Models of different shipbuilding companies are compared, advantages and disadvantages are identified. An economic analysis of hydrofoil ship operating efficiency is carried out. The aim of the work is to establish priorities for the creation and operation of sea-going hydrofoil ships in our country under current conditions.

Key words: Sea-going high-speed vessels, hydrofoils, characteristics, history of creation, development prospects.

Введение

Морские пассажирские суда на подводных крыльях имеют давнюю и непростую историю как за рубежом, так и в нашей стране. Они пережили тернистый путь "становления на крыло" – долгий период многочисленных экспериментов, неудач, поисков оптимальных схем, новых материалов, научных изысканий в области гидродинамики, аэродинамики, материаловедения, теории прочности и т.д. Эти суда пережили и период расцвета, и период забвения, и сейчас, можно надеяться, переживают период Ренессанса.

В конце XIX века стало ясно, что обычные водоизмещающие суда не могут развивать скорости больше 30 узлов из-за резкого увеличения лобового сопротивления при незначительном росте скорости. Кроме того эксплуатация на предельных скоростях сопряжена с большими затратами. Это и потребность в новых мощных двигателях, огромный расход топлива, поиск новых конструктивных решений и т.д. Глиссирующие суда, которые почти на половину выходили из воды, подсказывали инженерам-изобретателям идею практически полного выхода на поверхность с помощью подводных крыльев. За этим стояла возможность резкого увеличения скорости судов благодаря малому лобовому сопротивлению подводных крыльев, главное назначение которых создавать подъемную силу, поднимающую судно над водой. Сами глиссирующие суда хотя и обладали высокими скоростями, но для пассажирских перевозок не подходили из-за значительных вертикальных перегрузок при движении.

Опыты по созданию СПК начались в начале 90-х годов XIX века. Экспериментальные модели строили в Англии Г. Филипс в 1891 г. [1], братья М. и Л. Мичем в 1894 г.; попытки создания СПК во Франции предпринимал де Ламбер в 1891 г. Были и другие малоэффективные воплощения идеи движения на подводных крыльях.

Первым судном на подводных крыльях, успешно прошедшим испытания в закрытом водоеме, стало небольшое судно водоизмещением 1,6 т, спроектированное и построенное итальянским инженером Э. Форланини [1-6] (Enrico Forlanini, 1848-1930 г.). Лодка испытывалась в 1905-1911 гг. на озере Маджиоре в Италии. Подводные крылья в виде "лесенки" (этажерки) позволяли развивать скорость 38 узлов. Однако при изменении скорости подъемная сила крыльев резко менялась, что приводило к неустойчивому движению в вертикальной плоскости. В то время не могло идти речи о морских испытаниях этого экспериментального судна. Проблемы с устойчивостью движения преследовали и других судостроителей-одиночек, которые изобретали различные схемы конструкции подводных крыльев. Неудачи создания СПК с хорошей остойчивостью привели на некоторое время к потере интереса инженеров и промышленников к этой идее.

Основоположителем промышленного строительства судов на подводных крыльях стал выдающийся немецкий инженер, барон Ганс фон Шертель [1-6] (Hanns Von Schertel), который в 1927

г. начал работу по созданию торпедных катеров на подводных крыльях. Он использовал два V-образных крыла в носовой и кормовой части, подъемная сила которых приподнимала катер из воды, резко увеличивая его скорость. Эти крылья при движении пересекали поверхность воды. Основная проблема (также как и у других экспериментальных аппаратов) состояла в стабилизации движения после выхода "на крыло". Г. Шертель применил крылья с изменяющимся профилем и переменной шириной по размаху. Такие расширяющиеся к концам крылья улучшали поперечную и продольную устойчивость судна. До 1936 г. Шертель построил 8 катеров, последний из которых развивал скорость 29 узлов с пятью пассажирами. С 1937 г. Шертель вел совместные работы с фирмой "Заксенберг" ("Sachsenberg"). В том же году фирма изготовила пассажирское СПК, которое развивало скорость 40 узлов и имело двигатель мощностью 110 квт. Созданная Шертелем в г. Рослау усовершенствованная система подводных крыльев нашла применение в проектах судов фирмы "Schertel-Sachsenberg Hydrofoil syndicate", которую основали Г. Шертель и Г. Заксенберг. До 1944 г. этой фирмой было построено около 10 различных судов на подводных крыльях, в том числе с использованием авиационных двигателей [2]. Все они, в основном, предназначались для военных целей. Последней разработкой Шертеля времен войны был торпедный катер VS-10; он имел 4 двигателя суммарной мощностью 4400 квт и развивал скорость 42 узла. В крыльевых системах Шертеля регулировка подъемной силы осуществлялась либо за счет изменения площади несущей поверхности крыла, либо за счет принудительного изменения угла его атаки. Недостатком крыльев Шертеля является плохая остойчивость судна при значительном волнении моря. Судно при этом испытывает килевую и бортовую качку, а также вертикальные перегрузки.

В 1943 г. в г. Горьком советский инженер Ростислав Алексеев [4, 5] на заводе "Красное Сормово" начал работу над созданием задуманного им еще до войны быстроходного боевого корабля на подводных крыльях. Проводя гидродинамические исследования на моделях он обнаружил самостабилизирующий эффект одного из своих образцов малопогруженного крыла, который впоследствии назвали эффектом Алексеева. Осенью 1943 г. первый катер на подводных крыльях А-4 был спущен на воду. Его вес был 1 т, мощность двигателя 37 квт, скорость до 16 узлов, что в 1,5 раза выше, чем у аналогичного глиссирующего катера. Надо сказать, что технически не удалось в полной мере добиться стабильности движения при изменении скорости, хотя после некоторых доработок катер был запущен в производство.

Летом 1946 г. прошли испытания новой модели катера А-5, где была применена усовершенствованная крыльевая система, которая обеспечивала необходимую остойчивость при любой скорости, но на переходных режимах остойчивость ухудшалась. Были и другие проблемы, характерные для принципиально новых судов.

В 1947 г. Р.Алексееву было поручено приспособить подводные крылья к серийному глиссирующему торпедному катеру проекта 123-бис. Испытания гибридного судна, названного А-7, на Черном море в Севастополе в 1948 г. показали удовлетворительную остойчивость и возросшую скорость до 60 узлов в морских условиях, но удары о волны сопровождались резким торможением. Причиной являлась традиционная форма катера, не рассчитанная на движение на подводных крыльях. Затем были построены, испытаны и внедрены и ряд других моделей торпедных катеров на подводных крыльях, которые становились все более совершенными по всем параметрам.

1. Начальный этап строительства морских пассажирских СПК

После второй мировой войны проектированием и изготовлением СПК за рубежом стала заниматься швейцарская фирма "Супрамар" ("Supramar"), созданная Шертелем в г. Люцерне [1, 3]. Вскоре она стала крупнейшей зарубежной фирмой по проектированию пассажирских СПК. Первое пассажирское СПК "РТ-10" с деревянным корпусом, получившее название "Fressia d'Oro", вмещавшее 35 чел., было построено в 1952 г. на верфи Sachsenberg в г. Рослау, Германия. Оно развивало скорость 35 узлов. Эксплуатация началась в 1953 г. на озере Лаго-Маджоре между Локарно и Ароной на границе Швейцарии и Италии, затем судно было перевезено на озеро Люцерн в Швейцарии.

Наиболее известные последующие серии СПК этой фирмы, такие как "РТ-20", "РТ-50", "РТ-150", предназначены для прибрежных морских линий. Проекты этих судов были разработаны в 1953-71 гг.

РТ-20 – первое в мире серийное пассажирское СПК. Экспериментальное судно, названное "Bremen Pionier", построено в 1954 г. на верфи Lürssen (г. Бремен, Германия). Оно было оснащено двумя бензиновыми двигателями по 480 квт [2]. Головное судно серии, более совершенное (дизельный двигатель), было спущено на воду в 1956 г. Это судно, получившее название "Fressia del Sole", использовалось в качестве парома через Мессинский пролив между восточным берегом Сицилии и южным берегом Калабрии шириной 5 км (линия Мессина – Реджо-ди-Калабрик). РТ-20 стало также первым официальным морским СПК. Перевозило 74 пассажира. Скорость – 33 узла. С 1955 года эти суда строились по лицензии "Супрамар" итальянской фирмой "Родригез" ("Rodriguez") в г. Мессина. Также, по лицензии РТ-20 производились в Норвегии, Японии и Гонконге до 1971 г. Всего было построено 70 судов этой серии [7].

В СССР с середины 1950 годов филиал ЦКБ -19 (с декабря 1957 г. ЦКБ по СПК) в г. Горьком (ныне г. Нижний Новгород) под руководством Р.Е. Алексеева приступил к созданию речных пассажирских СПК, предвидя их будущую востребованность на водном транспорте для скоростных перевозок. Летом 1956 г. состоялась закладка первого пассажирского СПК, названного впоследствии "Ракетой". Судно строилось в экспериментальном цехе завода "Красное Сормово". В конце апреля 1957 г. первое советское

речное пассажирское СПК было спущено на воду. "Ракета" вмещала 65 пассажиров и развивала скорость до 38 узлов. Всего было построено в последующие годы около 400 ед. В 1959 г. началось производство самого массового (более 400 ед.) и комфортабельного судна "Метеор", способного плавать и в морских прибрежных водах. Оно вмещало 150 пассажиров и развивало скорость до 43 узлов. Судно было оснащено двумя дизельными высокооборотными двигателями М401 Ленинградского завода "Звезда" с максимальной мощностью 880 квт каждый.

В 1957 г. в Голландии были построены два пассажирских СПК "Аквастролл" ("Aquastroll") проекта PL-30, рассчитанные на перевозку 24 пассажиров [2]. Крыльевая система Грюнберга состояла из основного крыла, двух носовых и одного кормового. "Аквастролл" был оснащен двумя двигателями по 180 квт. и развивал скорость 30 узлов, обладал хорошей остойчивостью на разных режимах плавания. По данным [8] в 1962 г. было построено еще одно судно "Аквастролл" на 40 пассажиров, оснащенное двумя ГТД "Боинг 502-10 по 220 квт. Каких либо сведений о серийном производстве этого проекта не имеется.

Производство судов "Supramar" серии РТ-50 "Flecha de Oriente" началось в Италии в 1958 году. Суда были оснащены 2 дизелями Даймлер-Бенц, вмещали от 110 до 140 пассажиров, развивали скорость 35 узлов. Новая модель "Супрамара", как и предыдущие, имела корпус обычных, медленных кораблей, на которые устанавливались крылья. Первые три судна были проданы в Венесуэлу и использовались на линии между городами Ля Гваира и Санта Маргарита, а также на озере Маракаибо и в Карибском море. В Норвегии на линии Ставангер – Берген протяженностью около 100 миль в 1960-61 гг. начали успешно эксплуатироваться два СПК РТ-50, совершая по два рейса в каждом направлении. РТ-50 производились с 1959 по 1970 г. Всего было построено 33 ед.

В книге [8] упоминаются швейцарское судно РТ-28, спущенное на воду в 1959 году. Оно было оснащено дизелем МВ820ДВ мощностью 990 квт и рассчитано на 54 пассажира. Каких либо данных о его серийном производстве найти не удалось.

В начале 60-х годов японская фирма "Хитачи" ("Hitachi") по лицензии приступила к строительству СПК РТ-20 и РТ-50. В 80-х годах в Японии эксплуатировались уже около 50 СПК на различных маршрутах.

В КНР в 1960 г. было создано СПК на плоских малопогруженных крыльях [2]. Судно развивало скорость до 32 узлов, использовалось на реке Янцзы.

В 1961 г. в СССР на ССЗ в г. Поти начали строить теплоход "Комета" – первое судно легендарной серии морских СПК (всего построено 124 ед.), прототипом которого было речное СПК "Метеор" [4,5]. В конце апреля 1962 г. "Комета" совершила свой первый рейс в районе г. Сочи. "Кометы" серийно производились в 1964-1981 годах на судостроительном заводе «Море» в г. Феодосия (всего было построено 86 ед.) и на судостроительном заводе в г. Поти (38 ед.). Скорость судна до 35 узлов,

пассажировместимость 118 чел., экипаж 4 чел., мореходность 4 балла. Корпус "Кометы" обладал большей килеватостью, чем речные СПК. На его днище расположены два редана в носовой и кормовой части. Впервые было применено среднее крыло, которое при захлестывании корпуса волной значительно снижало возникающее сопротивление. На судне устанавливались два двигателя М401А с двумя гребными винтами противоположного вращения. Максимальная мощность каждого двигателя 810 квт. Особенностью "Кометы" является то, что корпус ее был цельносварным (сплав АМг-6) в отличие от "Ракеты" и "Метеора".

В том же 1961 г. в г. Ленинграде в ЦМКБ "Алмаз" был разработан проект теплохода «Стрела» – морского СПК. Всего были изготовлены 3 судна [4]: первое на ССЗ "Море" в 1961, последующие в 1963 г. на Балтийском судостроительном заводе в г. Ленинграде. Эти суда эксплуатировались до 1969 г. в Ялте. "Стрела" развивала скорость 35 узлов, вмещала 90 пассажиров, была оснащена двумя двигателями М50Ф-3. В серию судно не пошло из-за дороговизны изготовления и невысокой надежности [9].

В 1962 на Черном море начались ходовые испытания построенного в единственном экземпляре на заводе "Красное Сормово" морского сварного СПК "Вихрь", прототипом которого было речное СПК "Спутник" [5]. Скорость теплохода 38 узлов, пассажировместимость 260 чел. "Вихрь" эксплуатировался в 1962-1981 гг. по маршруту Одесса-Херсон. В серию судно не пошло из-за проблемы с частой неполной загрузкой пассажирами, а также значительным внешним шумом и вибрацией от четырех дизельных двигателей М50Ф-3 [8].

В Японии в 1962 году было построено СПК МН-30 собственного проекта с дизельным двигателем 12WК-АК 1100 квт, рассчитанное на 80 пассажиров. Оно осуществляло морские перевозки между островами Японии.

В США первым морским пассажирским СПК следует считать 22-местное судно "Хонолд Альбатрос" конструкции Хельмута Кока с V-образными крыльями [1]. Один двигатель Detroit Diesel 6V-53 мощностью 160 квт [10]. Начало постройки серии из 25 судов – 1963 г. Первое судно эксплуатировалось на линии Порт-Вашингтон – Уолл-стрит, Манхеттен [1].

Более совершенное пассажирское СПК "Атлантик Си Уорлд" ("Atlantic Sea World") было создано в 1964 г. Оно вмещало 28 пассажиров и развивало скорость 44 узла. Всего построено 4 судна этого типа; они эксплуатировались на Западном побережье и были приписаны к г. Сан-Диего. СПК имели глубоко погруженные крылья, оснащенными закрылками системы Савицкого (Дэйвидсоновская лаборатория Технологического института Стивенса в штате Нью-Джерси). Эта система применена на судах "Sea World" и "Flying Cloud" фирмы "Atlantic Hydrofoil". Закрепленные на шарнирах крыльев вертикальные закрылки используются в этой системе для изменения подъемной силы. При малой волне в погруженном состоянии находится только нижняя часть закрылка. При увеличении высоты волн под воду

погружается большая часть чувствительного к глубине закрылка, давление на него усиливается, заставляя его поворачиваться, что ведет к увеличению подъемной силы и восстановлению нормального положения корпуса судна.

СПК "Дельфин" ("Dolphin") США ("Grumman Aircraft Engineering Corporation"), построенное в 1966 г., вмещало 50 пассажиров, развивало скорость 48 узлов, обладало хорошей мореходностью – до 3-х баллов. Эксплуатировалось на линии Майами-Бич – Фрипорт (87 миль). Глубокопогруженные крылья имели автоматическое управление.

Несмотря на то, что в Европе и США росло производство СПК, советские крылатые суда "Ракета" и "Комета" охотно покупали Великобритания, Франция, Италия, ФРГ и США. В одном из номеров за 1968 г. английский журнал *Hovering Crafts and Hydrofoils* писал [5]: «СПК американского производства слишком дороги для приобретения и малоэкономичны в эксплуатации. Русские же СПК вполне оправдывают себя при 30-процентной загрузке».

Швейцарская модель "Supramar – РТ-75", созданная на базе РТ-50 в 1968 г., могла перевозить до 160 пассажиров, развивала скорость 38,5 узлов. Построенные два судна эксплуатировались на линии Гонконг-Макао (Китай), протяженностью 38 миль (в 1980 г. на этой линии работали 22 СПК различных моделей). Следующая модель "РТ-100" была построена в 1969 г. в единственном экземпляре, вмещала 200 пассажиров.

"Supramar – РТ-150", разработанная в 1968 г., была самой большой и технологически совершенной моделью СПК. Первое судно построено в Норвегии в 1969 г. На РТ-150 установлена придуманная лично фон Шертелем система аэростабилизации. Она придавала большую устойчивость судну за счет управления потоками воздуха, набегающими на верхнюю часть судна. Дополнительно можно было управлять углом атаки подводных крыльев, изменяя их подъемную силу и повышая устойчивость. Это позволило судну ходить при волне до 3-х метров со скоростью 32 узла. На РТ-150 предусмотрены сидячие места на 150 пассажиров и автомобильная палуба для перевозки восьми легковых автомобилей средних размеров. Без автомобилей можно перевозить 250 пассажиров. На СПК устанавливались два двигателя по 2500 квт. К 1972 году были построены 3 судна этой серии.

2. Расцвет строительства морских пассажирских СПК (1970-1995 гг.)

В 1969 году ЦМКБ "Алмаз" спроектировало морское СПК газотурбоход "Тайфун" [4]. Единственный экземпляр изготовлен на НПО "Алмаз" в 1970 г. После ходовых и экспериментальных испытаний судно эксплуатировалось один год на пассажирских линиях Ленинград–Таллин, Ялта–Сочи, Ялта–Одесса. На судне установлены два ГТД АИ-23С по 1290 квт, созданные в ЗМКБ "Прогресс" (г.Запорожье, Украина) под руководством инженера Ф.М. Муравченко. Построенное судно являлось экспериментальной моделью для

военно-морского флота. В серию не пошло, хотя имело хорошие ходовые характеристики, в частности, обладало мореходностью до 5 баллов. Выведено из состава флота в 1974 г. [9].

В 1969-1972 гг. фирмой "Rodríguez & Hamilton Standard" строились модификации судов "PT-Supramar", которые получили маркировку RHS70, RHS110, RHS140, RHS160 [3, 7]. Последнее судно вмещало 200 пассажиров. Всего было построено 23 судна этих проектов. В частности были выпущены: 2 судна RHS70 в 1969 и 72 гг., 5 судов RHS110 в 1970-71 гг. и 7 судов RHS140 в 1971-72 гг. (пассажировместимость соответственно 70, 110, 140 чел.), 8 судов RHS160 и одно судно RHS200 (200 пассажиров) [7].

К 2000 г. было построено более 200 СПК проектов "Supramar", которые используются в Западной Европе, Южной Америке, Японии и др. странах. Наибольшее количество судов изготовлено по лицензии "Supramar" итальянской фирмой "Rodríguez" – 77 ед. (44 ед. PT-20 и 33 ед. PT50 в 1956-1971 гг.). Часть судов изготовила японская фирма "Hitachi".

Американское судно на подводных крыльях "Джетфойл" ("Jetfoil") - "Боинг 929" фирмы "Боинг" ("Boeing") водоизмещением 112 тонн с помощью водометных движителей способно развивать скорость 40 узлов. Головное судно было заложено в 1973 г. Первые испытания "Jetfoil" состоялись 29 марта 1974 г. Введено в эксплуатацию весной 1975 г. Подводные крылья управлялись с помощью электроники. Если шторм усиливается, крылья поднимаются и судно на водоизмещающем режиме продолжает рейс с помощью вспомогательных движителей. При поднятых крыльях также выполняются маневры при входе в порт, швартовке и выходе из порта. "Джетфойлы" относятся к судам с полностью погруженными крыльями.

Впоследствии в США было построено 28 "Джетфойлов" [11], которые брали на борт от 167 до 400 пассажиров (в зависимости от модификации). Суда строились фирмой "Boeing Marine Systems" в Рентоне, штат Вашингтон с 1974 по 1985 г.

Эти суда в основном использовались как морские скоростные паромы в Гонконге, Японии, на Канарских островах, в Саудовской Аравии, Индонезии, Великобритании и Франции (паром через Ла-Манш).

В Японии "Джетфойлы" по лицензии производила фирма "Кавасаки" ("Kawasaki Heavy Industries Ltd.") в г. Кобе. Всего построено 15 ед. с 1988 по 1995 г. [11]. По состоянию на февраль 2008 года все коммерческие линии в Японии эксплуатировали только "Джетфойлы" [11].

В 1981 г. в СССР на ССЗ "Волга" (г. Горький) было построено головное судно серии "Колхида" – морское СПК, более совершенное, чем "Комета" [4, 5, 8]. Серийно "Колхиды" производились в 1983-1992 гг. в г. Поти (около 40 судов). Скорость 35 узлов, пассажировместимость 120-140 чел., экипаж 5 чел. На судне установлены два основных дизеля MTU 12V396TC82 ("Motoren und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH", Германия) номинальной мощностью 910 квт. Модификациями "Колхиды" являются суда "Альбатрос" и "Катран". Заметим, что к этому времени коэффициент

заполнения пассажирами морских и речных СПК достиг 0,8, объем перевозок превысил 20 млн человек в год, стоимость проезда приблизилась к стоимости наземного транспорта [4].

Первое морское СПК проекта "Ласточка" построено в 1986 г. на опытном ССЗ "Волга" в г. Горьком [5]; всего произведено 3 судна (одно продано в Венгрию, два других, изготовленных в 2004 г., в Китай). Скорость около 40 узлов, пассажировместимость 70 чел., экипаж 4 чел. Двигатели 2x1100 квт. М470 завода "Звезда".

"Циклон" – морское двухпалубное СПК изготовлено в единственном экземпляре в 1987 г. на ССЗ "Море". Морской флагман. Скорость 43 узла, пассажировместимость 250 чел., экипаж 12 чел. Оснащено двумя двигателями: газотурбинным (ГТД) и дизельным М501 по 2160 квт каждый. Судно эксплуатировалось в Крыму, затем в Греции до 2004 г.

Единственный экземпляр "Альбатроса" – модификации "Колхиды" – изготовлен [5] в г. Поти в 1988 г. (в [8], по-видимому, ошибочно указан 1985 г.). На судне установлены отечественные двигатели М421 (2x1050 квт). Скорость 38 узлов, пассажировместимость 120 чел., экипаж 5 чел. СПК эксплуатировалось до 1998 г. Порт приписки г. Одесса.

"Олимпия" – самое большое морское СПК. Всего построено 2 судна в 1993 г. и в 1995 г. на ССЗ "Море"[4,5]. Суда сначала были приписаны к городам Сочи и Таллин. Скорость 38 узлов, пассажировместимость 350 чел., экипаж 6 чел. Оснащены двумя двигателями MTU Германия по 1470 квт. Последний порт приписки первого судна – г. Прая, островное государство Кабо-Верде (2009 г.), второго – г. Фритаун (2014 г.), Сьерра-Леоне.

Заметим, что СПК "Циклон" и "Олимпия" не пошли в серию, главным образом, из-за экономических трудностей на постсоветском пространстве. При этом еще два заложенных судна "Олимпия" при готовности более 70% так и не были достроены.

Следующая модификация "Колхиды" – морское СПК "Катран". Двигатели 2x910 квт. MTU 12V396TC82. Построено всего 4 судна на опытном заводе "Волга" в Н. Новгороде (с 1994 г. по 1996 г.).

В 1993 г. был спущен на воду японский СПК-катамаран 3-его поколения "RAINBOW" [12] ("Mitsubishi Super Shuttle 400, Fully Submerged Hydrofoil Catamaran: RAINBOW"). Судно берет на борт 340 чел., экипаж 4 чел., скорость 40 узлов. Известно что построено минимум 2 таких судна. Катамаран имеет компьютерную систему управления и четыре 16-ти цилиндровых дизельных двигателя японского производства "S16R-MTK-S" мощностью 2100 квт, два водометных движителя "MWJ-5000A", полностью погруженные крылья. Необычный по типу и конструкции лопастной механизм водомета имеет рабочее колесо каскадного типа с двумя рядами лопаток. Это позволяет развивать дополнительную тягу для преодоления "горба" сопротивления при выходе на крылья. Первый "RAINBOW" ходил по маршруту длиной 40 миль между Японскими островами Хонсю и Оки.

В табл. 1 приведены основные характеристики зарубежных пассажирских морских СПК, а в табл. 2 – отечественных судов.

В книге [3] указаны годы первой постройки зарубежных СПК. Некоторые данные, вероятно,

ошибочны: например, для РТ-10, 20, 50, 75, 150 приведены даты 1969, 1969, 1969, 1974, 1971 гг. соответственно, что резко отличается от уточненных данных из других источников (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики зарубежных морских пассажирских СПК

Модели СПК	Год первой постройки	Количество построенных судов	Пассажиров чел	Двигатели	Скорость в узлах	Верфь-изготовитель
Модели "Супрамар" Швейцария						
РТ-10	1952	1	32	1×530 кВт MB8V331	32	Sachsenberg (Germ.)
РТ-20	1956	70	75	1×990 кВт MB12V493	35	Lürssen (Germ.), Rodriquez (It)
РТ-50	1958	33	110-140	2×990 кВт MB12V331	35	Rodriquez
РТ-75	1968	2	135	2×1430 кВт MB12V652	38	Rodriquez
РТ-100	1969	1	200	2×810 кВт		Rodriquez
РТ-150	1969	3	150-250	2×2500 кВт MD20V538	36	Rodriquez, Hitachi (Jap.)
Модели Италия						
RHS70	1969	2	70	1×990 кВт MB12V493	35	Rodriquez & Hamilton Standard
RHS110	1970	5	110	2×990 кВт MB12V493	40	Rodriquez & Hamilton Standard
RHS140	1971	7	140	2×990 кВт MB12V493	35	Rodriquez & Hamilton Standard
RHS160	1973	8	200	2×1430 кВт MB12V652	39	Rodriquez & Hamilton Standard
RHS200	1974	1	200	2×3120 кВт ГТД "Rolls-Royce"	48	Rodriquez & Hamilton Standard
Сифлайт Р46	–	1	30	2×270 кВт VT8-370M	38	Сифлайт
Сифлайт Н57	1967	2	60	2×480 кВт Карраро V12SS	38	Сифлайт
Сифлайт L90	1972	1	125	2×810 кВт MB820Dc	38	Сифлайт
Модели США						
"Хонолд Альбатрос"	1963	25	22	1×160 кВт 6V-53 Detroit Diesel	28	American Hydrofoil
"Атлантик Си Уорлд"	1964	4	28	нет сведений	43	Atlantic Sea World
"Дельфин"	1966	1	50	1×1430 кВт ГТД Mk621	49	Grumman
«Джетфойл» (Jetfoil)	1974	47	250-400	2×1550 кВт ГТД Rolls-Royce "Allison 501KF"	40	Boeing, Kawasaki (Jap.)

Таблица 2

Основные характеристики морских пассажирских СПК, построенных в СССР и РФ						
Модели СПК	Год первой постройки	Количество построенных судов	Пасса-жиров чел	Двигатели	Скорость, в узлах	Верфь - изготовитель
Серийные модели						
Комета	1961	124 (1964-1981)	118	2×810 квт M400	35	СЗ "Море", СЗ г. Поти
Колхида	1981	40 (1983-1992)	130	2×910 квт MTU12V396	35	СЗ г. Поти
Экспериментальные модели						
Стрела	1961	3 (1961-1963)	90	2×880 квт M50Ф3	35	ЦМКБ "Алмаз"
Вихрь	1962	1	260	4×880 квт M50Ф3	38	СЗ "КС"
Тайфун	1969	1	100	2×1290 квт AI23С	43	ЦМКБ "Алмаз"
Ласточка	1986	3 (1986-2004)	70	2×1100 квт M470	40	СЗ "Волга"
Циклон	1987	1	250	2×2160 квт M501	43	СЗ "Море"
Альбатрос	1988	1	120	2×1050 квт M421	38	СЗ г. Поти
Олимпия	1993	2 (1993-1995)	350	2×1470 квт MTU16V2000	38	СЗ "Море"
Катран	1994	4 (1994-1996)	120	2×910 квт MTU12V396	38	СЗ "Волга"
Новые модели						
Суперфойл 40	2003	1	300	2×1850 квт MTU	54	ЦМКБ "Алмаз"
Комета 120М	2017	2	120	2×820 квт MTU16V2000	35	СЗ "Вымпел"

Отметим, что в СССР было построено только морских СПК 164 ед., а всего с речными более 1300 ед.

3. Спад строительства СПК

На рубеже XXI века интерес к СПК в Европе и США упал. Многие фирмы либо резко сократили объемы строительства, либо переключились на другие проекты. Это объясняется экономическими причинами: ростом стоимости двигателей и топлива, проблемами с обслуживанием старых СПК, уменьшением объема перевозок, появлением новых перспективных проектов и т.п. Например, СПК, разработанные в США, оказались технически сложны и требовали высоких эксплуатационных расходов. Для некоторых наиболее технически совершенных американских СПК не удалось создать надежные и экономичные двигатели и надежную систему управления. В конечном итоге это привело к остановке проектов. В Гонконге из-за увеличения стоимости обслуживания старых СПК эти суда постепенно выводятся из эксплуатации. Кампания "Rodriquez Cantieri Navali" из-за финансовых трудностей практически прекратила выпуск пассажирских СПК и в 2012 г. перестала существовать, влившись в свою дочернюю кампанию "Intermarine SpA".

В нашей стране первая эра строительства СПК завершилась в 90-х годах. В 2004 г. было изготовлено последнее судно проекта "Ласточка". Это объясняется, прежде всего, экономическими трудностями после распада СССР. Высокая энергоемкость СПК по сравнению с автобусом (трехкратный расход топлива), малый ресурс двигателей, отсутствие регулятора цен на

пассажиropеревозки, излишняя пассажировместимость на многих линиях, рост цен на алюминий и другие материалы, разрыв экономических связей способствовали свертыванию строительства скоростных судов. Но, хотя автобусные перевозки дешевле перевозок на СПК, во многих регионах неразвитость автомобильных дорог лишало жителей возможности добраться до других населенных пунктов. Это, в свою очередь, привело к оттоку населения из сел и закрытию нерентабельных линий, к упадку экономической инфраструктуры небольших поселков и городов в бассейнах рек. Закрытие скоростных линий на Черноморском побережье привело к спаду туристической активности, к потере доходов государства в сфере туризма.

Российский пассажирский флот все еще эксплуатирует в небольшом количестве большие суда на подводных крыльях в основном потому, что Р.Е. Алексеев выбрал более простые, надежные и долговечные системы по сравнению с зарубежными. В настоящее время в Российском Речном Регистре (Регистровая книга) [13] значатся всего 96 СПК, из них судов, которые осуществляют морские перевозки, 48 ед.: "Комета" – 8 ед, "Метеор" – 40 ед., " При этом к Санкт-Петербургу приписаны 28 скоростных судна: "Метеор" – 22 ед., "Комета" – 6 ед. На линии Санкт-Петербург – Петергоф курсируют 8 "Метеоров". А суда типа «Комета» выполняют рейсы на остров Валаам. Все суда нуждаются в модернизации, в основном, силовой установки и внутренней "начинки". В конструкцию корпуса гением Р.Е. Алексеева заложена высокая прочность и долговечность, что

позволяет продлевать ресурс на длительные сроки (до 50 лет). Достаточно сказать, что в Регистре [13] фигурируют "Комета - 5" 1973 года постройки (приписана к С. Петербургу – 45 лет эксплуатации); "Комета–7" 1974 года постройки (приписана к С. Петербургу – 44 года эксплуатации).

4. Возрождение СПК в России

После распада СССР, ЦМКБ «Алмаз» создало новый корабль-паром "Суперфойл-40 (301)" – СПК 3-его поколения. Катамаран с погруженным крылом водоизмещением 85 т. способен развивать скорость 54 узла и брать на борт 300 пассажиров. Первый паром заложен на верфи "Морской завод Алмаз" в апреле 2001 г., сдан заказчику в 2002 г. [6, 14]. В 2003 паром начал работу на линии Таллинн-Хельсинки году между Эстонией и Финляндией. В 2004 г. был продан в Китай, порт приписки г. Шанхай. По некоторым данным было заложено и второе судно "Суперфойл- 40", однако сведения о его вводе в эксплуатацию отсутствуют. Силовая установка судна состоит из 2-х дизелей по 1850 квт; движитель - два водомета; экипаж 6 чел. Крупнейший в мире катамаран "Суперфойл-40" является гибридным СПК. Оно имеет только переднее крыло. Корма такого судна как бы "волочится" по воде. Мореходность до 5 баллов, скорость 54 узла.

Началом возрождения скоростного флота России следует считать 2013 г. 23 августа в Рыбинске на Судостроительном заводе "Вымпел" состоялась церемония закладки головного морского пассажирского СПК нового поколения "Комета -120М". Морское судно способно перевозить 120 пассажиров со скоростью 35 узлов. 20 октября 2017 г. судно с именем "Севастополь" было спущено на воду. В экипаже 5 человек. Судно оборудовано двумя дизельными 16 - цилиндровыми двигателями 16V2000 M72 немецкой компании MTU "Friedrichshafen" мощностью 820 кВт каждый. 1 августа 2018 г. в Севастополе состоялось открытие регулярного движения "Кометы -120М" по маршруту Севастополь - Ялта. За август по данным прессы судно перевезло 12 770 пассажиров. Загрузка судна была практически полной. За два месяца эксплуатации перевезено около 23000 пассажиров при загрузке 96% [15].

На сегодняшний день в линейке судов на подводных крыльях, разработанных ЦКБ им. Алексеева, есть СПК "Циклон- 250М" – морской газотурбоход, который вмещает 250 пассажиров. Это улучшенная модификация "Циклона", выпущенного в 1987 г. в единственном экземпляре. Проектом предусмотрена установка двух современных газотурбинных двигателей мощностью 2×8800 квт производства ОАО "Сатурн" (г. Рыбинск). Предполагаемая скорость судна 55 узлов. Каких либо сведений о строительстве новой модели "Циклона" не имеется. Возможная

проблема отсутствия заказов, на наш взгляд, в излишней пассажироместности. Этот проект может заинтересовать страны восточной Азии, и прежде всего Китай и Индию.

В настоящее время имеются все предпосылки для возрождения морских пассажирских СПК. Главной, как ни странно, является проблема, связанная с бурным развитием автотранспорта. По данным [16] при увеличении с 2000 по 2010 г. на 15% протяженности автомобильных дорог общего пользования автомобильный парк вырос на 75%, что вызвало перегрузку автотрасс на 30%. Большинство дорог не соответствует нормативным требованиям и требуют постоянного ремонта, затрудняющего движение автотранспорта. Появление качественных платных автодорог увеличивает стоимость проезда пассажиров. Из-за отсутствия во многих регионах дорог с твердым покрытием примерно 10% процентов населения страны в межсезонье находятся в изоляции. Резко возросла стоимость одного километра полотна в том числе из-за коррупционной составляющей. Второй причиной является исчезновение "малой" авиации. Самолеты Ан-2, Ан-24, Як-40, осуществлявшие в СССР авиаперевозки в "глубинке" на коротких линиях, больше не выпускаются, а замены им нет. Объем пассажирских авиаперевозок на местных линиях с 1991 г. сократился в 50 раз [16].

Можно надеяться, что появление на Черноморских линиях обновленных "Комет", незабываемое путешествие на них, их привлекательность, прежде всего, для туристов, даст мощный толчок строительству морских СПК в России.

Заключение

Современное состояние пассажирских перевозок между населенными пунктами Черноморского побережья, побережья Балтийского моря, Тихоокеанского побережья Дальнего Востока России настоятельно требует возобновления строительства морских скоростных пассажирских судов средней вместимости, обладающих большой мореходностью и комфортом для пассажиров. Большие СПК, произведенные в России, могут быть востребованы в странах юго-восточной Азии. Новые суда, спроектированные и построенные в нашей стране дадут ощутимые экономические преимущества перевозчикам: снижение расхода топлива за счет применения новых эффективных двигателей и улучшения гидродинамических характеристик корпуса и подводных крыльев, снижение капитальных затрат, эксплуатационных расходов за счет применения современных технологий, использования новых композитных материалов. Новые проекты предполагают высокую экологическую безопасность окружающей среды за счет снижения вредных выбросов и уровня шума.

Литература

1. Макливи Р. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке / Р. Макливи.– пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1981. – 205 с.
2. Блюмин В.И. Транспортные суда на подводных крыльях / В.И. Блюмин, Л.А. Иванов, М.Б. Масеев – М.: Транспорт, 1964. – 256 с.

3. Злобин Г.П. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке. (По материалам иностранной печати) Справочное пособие / Г.П. Злобин, С.П. Смигельский.–Л.: Судостроение, 1976.– 263 с.
4. Маскалик А. И. Крылатые суда России: история и современность / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян, А.Я. Вольфензон, В.В. Иваненко. – СПб.: Судостроение, 2006.– 240 с.
5. Качур П.И. Ростислав Алексеев: Конструктор крылатых кораблей. Серия "Знаменитые конструкторы России. XX век" / П.И. Качур.– СПб.: Политехника, 2006.– 294 с.
6. Джон Р. Мейер. Летящие над водой: столетие судов на подводных крыльях. Популярная механика. 2007. № 11(61). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.popmech.ru/magazine/2007/61-issue/> (дата обращения: 12.05.2019)
7. Rodriguez Cantieri Navali. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rodriquez.it> (дата обращения: 12.05.2019)
8. Иконников В.В. Особенности проектирования и конструкции судов на подводных крыльях / В.В. Иконников, А.И. Маскалик . – Л: Судостроение, 1987.– 318 с.
9. Барышников С.О., Сухотерин М.В. О пассажирских судах на подводных крыльях // Речной транспорт (XXI век). 2019.– № 1(89). – С. 10-15
10. Barrington diesel club. [Электронный ресурс]. URL: <https://barringtondieselclub.co.za/detroit/6v53-detroit-diesel.html>. (дата обращения: 12.05.2019)
11. Boeing 929. [Электронный ресурс].URL: http://www.wikiwand.com/en/Boeing_929. (дата обращения: 12.05.2019)
12. Кoryтов Н.В. Скоростные катамараны "гибридных" типов. Катера и яхты. 2001. № 174. [Электронный ресурс].URL: http://www.barque.ru/shipbuilding/2001/speed_catamarans_hybrid_types. (дата обращения: 12.05.2019)
13. Российский Речной Регистр. Регистровая книга. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rivreg.ru/activities/class/reg-book/>. (дата обращения: 12.05.2019)
14. Морской завод "Алмаз". [Электронный ресурс]. URL: http://www.azsx.ru/katalog/morskoi_zavodalmaz.html (дата обращения: 12.05.2019)
15. Завод "Вымпел": [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vympel-rybinsk.ru/category/press-center>. (дата обращения: 12.05.2019)
16. Маркин С.Ю. Перспективы скоростного транспорта. [Электронный ресурс]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivi_skorostnogo_vodnogo_transporta.html. 24.07.2012. (дата обращения 26.05.2019)

References

1. McLeavy R. Hovercraft and Hydrofoils. Blandford Press, Poole Dorset. 1976.
2. Bljumin V.I., Ivanov L.A., & Maseev M.B. Transportnye suda na podvodnyh kryl'jah [Transport hydrofoils]. Moscow, Transport, 1964. 256 p.
3. Zlobin G.P., Smigel'skij S.P. Suda na podvodnyh kryl'jah i vozdušnoy podushke [hydrofoils and air cushion] (Po materialam inostrannoj pečhati) Spravochnoe posobie. Leningrad, Sudostroenie, 1976. 263 p.
4. Maskalik A. I., Nagapetjan R.A., Vol'fenzon A.Ja., & Ivanenko V.V. Krylatye suda Rossii: istorija i sovremennost' [Flying The Ship of Russia. History and modernity]. Saint-Petersburg, Sudostroenie, 2006. 240 p.
5. Kachur P.I. Rostislav Alekseev: Konstruktor krylatyh korablej [Designer of flying ships]. Serija "Znamenitye konstruktory Rossii. XX vek". Saint-Petersburg, Politehnika, 2006. 294 p.
6. Meyer, J.R. (2007). Letjashhie nad vodoj: stoletie sudov na podvodnyh kryl'jah. Populjarnaja mehanika, 11(61), [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.popmech.ru/magazine/2007/61-issue/> (data obrashhenija: 12.05.2019)
7. Rodriguez Cantieri Navali. [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.rodriquez.it> (data obrashhenija: 12.05.2019)
8. Ikonnikov V.V., Maskalik A.I. Osobennosti proektirovanija i konstrukcii sudov na podvodnyh kryl'jah [Features of design and construction of hydrofoils]. Leningrad, Sudostroenie, 1987. 318 p.
9. Baryshnikov, S.O., Sukhoterin, M.V. (2019). O passazhirskih sudah na podvodnyh kryl'jah. River transport (XXIst century). 1(89), 10-15.
10. Barrington diesel club. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://barringtondieselclub.co.za/detroit/6v53-detroit-diesel.html>. (data obrashhenija: 12.05.2019)
11. Boeing 929. [Jelektronnyj resurs].URL: http://www.wikiwand.com/en/Boeing_929. (data obrashhenija: 12.05.2019)
12. Korytov N.V. (2001). Skorostnye katamarany "gibridnyh" tipov. Power & sail boats. 174. [Jelektronnyj resurs].URL: http://www.barque.ru/shipbuilding/2001/speed_catamarans_hybrid_types. (data obrashhenija: 12.05.2019)
13. Rossijskij Rečnoj Registr. Registrovaja kniga. 2018. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.rivreg.ru/activities/class/reg-book/>. (data obrashhenija: 12.05.2019)
14. Morskoj zavod "Almaz". [Jelektronnyj resurs]. URL: http://www.azsx.ru/katalog/morskoi_zavodalmaz.html (data obrashhenija: 12.05.2019)
15. Zavod "Vympel": [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.vympel-rybinsk.ru/category/press-center>. (data obrashhenija: 12.05.2019)
16. Markin S.Ju. Perspektivy skorostnogo transporta. [Jelektronnyj resurs]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/perspektivi_skorostnogo_vodnogo_transporta.html. 24.07.2012. (data obrashhenija 26.05.2019)

УДК 629.5:539.42

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПРИМЕНЕННЫХ ПРИ РЕМОНТЕ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сергей Иванович Корягин

доктор технических наук, профессор, директор инженерно-технического института
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Олег Васильевич Шарков

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения и технических систем
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: osharkov@kantiana.ru

Николай Леонидович Великанов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Аннотация

Армированные полимерные покрытия позволяют во многих случаях применить экспресс методы ремонта без замены изношенных конструкций корпуса судна. Для оценки долговечности, надежности таких решений требуются методики расчета напряженного состояния полимерных покрытий, нанесенных на криволинейные металлические поверхности. В работе представлена методика оценки напряжений армированных полимерных покрытий судовых конструкций, подвергающихся воздействию изгиба и повышенных температур. При решении поставленной задачи принята гипотеза плоских сечений. Получены выражения для определения радиальных и меридиальных напряжений в двухслойном криволинейном судовом конструктивном элементе в случае чистого изгиба. Исследовано влияние изменения температуры на напряженное состояние полимерных покрытий. Учтены коэффициенты линейного расширения для покрытия и металла, радиус кривизны изогнутых балок. Получены зависимости радиальных и меридиальных напряжений от соотношения толщины металла к радиусу кривизны граничного слоя. Установлено, что важным фактором, влияющим на напряженное состояние, является отношение толщины металла к радиусу кривизны.

Ключевые слова: ремонт судовых конструкций, армированное полимерное покрытие, напряженное состояние.

THE STRESS STATE OF REINFORCED POLYMERIC COATINGS USED BY REPAIR OF SHIP HULL STRUCTURES

Sergey I. Koryagin

Dr.Sci.Tech., professor, director of the engineering and technology institute
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Oleg V. Sharkov

Dr.Sci.Tech., associate professor, professor of the department of engineering and technical systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: osharkov@kantiana.ru

Nikolay L. Velikanov

Dr.Sci.Tech., professor, head of the department of mechanical engineering and technical systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14
e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Abstract

Reinforced polymer coatings allow in many cases to apply express methods of repair without replacing worn-out structures of the hull. To assess the durability and reliability of such solutions, methods for calculating the stress state of polymer coatings applied to curved metal surfaces are required. The paper presents a method of stress assessment of reinforced polymer coatings of ship structures exposed to bending and high temperatures. Expressions for the determination of radial and meridial stresses in a two-layer curvilinear ship structural element in the case of pure bending are

obtained. The effect of temperature changes on the stress state of polymer coatings is studied. The coefficients of linear expansion for the roof and metal, the radius of curvature of curved beams are taken into account. The dependences of radial and medial stresses on the ratio of the metal thickness to the curvature radius of the boundary layer are obtained. It is established that an important factor affecting the stress state is the ratio of the metal thickness to the radius of curvature.

Key words: repair of ship structures, reinforced polymer coating, stress state.

Введение

В процессе эксплуатации судов наблюдается интенсивная коррозия элементов металлических конструкций и возникает необходимость их ремонта для восстановления прочности, жесткости и герметичности [1–12].

Особенно это характерно для рыболовных судов, так как суда большинства проектов, предназначенные для эксплуатации в умеренных широтах, зачастую эксплуатируются в тропических районах, температурный режим и влажность которых создают благоприятные условия для коррозии элементов [13–17].

О потерях металла от коррозии можно судить на примере судов типа БМРТ. Ориентировочный расчет по средним скоростям коррозионного изнашивания показывает, что безвозвратная потеря металла составляет в среднем 0,4–0,5 тонны в год на одно судно.

Традиционные методы повышения и восстановления несущей способности изношенных элементов из-за присущих им недостатков не могут удовлетворить в полной мере требования судоремонтного производства и судовладельцев.

На повышение и восстановление несущей способности элементов металлических конструкций рыболовных судов отвлекается до 25% судоремонтных мощностей заводов. Особенно большие материальные затраты связаны с выполнением ремонта корпуса путем замены изношенной конструкции на новую.

Поэтому специалисты, работающие в сфере ремонта и эксплуатации судов, ищут наиболее прогрессивные технические решения, направленные на разработку новых методов повышения и восстановления несущей способности, позволяющие повысить эффективность использования рыболовных судов.

К числу наиболее перспективных технологических процессов, направленных на совершенствование производства, экономию металла и снижение трудоемкости ремонтных работ, относится нанесение на элементы судовых металлических конструкций армированных полимерных покрытий [18–26].

Однако возможности такого рода покрытий до настоящего времени исследованы еще недостаточно; не изучена несущая способность деталей с покрытиями, а также области их рационального применения.

Особенностью большинства судовых конструктивных элементов является то, что они образованы криволинейными поверхностями.

Собственно корпус судна, выполненный по теоретическому чертежу, с геометрической точки зрения представляет собой сложную

криволинейную поверхность, образованную радиусами большой кривизны. Еще в более неблагоприятных условиях находятся полимерные покрытия, нанесенные на судовые конструкции, имеющими малый радиус кривизны – мачты, кнехты, погружающиеся крылья СПК и др.

Это в свою очередь оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние наносимых на металлическое основание полимерных покрытий. Следует также учитывать, что в процессе эксплуатации судовые металлические конструкции могут подвергаться воздействию ударных, вибрационных и температурных нагрузок.

Сведения о напряжениях в полимерном покрытии на криволинейной поверхности металла в литературе весьма ограничены. Существующие расчетные методики применимы в случае, когда композиция металл-покрытие в процессе формирования деформируется без изгиба. Но в реальных судовых конструктивных элементах участки с большой кривизной находятся, как правило, в условиях моментного напряженного состояния.

Это делает актуальным теоретические исследования с целью оценки напряженного состояния армированного полимерного покрытия на криволинейной поверхности металлических судовых конструктивных элементов.

1. Методика оценки напряженного состояния полимерных покрытий на криволинейных поверхностях

1.1. Расчетная схема и математические модели

Рассмотрим участки, достаточно удаленные от кромки покрытия, что позволяет пренебречь влиянием концентрации напряжений у кромки. Выделенный композитный криволинейный элемент единичной ширины ограничен двумя меридиональными сечениями и двумя сечениями, нормальными к меридиану, угол между которыми составляет $d\varphi$. Композитный элемент представляет собой двухслойный криволинейный брус (рис.1), кривизну которого на участке, соответствующем углу $d\varphi$, можно считать постоянной.

Рассмотрим два случая напряжений, возникающих в двухслойном бруске: при чистом изгибе и при изменении его температуры. Эти случаи соответствуют основным видам напряжений в покрытии – эксплуатационным и технологическим (остаточным). При решении поставленной задачи примем следующую гипотезу: плоское сечение остается плоским и после деформации двухслойного бруса, но оно может растягиваться или сжиматься в радиальном направлении. Это предположение дает возможность учесть радиальные напряжения σ_r .

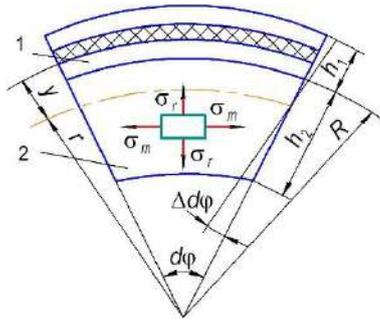


Рис. 1. Композиционный криволинейный конструктивный элемент: 1 – полимерное покрытие; 2 – металлическая конструкция.

Принятая гипотеза устанавливает зависимость [27]

$$\frac{d}{dr}(\varepsilon_m r) - \varepsilon_r = \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}, \quad (1)$$

где r – радиус кривизны изогнутой оси бруса; ε_r – относительные деформации, действующие в радиальном направлении (радиальная относительная деформация); ε_m – относительные деформации, действующие параллельно границе раздела металл-покрытие (меридиальная относительная деформация); $\Delta d\varphi$ – изменение угла в результате деформирования бруса.

Используя закон Гука [27, 28] для двухосного напряженного состояния и уравнения равновесия запишем

$$\sigma_m = \frac{d}{dr}(\varepsilon_r r) \quad (2)$$

и с учетом выражения (1), получаем:

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r}{dr} = E \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}, \quad (3)$$

где σ_m – меридиальное напряжение, E – модуль упругости материала криволинейного двухслойного бруса.

Обозначив полимерный слой криволинейного бруса индексом 1, а металлический - индексом 2 (рис. 1). Тогда решение уравнения (3) для радиальных напряжений запишем в виде:

$$\sigma_{ri} = \frac{A_i}{r^2} + B_i + \frac{1}{2} E_i \frac{\Delta d\varphi}{2d\varphi} \ln r, \quad (4)$$

где $i = 1, 2$.

Из уравнения равновесия получим уравнение для определения меридиальных напряжений в виде:

$$\sigma_{mi} = \frac{A_i}{r^2} + B_i + \frac{1}{2} E_i \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi} (1 + \ln r) \quad (5)$$

Для нахождения постоянных A_1, A_2, B_1, B_2 и $\Delta d\varphi/d\varphi$, используем граничные условия, заключающиеся в том, что на криволинейных поверхностях двухслойного бруса радиальные

напряжения $\sigma_r = 0$, на торцевых поверхностях напряжения сводятся к моменту M , и условие совместности деформаций полимерного и металлического слоев по поверхности их контакта.

1.2. Напряженное состояние при чистом изгибе

Получим выражения для определения радиальных и меридиальных напряжений в двухслойном криволинейном судовом конструктивном элементе в случае чистого изгиба.

Введем дополнительные обозначения: $\theta_1 = 1 + (h_1/R)$, $\theta_2 = 1 - (h_2/R)$, $\theta_3 = 1 + (h_2/R)$, $\vartheta_1 = 1 - \mu_1$, $\vartheta_2 = 1 - \mu_2$, $\rho = r/R$, $e = E_1/E_2$,

где h_1 и h_2 – толщина покрытия и металла, R – радиус кривизны граничного слоя, μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона для покрытия и металла соответственно, E_1 и E_2 – модули упругости при растяжении материала покрытия и металла.

После определения постоянных и решения уравнений (4) и (5), эти выражения запишутся в виде:

$$\sigma_{r1} = \frac{-Me^{\eta_1}}{N_1 h_1^2} \left[C_1 \left(\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\theta_1^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_1} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_{m1} = \frac{-Me^{\eta_1}}{N_1 h_1^2} \left[-C_1 \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\theta_1^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_1} + 1 \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{r1} = \frac{-Me^{\eta_2}}{N_1 h_2^2} \left[C_2 \left(\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\theta_2^2} \right) + \frac{1}{e} \ln \frac{\rho}{\theta_2} \right] \quad (8)$$

$$\sigma_{m2} = \frac{-Me^{\eta_2}}{N_1 h_2^2} \left[-C_2 \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\theta_2^2} \right) + \frac{1}{e} \left(1 + \ln \frac{\rho}{\theta_2} \right) \right] \quad (9)$$

Здесь:

$$N_1 = C_1 e \ln \theta_1 + C_2 e \ln \theta_2 + \frac{e}{4} [\theta_1^2 - \theta_2^2];$$

$$C_1 = \frac{(e \ln \theta_1 - \ln \theta_2) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}] + (\vartheta_1 \ln \theta_1 - \vartheta_2 \ln \theta_2) [1 - \theta_2^{-2}]}{e(1 - \theta_1^{-2}) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}] - (1 - \theta_2^{-2}) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}]};$$

$$C_2 = \frac{(1 - \theta_2^2) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}] + (\ln \theta_1 - e^{-1} \ln \theta_2) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}]}{e(1 - \theta_1^{-2}) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}] - (1 - \theta_2^{-2}) [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}]}$$

Положительным значением принято направление момента M , указанного на рис. 1. Индексы 1 и 2 в выражениях (6)–(9) относятся соответственно к слоям покрытия и металла.

1.3. Напряженное состояние при действии температуры

При изменении температуры двухслойного криволинейного бруса на величину Δt вследствие различия в механических свойствах материала слоев, в последних возникают технологические напряжения.

Введем обозначение $\chi = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t E_1$,

где α_1 и α_2 - коэффициенты линейного расширения для покрытия и металла соответственно.

Тогда зависимости (4) и (5) для определения радиальных и меридиальных напряжений примут вид:

$$\sigma_{r1} = \frac{\chi}{N_2} \left[\frac{D_1}{e} \left(\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\theta_1^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_1} \right]; \quad (10)$$

$$\sigma_{m1} = \frac{\chi}{N_2} \left[-\frac{D_1}{e} \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\theta_1^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_1} + 1 \right]; \quad (11)$$

$$\sigma_{r2} = \frac{\chi}{N_2} \left[D_2 \left(\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\theta_2^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_2} \right]; \quad (12)$$

$$\sigma_{m2} = N_2 \left[-D_2 \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\theta_2^2} \right) + \ln \frac{\rho}{\theta_2} + 1 \right]. \quad (13)$$

Здесь:

$$N_2 = \frac{D_1}{e} [1 + \mu_1 + \vartheta_1 \theta_1^{-2}] + D_2 [1 + \mu_2 + \vartheta_2 \theta_2^{-2}] + [(1 - \mu_1) \ln \theta_2 - (1 - \mu_1) \ln \theta_2];$$

$$D_1 = \frac{(1 - \theta_2^{-1}) [0,25(e(1 + \theta_1^2)) - 1 + \theta_2^2] - (1 + \theta_1^{-2}) \ln \theta_2 - (e \ln \theta_1 - \ln \theta_2) \ln \theta_2}{(1 - \theta_2^{-2}) \ln \theta_1};$$

$$D_2 = \frac{-(e \ln \theta_1 - \ln \theta_2) \ln \theta_1 + (0,25[e(\theta_1^2 - 1) + 1 - \theta_2^2]) (1 - \theta_1^{-2})}{(1 - \theta_2^{-2}) \ln \theta_2};$$

2. Результаты расчетов и дискуссия

Анализ полученных зависимостей (6)–(13) показывает, что основным геометрическим параметром, от которого зависит напряженное состояние полимерного покрытия, является отношение толщины металла h_2 к радиусу кривизны граничного слоя R .

На рис. 2–3 показан характер изменения радиальных и меридиальных напряжений в армированном полимерном покрытии в зависимости от безразмерного параметра h_2/R для покрытия, нанесенного на выпуклую

поверхность металлического элемента при условии: $\nu = E_1 = 0,1 E_2$; $\mu_1 = 0,15$; $\mu_2 = 0,35$.

На рис. 2 приведены результаты расчетов по зависимостям (7), (9), (11) и (13), описывающие радиальные напряжения при условиях чистого изгиба и изменения температуры.

Из анализа кривых следует, что растягивающие напряжения σ_{r1} , нормальные адгезионной поверхности, увеличиваются с ростом кривизны. Это создает опасность нормального отрыва покрытия от металлической поверхности. Вместе с тем меридиальные напряжения σ_{m1} на свободной поверхности покрытия уменьшаются, что снижает сопротивляемость покрытия растягивающим деформациям. Данный характер изменения напряжений наблюдается как при чистом изгибе, так и в условиях изменения температуры.

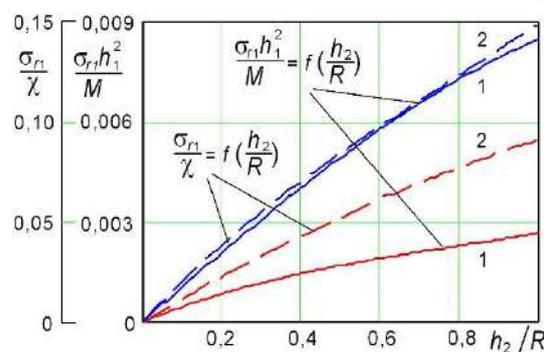


Рис. 2. Зависимость радиальных напряжений от соотношения толщины металла к радиусу кривизны граничного слоя: 1 – $h_1/h_2 = 0,1$; 2 – $h_1/h_2 = 0,2$.

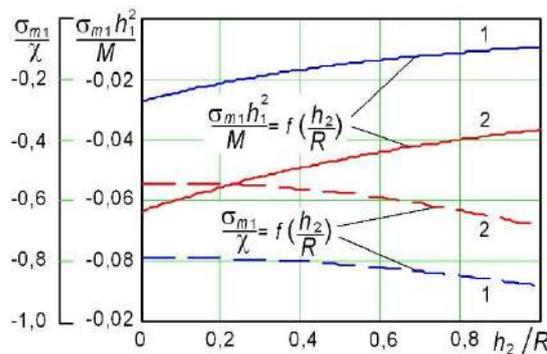


Рис. 3. Зависимость меридиальных напряжений от соотношения толщины металла к радиусу кривизны граничного слоя: 1 – $h_1/h_2 = 0,1$; 2 – $h_1/h_2 = 0,2$.

Заключение

В предположении выполнения гипотезы плоских сечений получена математическая модель – зависимости (6)–(13), описывающие напряженное состояние полимерного покрытия.

При определении радиальных и меридиальных напряжений в двухслойном криволинейном судовом конструктивном элементе учтен чистый изгиб и технологические напряжения, возникающие

в материалах слоев двухслойного криволинейного бруса при изменении температуры.

Согласно математической модели, отношение толщины металла к радиусу кривизны граничного слоя является важнейшим параметром, от которого зависит распределение напряжений в полимерном покрытии.

Растягивающие напряжения, нормальные адгезионной поверхности, увеличиваются с ростом кривизны, что может привести к нормальному отрыву покрытия от металлической поверхности. Напряжения на свободной поверхности покрытия уменьшаются, что снижает сопротивляемость покрытия растягивающим деформациям

Литература

31. Jaiyos N., Viyanit E., Mungsantisuk P. Corrosion behaviors of ship structural steel in simulated marine tidal environment // *Journal of metals materials and minerals*. 2019. V.29(2). Pp. 27-36.
32. Zayed A., Garbatov Y., Guedes Soares C. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions // *Ocean engineering*. 2018. V.163. Pp. 299-306.
33. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier // *Journal of marine science and application*. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
34. Velikanov N.L., Sharkov O.V. Modeling residual welding voltages in ship hull structures // *Marine intellectual technologies*. 2018. V.3(4). Pp. 31–35.
35. Jakubowski M. Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship structures. Part I. Pitting corrosion of ship structures // *Polish maritime research*. 2014. V.21(1). Pp. 62-69.
36. Стогний Г.В. Перспективы исследования контактной коррозии металлов в современном корабле- и судостроении // *Водный транспорт*. 2013. №2(17). С. 43-51.
37. Мионов А.С., Новиков В.В. О коррозионном износе и повреждаемости судовых конструкций // *Морские интеллектуальные технологии*. 2014. Т.1. №3(25). С.63-70.
38. Рублёв И.И. Разработка экологически безопасного наполнителя, предназначенного для повышения коррозионной устойчивости корпусов морских судов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2015. №6(34). С. 121-126.
39. Белов О.А. Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2017. №3(118). С. 115-120.
40. Бугакова Н.Ю., Гольденберг И.З. Расчетный прогноз изменений коррозионных разрушений подводной наружной обшивки судна после увеличения ее толщины в "слабых местах" // *Эксплуатация морского транспорта*. 2009. №4(58). С. 52-59.
41. Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А. Повышение стойкости к коррозии судовых металлоконструкций // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т.2. №4(38). С. 69-75.
42. Белов О.А., Клементьев С.А., Дороганов А.Б. Коррозионные процессы как фактор снижения безопасности эксплуатации морских судов // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2017. №1(19). С. 123-126.
43. Prestrelo L., Oliveira R., Vianna M. A new proposal to classify small fishing vessels to improve tropical estuarine fishery management // *Fisheries research*. 2019. V.211. Pp. 100-110.
44. Zhaoqun S., Rong W., Yugui Z. Analysis on technical efficiency and influencing factors of fishing vessels: a case study of Haizhou Bay, China // *Iranian journal of fisheries sciences*. 2018. V.17(3). Pp. 516-532.
45. Турчанинова Т.В., Храпов В.Е. Особенности строительства рыбопромысловых судов на отечественных судостроительных предприятиях // *Арктика: общество и экономика*. 2013. №9(9). С. 098-105.
46. Нго Д.Т. О рыболовных судах наливного типа для удаленных районов прибрежного рыболовства Вьетнама // *Морские интеллектуальные технологии*. 2013. №3(21). С. 15-18.
47. Кухоренко К.Г. Перспективы российского океанического рыболовства в Атлантике и ЮВТО // *Рыбное хозяйство*. 2012. № 2. С. 32-33.
48. Zhang Z.-H., Chen Y., Huang X.-C. Underwater explosion approximate method research on ship with polymer coating // *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part M. Journal of engineering for the maritime environment*. 2017. V.231(2). Pp. 384-394.
49. Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Evaluation of polymer coatings crack resistance used in the repair of shipboard structures // *Marine intellectual technologies*. 2019. V.2(2). Pp. 39–44.
50. Evgren F., Hertzberg T. Fire safety regulations and performance of fibre-reinforced polymer composite ship structures // *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part M. Journal of engineering for the maritime environment*. 2017. V.231(1). Pp. 46-56.
51. Akimov A.V., Buketov A.V., Sapronov A.A. Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair // *Composites-mechanics computations applications*. 2019. V.10(2). Pp. 117-134.
52. Niklas K., Kozak J. Experimental investigation of steel-concrete-polymer composite barrier for the ship internal tank construction // *Ocean engineering*. 2016. V.111. Pp. 449-460.
53. Емельянов М.Д., Соминская Э.В. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. 2017. №48-49. С. 77-84.
54. Францев М.Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова // *Судостроение*. 2010. №5(792). С. 14-18.
55. Исаев А.А. Перспективные промысловые суда из полимерного композиционного материала // *Судостроение*. 2003. №1(746). С. 19-20.
56. Безруков А.А., Абрамова А.А., Лысенко А.А. Композиционные материалы в современном судостроении // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки*. 2015. №3. С. 39-44.

57. Maceri A. Theory of Elasticity. New York: Springer Science & Business Media, 2010. 716 p.
58. Ляв А. Математическая теория упругости. Москва: Директмедиа Паблишинг, 2013. 671 с.

References

31. Jaiyos N., Viyanit E., Mungsantisuk P. (2019) Corrosion behaviors of ship structural steel in simulated marine tidal environment. *Journal of metals materials and minerals*. V.29(2). Pp. 27-36.
32. Zayed A., Garbatov Y., Guedes Soares C. (2018) Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions. *Ocean engineering*. V.163. Pp. 299-306.
33. Van T.V., Yang P. (2017) Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier. *Journal of marine science and application*. V.16(3). Pp. 334-343.
34. Velikanov N.L., Sharkov O.V. (2018) Modeling residual welding voltages in ship hull structures. *Marine intellectual technologies*. V.3(4). Pp. 31–35.
35. Jakubowski M. (2014) Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship structures. Part I. Pitting corrosion of ship structures. *Polish maritime research*. V.21(1). Pp. 62-69.
36. Stognii G.V. (2013) Perspektivy issledovaniya kontaktnoi korrozii metallov v sovremennom korable- i sudo-stroenii. *Vodnyi transport*. No2(17). Pp. 43-51.
37. Mironov A.S., Novikov V.V. (2014) O korroziionnom iznoshе i povrezhdaemosti sudovykh konstruksii. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. V.1. No3(25). Pp.63-70.
38. Rublev I.I. (2015) Razrabotka ekologicheskii bezopasnogo napolnitelya, prednaznachennogo dlya povysheniya kor-roziionnoi ustoiчивosti korpusov morskikh sudov. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. No6(34). Pp. 121-126.
39. Belov O.A. (2017) Sovremennoe sostoyanie organizatsii kompleksnoy zashchity metallicheskih korpusov korabley i sudov ot korrozii. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. No3(118). Pp. 115-120.
40. Bugakova N.Yu., Gol'denberg I.Z. (2009) Raschetnyi prognoz izmenenii korroziionnykh razrushenii podvodnoi naruzhnoi obshivki sudna posle uvelicheniya ee tolshchiny v "slabykh mestakh". *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. No4(58). Pp. 52-59.
41. Verevkin V.I., Igushev V.F., Teryusheva S.A. (2017) Povyslenie stoikosti k korrozii sudovykh metallokonstruksii. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. V.2. №4(38). Pp. 69-75.
42. Belov O.A., Klement'ev S.A., Doroganov A.B. (2017) Korroziionnye protsessy kak faktor snizheniya bezopasnosti ekspluatatsii morskikh sudov. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy*. No1(19). Pp. 123-126.
43. Prestrelo L., Oliveira R., Vianna M. (2019) A new proposal to classify small fishing vessels to improve tropical estuarine fishery management. *Fisheries research*. V.211. Pp. 100-110.
44. Zhaoqun S., Rong W., Yugui Z. (2018) Analysis on technical efficiency and influencing factors of fishing vessels: a case study of Haizhou Bay, China. *Iranian journal of fisheries sciences*. V.17(3). Pp. 516-532.
45. Turchaninova T.V., Khrapov V.E. (2013) Osobennosti stroitel'stva rybopromyslovykh sudov na otechestvennykh sudostroitel'nykh predpriyatiyakh. *Arktika: obshchestvo i ekonomika*. No9(9). Pp. 098-105.
46. Ngo D.T. (2013) O rybolovnykh sudakh nalivnogo tipa dlya udalennykh raionov pribrezhnogo rybolovstva V'etnama. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. No3(21). Pp. 15-18.
47. Kukhorenko K.G. (2012) Perspektivy rossiiskogo okeanicheskogo rybolovstva v Atlantike i YuVTO. *Rybnoe khozyaistvo*. No2. Pp. 32-33.
48. Zhang Z.-H., Chen Y., Huang X.-C. (2017) Underwater explosion approximate method research on ship with polymer coating. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part M. Journal of engineering for the maritime environment*. V.231(2). Pp. 384-394.
49. Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. (2019) Evaluation of polymer coatings crack resistance used in the repair of shipboard structures. *Marine intellectual technologies*. V.2(2). Pp. 39–44.
50. Evgren F., Hertzberg T. (2017) Fire safety regulations and performance of fibre-reinforced polymer composite ship structures. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part M. Journal of engineering for the maritime environment*. V.231(1). Pp. 46-56.
51. Akimov A.V., Buketov A.V., Sapronov A.A. (2019) Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair. *Composites-mechanics computations applications*. V.10(2). Pp. 117-134.
52. Niklas K., Kozak J. (2016) Experimental investigation of steel-concrete-polymer composite barrier for the ship internal tank construction. *Ocean engineering*. V.111. Pp. 449-460.
53. Emel'yanov M.D., Sominskaya E.V. (2017) Primenenie kompozitsionnykh materialov pri remonte korpusov morskikh sudov. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva*. No48-49. Pp. 77-84.
54. Frantsev M.E. (2010) Proektnye osobennosti zarubezhnykh promyslovykh sudov iz kompozitsionnykh materialov dlya pribrezhnogo lova. *Sudostroenie*. No5(792). Pp. 14-18.
55. Isaev A.A. (2003) Perspektivnye promyslovye suda iz polimernogo kompozitsionnogo materiala. *Sudostroenie*. No1(746). Pp. 19-20.
56. Bezrukov A.A., Abramova A.A., Lysenko A.A. (2015) Kompozitsionnye materialy v sovremennom sudo-stroenii. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 1: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. No3. Pp. 39-44.
57. Maceri A. Theory of Elasticity. New York: Springer Science & Business Media, 2010. 716 p.
58. Lyav A. Matematicheskaya teoriya uprugosti. Moskva: Direktmedia Publishing, 2013. 671 p.

УДК 629.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ СБОРКИ НИЖНЕГО РЕДУКТОРА ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫХ КОЛОНОК

Егор Васильевич Давыдов

магистрант кафедры технологии металлов и машиностроения
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
филиал САФУ в г. Северодвинске
164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6
e-mail: egoregoregorddd@yandex.ru

Евгений Владимирович Фомин

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и машиностроения
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
филиал САФУ в г. Северодвинске
164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6
e-mail: e.fomin@narfu.ru

Александр Владимирович Фомин

кандидат технических наук, доцент кафедры океанотехники и энергетических установок
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
филиал САФУ в г. Северодвинске
164500, Северодвинск, Архангельская область, улица Капитана Воронина, 6
e-mail: a.fomin@narfu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты разработки универсальной сборочной рамы (УСР) необходимой для сокращения цикла финишной сборки нижнего редуктора движительно-рулевых колонок Российского производства типа ДРК2500, ДРК3500, ДРК4500Н и ДРК8500.

В результате исследований была проанализирована штатная технология финишной сборки нижнего редуктора на базе ДРК4500Н и выявлены ее недостатки. Разработана собственная технология финишной сборки нижнего редуктора ДРК4500Н с применением УСР, позволяющая обеспечить надежное соединение гребного винта с валом нижнего редуктора при использовании горизонтальной схемы напрессовки и исключить трудоемкие операции кантовки изделий. Прочностные расчеты УСР показали возможность ее применения для финишной сборки всей линейки движительно-рулевых колонок.

Установлено, что разработанная технология с применением УСР позволит обеспечить более высокую производительность и точность сборки, повысить безопасность выполняемых работ и сократить общий цикл финишной сборки.

Ключевые слова: универсальная сборочная рама, финишная сборка нижнего редуктора, ДРК4500Н, винто-рулевая колонка, технология сборки.

IMPROVEMENT TECHNOLOGY FINISH ASSEMBLY LOWER GEAR PROPULSION AND STEERING COLUMNS

Egor V. Davydov

the graduate student of department of metal technology and mechanical engineering
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk
Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation
e-mail: egoregoregorddd@yandex.ru

Evgeny V. Fomin

PhD (Engineering), Associate Professor, Head of department of metal technology and mechanical engineering
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk
Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation
e-mail: e.fomin@narfu.ru

Alexandr V. Fomin

PhD (Engineering), Associate Professor of department of ocean technology and power plants
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, NArFU branch in Severodvinsk
Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk Arkhangelsk region 164500, Russian Federation
e-mail: a.fomin@narfu.ru

Abstract

The paper presents the results of a universal assembly of the frame (UFA) required to reduce the final assembly cycle lower gear rudder-Russian production DRK2500, DRK3500, DRK4500N and DRK8500.

The studies analyzed the staffing technology finishing assembly of the lower gear based DRK4500N and revealed its shortcomings. Developed a proprietary technology finishing assembly of the lower gear DRK4500N using UFA, allowing to provide a secure connection to the propeller shaft of the lower gear

when using a horizontal press-on circuit and eliminate the labor-intensive manufacturing operations tilting. Strength calculations SPM showed the possibility of its application for final assembly of the entire line of rudder-propeller.

It was found that the developed technology with the use of the UFA will provide better performance and accuracy of the assembly, increases the safety of the work and reduces the overall cycle of the finishing assembly.

Key words: Universal frame assembly, finishing the assembly of the lower gear, DRK4500N, propeller-steering column, assembly technology.

Введение

Существующая в настоящее время на АО «ЦС «Звездочка» технология финишной сборки нижнего редуктора ДРК 4500Н, представленная на рисунке 1, включает следующие этапы: кантовку и установку корпуса нижнего редуктора (операция 1); вертикальную напрессовку гребного винта, установку пилонов, обтекателей и кожухов (операция 2); кантовку нижнего редуктора в положение «Обтекателем вверх» (операция 3) и установку его в насадку (операция 4).

Данная технология имеет ряд недостатков:

- при вертикальной напрессовке крупногабаритного гребного винта на вал существует вероятность появления дефектов в соединении;
- многочисленная кантовка нижнего редуктора существенно повышает погрешность сборки, увеличивается трудоемкость финишной сборки и уменьшает уровень безопасности сборки.

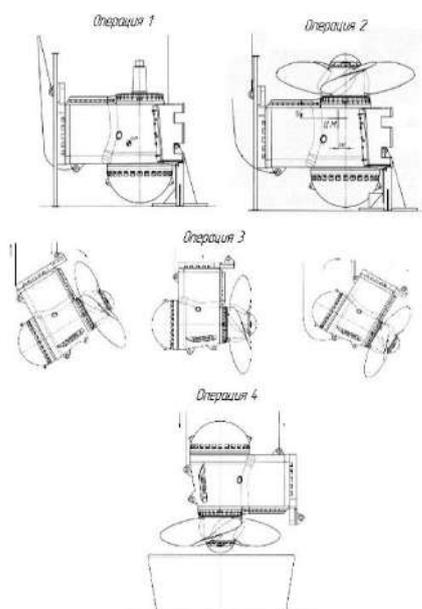


Рис. 1. Технология финишной сборки, применяемая в настоящее время на АО «ЦС «Звездочка»

Для устранения указанных недостатков необходимо:

- применить горизонтальную схему напрессовки гребного винта, которая хорошо изучена и проработана на практике, что обеспечит надежное соединение гребного винта с валом нижнего редуктора;
- применить схему сборки, в которой нижний редуктор неподвижен и жестко зафиксирован на своем сборочном месте, что позволит исключить многочисленную кантовку, а также обеспечить

технику безопасности при сборке нижнего редуктора ДРК4500Н.

Для решения этих задач необходимо усовершенствовать существующую технологию финишной сборки нижнего редуктора ДРК4500Н, а именно разработать специальные средства технологического оснащения, которые обеспечат высокую производительность и точность сборки, а также безопасность выполняемых работ. Данные средства технологического оснащения должны быть переналаживаемыми и применяться также для сборки ДРК2500, ДРК3500 и ДРК8500.

1. Разработка универсальной сборочной рамы

В разработанной УСР для усовершенствованного процесса финишной сборки нижних редукторов ДРК учтены следующие параметры [1], [2]:

- масса нижних редукторов (рама должна выдержать нагрузку самой тяжелой ДРК после ее окончательной сборки, в нашем случае это ДРК8500);
- длина рамы (она должна меняться в зависимости от собираемой на ней ДРК и подходить для самого длинного корпуса редуктора);
- диаметры посадочных мест (в проектируемой раме должны быть предусмотрены сменные пластины, благодаря которым любой из корпусов нижних редукторов, имеющий сферические поверхности, правильно базируется на УСР);
- высота нижнего редуктора над полом цеха (необходимо для обеспечения свободного монтажа гребных винтов и предусмотренных насадок к корпусу редукторов).

На рисунке 2 показан общий вид спроектированной универсальной сборочной рамы, состоящей из двух основных частей – нижней и верхней.

Нижняя часть представляет собой два вертикальных стальных листа толщиной 40 мм и высотой 1000 мм, в верхней части которых предусмотрено посадочное место для съемных насадок, а также поперечных удерживающих балок квадратного профиля 100x100 мм с толщиной стенки 10 мм с одной стороны и удерживающих балок квадратного профиля 90x90 мм с толщиной стенки 8 мм с другой стороны. Разные балки необходимы для того, чтобы регулировать общую длину сборочной рамы в пределах от 1260 до 1990 мм. Регулирование происходит за счет того, что балки 90x90 мм создают соединения с балками 100x100мм, на гранях которых предусмотрены отверстия под крепеж, необходимый для фиксации заданной длины рамы.

Верхняя часть универсальной сборочной рамы представляет собой комплект стандартных

съемных насадок для каждого типа ДРК, которые крепятся к нижней части рамы болтами М20.

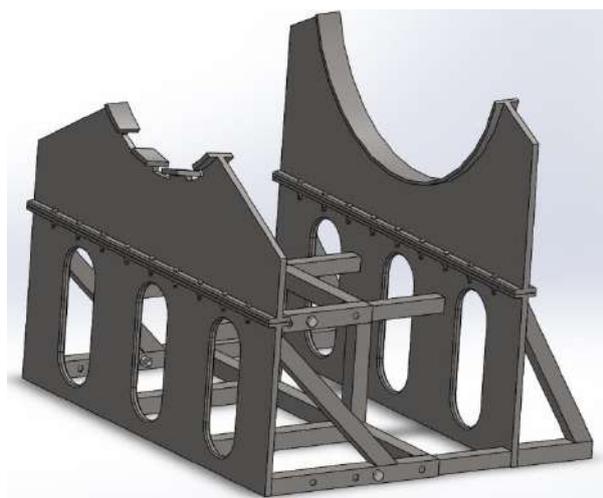


Рис. 2. Общий вид универсальной сборочной рамы

В связи с большими массо-габаритными характеристиками ДРК8500 (общая длина нижнего редуктора с гребным винтом составляет 6565 мм) и смещением центра масс за пределы корпуса нижнего редуктора после напрессовки гребного винта, в конструкции УСР предусмотрена дополнительная опора (рис. 3), которая находится в районе передней части обтекателя ДРК8500. Дополнительная опора крепится нижней частью к корпусу УСР, а ее верхняя часть соединяется с передней насадкой.



Рис. 3. Общий вид универсальной сборочной рамы с дополнительной опорой

Таким образом, разработанная универсальная сборочная рама позволит установить на нее нужный для финишной сборки тип ДРК. Сама регулировка сборочной рамы и ее подготовка производится отдельно от технологического процесса сборки нижнего редуктора, что позволит сократить время финишной сборки нижнего редуктора.

2. Расчет на прочность универсальной сборочной рамы

При расчете на прочность УСР были использованы основные принципы и положения курса предмета «Сопротивление материалов», а

также гипотезы и допущения, принятые в данной науке (такие, например, как гипотеза сплошности и однородности материала, гипотеза об изотропности, гипотеза об идеальной упругости и т.д.) [3].

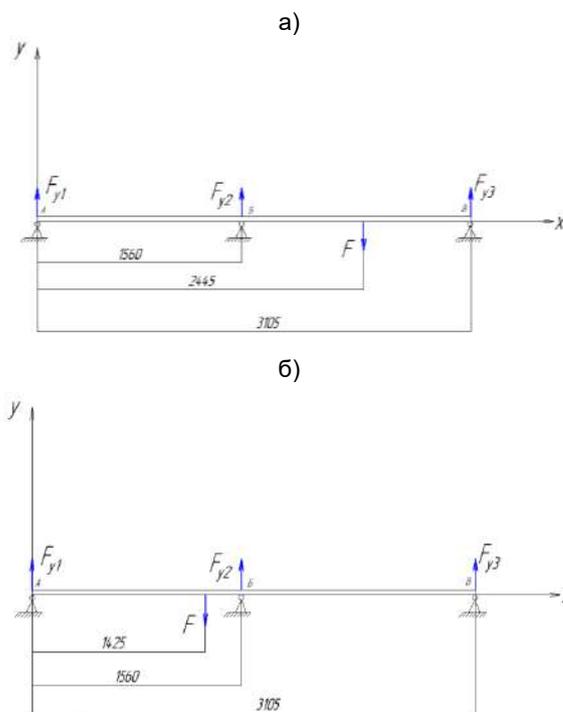


Рис. 4. Расчетные схемы для определения сил реакций опор для ДРК8500: а) в начале финишной сборки; б) в конце финишной сборки

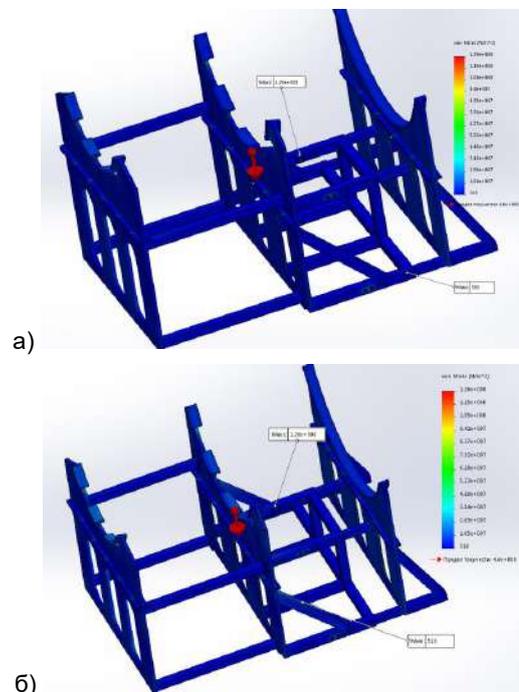


Рис. 5. Эпюра напряжения УСР для ДРК8500: а) в начале финишной сборки; б) в конце финишной сборки

Перед проведением прочностного расчета в SolidWorks Simulation были определены силы реакций опор, которые возникают на посадочных

местах насадок в двух случаях: редуктор в начале финишной сборки и редуктор в сборе. При составлении расчетных схем учитывалась масса нижних редукторов и их центр масс в начале и в конце финишной сборки. Расчетные схемы для определения сил реакций опор при сборке наиболее тяжелой ДРК8500 представлены на рисунке 4. Для ДРК2500, ДРК3500 и ДРК4500Н схемы соответственно подобны.

После определения всех сил реакций опор произведен прочностной расчет УСП, настроенный для каждого типа ДРК, в SolidWorks Simulation [4], [5]. Эпюры напряжений и перемещений для ДРК8500 представлены на рисунках 5 и 6 соответственно. Эпюры прочностных расчетов для ДРК2500, ДРК3500 и ДРК4500Н подобны.

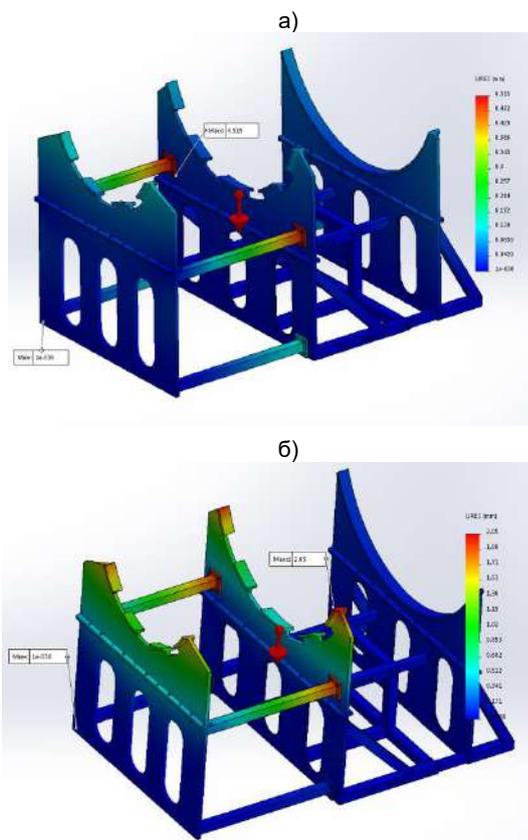


Рис. 6. Эпюра перемещений УСП для ДРК8500: а) в начале финишной сборки; б) в конце финишной сборки

Результаты всех прочностных расчетов представлены в таблице 1.

3. Технология финишной сборки с использованием разработанной УСП на примере ДРК4500Н

Технология финишной сборки ДРК4500Н с использованием универсальной сборочной рамы состоит из следующих этапов:

- установка нижнего редуктора ДРК4500Н на УСП (рис. 7а);

- напрессовка гребного винта (рис. 7б);
- установка обтекателей, кожухов и пилонов на корпус нижнего редуктора (рис. 7в, 7г);
- установка насадки гребного винта (рис. 7д).

Наладка и настройка универсальной сборочной рамы происходит на этапе проведения испытаний на стенде ДРК4500Н, тем самым, время установки и настройки УСП не входит в технологический процесс финишной сборки нижнего редуктора, тогда как время на установку и сборку технологической оснастки согласно рисунку 1 включено в штатную технологию финишной сборки.

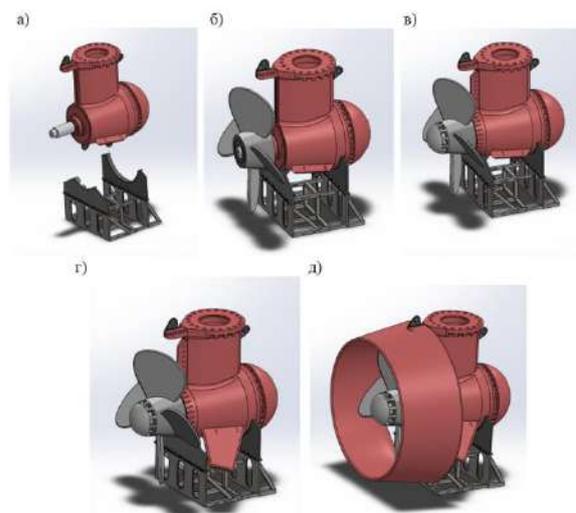


Рис. 7. Технология финишной сборки нижнего редуктора ДРК4500Н с применением универсальной сборочной рамы

Напрессовка гребного винта на вал движительно-рулевой колонки – горизонтальная, что позволяет минимизировать вероятность появления дефектов в соединении при сборке. В результате чего повышается качество сборки, а с учетом того, что горизонтальный метод напрессовки гребного винта хорошо изучен и проверен на практике [6], [7], общая трудоемкость процессов напрессовки и установки гребного винта сократится.

Затрачиваемое время на выполнение операций установки обтекателей, кожухов, пилонов на корпус нижнего редуктора ДРК4500Н остается таким же как и в штатной технологии.

Различие будет заключаться в установке насадки гребного винта. В штатной технологии (рис. 1) кантуется весь нижний редуктор ДРК4500Н в насадку, а в разработанной технологии с универсальной сборочной рамой, наоборот, насадка кантуется и устанавливается на корпус ДРК4500Н. В связи с тем, что масса насадки гораздо меньше корпуса нижнего редуктора ДРК4500Н в сборе с гребным винтом, то и время на выполнение кантовки и установки насадки на корпус нижнего редуктора будет меньше.

Таблица 1

Сводная таблица по результатам прочностного расчета УСР для ДРК

№ п/п	Характеристики УСР		ДРК2500	ДРК3500	ДРК4500Н	ДРК8500
1	Масса УСР, кг		2330	2643	2674	3680
2	Расстояние между опорами, мм		1260	1990	1687	1560/1545
3	Материал		Сталь 20 ГОСТ 1577-93 (410 МПа)			
4	Количество крепежных элемент., шт	M20	18	18	18	43
		M36	8	8	8	8
5	Количество насадок, шт		2			3
6	Масса устанавливаемого нижнего редуктора, кг	В начале сборки	11460	54000	31800	84000
		В конце сборки	15800	65150	58285	104100
7	Нагрузки на опоры УСР, кН (F_1 передняя/ F_2 задняя насадка)	В начале сборки	$F_1 = 38,127 \div 5,306$; $F_2 = 78,254$	$F_1 = 167,14 \div 37,6$; $F_2 = 377,2$	$F_1 = 115,47 \div 18,06$; $F_2 = 203,96$	$F_1 = 193,6 \div 36,799$; $F_2 = 225,872 \div 50,8$; $F_3 = 430$
		В конце сборки	$F_1 = 88,664 \div 12,32$; $F_2 = 70,222$	$F_1 = 352,9 \div 79,37$; $F_2 = 307,744$	$F_1 = 507,26 \div 79,13$; $F_2 = 82,18$	$F_1 = 244,648 \div 46,48$; $F_2 = 277,2 \div 62,371$; $F_3 = 530$
8	Наибольшее напряжение, Мпа	В начале сборки	139	115	253	125
		В конце сборки	139	116	250	126
9	Наибольшие перемещения, мм	В начале сборки	0,094	0,959	0,585	0,515
		В конце сборки	0,209	2,03	2,44	2,05
10	Минимальный коэффициент запаса прочности	В начале сборки	3,3	4	2,49	3,7
		В конце сборки	3,3	3,97	1,82	3,7

Заключение

Установлено, что в штатной технологии финишной сборки ДРК4500Н существует ряд недостатков. С целью устранения этих недостатков были определены направления совершенствования существующей технологии и разработана универсальная сборочная рама.

С помощью моделирования процесса сборки в программном комплексе SolidWorks Simulation был произведен прочностной расчет технологической оснастки, настроенной на ДРК2500, ДРК3500, ДРК4500Н и ДРК8500, который показал, что при заданных нагрузках использование УСР для финишной сборки допустимо.

Таким образом, совершенствование технологии финишной сборки нижнего редуктора различных типов движительно-рулевых колонок связано с применением такой технологической последовательности сборки, при которой обеспечиваются принципы единства и постоянства баз. За счет этого сокращается цикл финишной сборки нижнего редуктора движительно-рулевых колонок, повышается качество сборки и ее безопасность. С учетом того, что УСР можно использовать для сборки различных типов движительно-рулевых колонок, рентабельность ее изготовления, по сравнению с изготовлением технологической оснастки для каждого изделия отдельно, возрастает.

Литература

1. Войткунский Я. Н. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1 / Я. Н. Войткунский и другие. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
2. Иванченко А. А. Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении / А. А. Иванченко, В. А. Шишкин, В. Н. Окунев // Вестник Государственного Университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. Выпуск № 4 (38). 2016. – С. 156 – 176.
3. Дарков А. В. Строительная механика: учеб. для строит. спец. вузов / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 607 с.
4. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2012. – 242 с.
5. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2010. – 784 с.

6. Даниловский А. Г. Оптимизация судового пропульсивного комплекса: монография / А. Г. Даниловский, М. А. Орлов, И. А. Боровикова. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2007. — 175 с.
7. Голубев Н. В. Проектирование энергетических установок морских судов / Н. В. Голубев. — Л.: Судостроение, 1980. — 311 с.

References

1. Voytkunskiy Ya. N. *Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. Tom 1.* Ya. N. Voytkunskiy i drugie. L.: Sudostroenie, 1985. 768 p.
2. Ivanchenko A. A. *Obzor opyta sovershenstvovaniya konstruksii i primeneniya dvizhitel'nykh sistem v sovremennom sudostroenii.* A. A. Ivanchenko, V. A. Shishkin, V. N. Okunev. Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. Vypusk № 4 (38), 2016, pp. 156 – 176.
3. Darkov A. V. *Stroitel'naya mekhanika: ucheb. dlya stroit. spets. vuzov.* A. V. Darkov, N. N. Shaposhnikov. 8-e izd., pererab. i dop. M.: Vysshaya shkola, 1986. 607 p.
4. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi.* A. A. Alyamovskiy. SPb.: Izd-vo «BKHV-Peterburg», 2012. 242 p.
5. Alyamovskiy A.A. *COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstruksiy na prochnost' v srede SolidWorks.* A. A. Alyamovskiy. M.: Izd-vo DMK Press, 2010. 784 p.
6. Danilovskij, A. G., M. A. Orlov, and I. A. Borovikova. *Optimizacija sudovogo propulsivnogo kompleksa: monografija.* SPb.: Izd. centr SPbGMTU, 2007. 175 p.
7. Golubev, N. V. *Proektirovanie jenergeticheskikh ustanovok morskikh sudov.* L.: Sudostroenie, 1980. 311 p.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.431

ПРИМЕНЕНИЕ УСИЛЕННОГО ЦИКЛА МИЛЛЕРА В СУДОВЫХ ДВС

Дмитрий Сергеевич Ватолин

аспирант

Государственный университет морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова

198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: hohol23rus@mail.ru

Аннотация

В виду всё более ужесточающихся экологических норм, разработчика судовых дизельных двигателей приходится искать различные технические решения для обеспечения их выполнения. Применение усиленного цикла Миллера является одним из способов уменьшения содержания оксидов азота в отработавших газах двигателя. Однако его применение связано с определенными техническими проблемами, способы решения которых и описаны в данной статье. Произведено обоснование необходимости применения двухступенчатого турбонаддува в сочетании с системами изменения фаз газораспределения, а так же рассмотрена возможность их применения в концепции судового двухтопливного дизельного двигателя и возможность его работы на винт фиксированного шага в результате подобной модернизации. Приведены примеры технических решений ведущих компаний в области судового двигателестроения. Как результат данного обзора, выполнены обоснованные предположения о дальнейшем развитии двигателей работающих по усиленному циклу Миллера и об оправданности затрат связанных с исследованиями и разработкой данной технологии.

Ключевые слова: усиленный цикл Миллера, ДВС, двухтопливный дизельный двигатель, изменяемые фазы газораспределения, двухступенчатый турбонаддув

APPLICATION OF THE SUPERCHARGED MILLER CYCLE IN MARINE ICE

Dmitry S. Vatolin

post-graduate student

of State University of Maritime and River Fleet named after adm. S. O. Makarov

198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7

e-mail: hohol23rus@mail.ru

Abstract

In view of the increasingly strict environmental regulations, designers of marine diesel engines have to look for various technical solutions to ensure their implementation. The use of supercharged Miller cycle is one of the ways to reduce the content of nitrogen oxides in engine exhaust gases. However, its use is associated with certain technical problems, the solutions to which are described in this article. The substantiation of the need to use a two-stage turbo-supercharging in conjunction with variable valve timing systems was made, and the possibility of using them in the concept of a marine dual-fuel diesel engine and the possibility of its operation on a fixed-pitch propeller as a result of such modernization were considered. Examples of technical solutions of leading companies in the field of marine engine building are given. As a result of this review, reasonable assumptions were made about the further development of the engines working on the supercharged Miller cycle and about the justification for the costs associated with the research and development of this technology.

Key words: Supercharged Miller cycle, ICE, dual-fuel diesel engine, variable valve timing, two-stage turbocharging

Введение

К судовым дизельным двигателям уже давно предъявляют серьезные требования в плане экономичности, более высокой эффективности, возможности использования более дешевых сортов топлива и низкого уровня создаваемого шума. В период между 1960 и 2016 годами экономичность дизельных двигателей увеличилась более чем на 50 г/(кВт·ч). Основными факторами снижения расходов топлива стали увеличение

максимального давления сгорания (P_{max}) и оптимизация процессов газообмена, что является результатом совершенствования технологий турбонаддува.

К турбокомпрессорам предъявляются все новые и новые требования в области более высокой степени повышения давления и КПД, а также к уменьшению инерции ротора. Современные системы турбонаддува являются изобарными, как и для наддувочного воздуха, так и для отработавших газов (рис. 1).

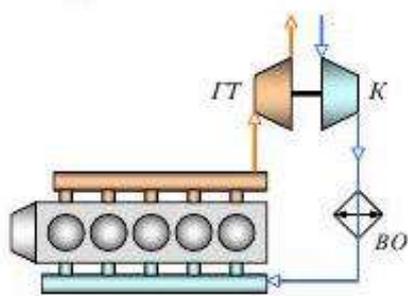


Рис. 1. Изобарный турбонаддув

В последние годы наблюдается все больший интерес к использованию турбонаддува высокого давления (в том числе двухступенчатого) в связи с ужесточением экологических норм, в том числе с введением Международной морской организацией (International Maritime Organization - IMO) требований IMO Tier III в зонах контроля выбросов (Emission Control Area – ECA). Цикл Миллера с ранним закрытием впускного клапана (Inlet Valve Closing – IVC) является одним из методов для достижения низкого уровня выбросов NO_x , который получил широкое развитие при вступлении в силу требований IMO Tier II, требовавших 20% снижения уровня NO_x по сравнению с уровнем IMO Tier I. Применение цикла Миллера позволяет снизить пиковые температуры в рабочем цилиндре двигателя, что позволяет значительно сократить уровень выбросов NO_x (рис. 2).

Как правило, существует зависимость между уровнем выбросов NO_x и расходом топлива, в результате чего уменьшение NO_x увеличивает удельный расход топлива (Specific Fuel Oil Consumption – SFOC). Соответственно, поиск путей преодоления этого компромисса является важным аспектом при разработке способов снижения NO_x .



Рис. 2. Зависимость уровня выбросов NO_x от значения пиковых температур в рабочем цилиндре двигателя

Комбинирование цикла Миллера с ранним IVC и турбонаддува высокого давления является одним из способов достижения этого компромисса. Примером подобных конструкторских решений является двигатель фирмы MAN Diesel & Turbo серии 32/44CR (рис. 3) с аккумуляторной системой подачи топлива (Common Rail – CR). Согласно данным производителя [1], помимо применения цикла Миллера и системы подачи топлива Common Rail, двигатель оснащен системой изменения фаз газораспределения (Variable Valve Timing – VVT), что в совокупности позволяет ему выдерживать содержание вредных выбросов в отработавших газах (ОГ) на уровне IMO Tier II, а с использованием

селективной каталитической обработки ОГ (Selective Catalytic Reduction – SCR) – уровня IMO Tier III.



Рис. 3. Двигатель MAN серии 32/44CR

Применение этого комплекса конструктивных решений позволяет добиться значительного снижения удельного расхода топлива и уровня выбросов NO_x (рис. 4) [2].

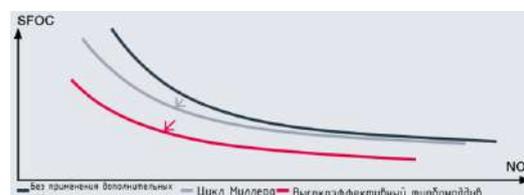


Рис. 4. Зависимость снижения удельного расхода топлива и уровня выбросов NO_x от организации рабочего процесса двигателя

1. Применение изменяемых фаз газораспределения в судовых двухтопливных дизельных двигателях

Хорошим примером двухтопливного дизеля с реализованным умеренным циклом Миллера с VVT является двигатель фирмы Daihatsu Diesel Mfg. Co., Ltd. серии DF. Это серия четырехтактных двухтопливных дизельных двигателей соответствующих требованиям IMO Tier II в дизельном режиме и IMO Tier III при работе на газовом топливе (рис. 5) [3].

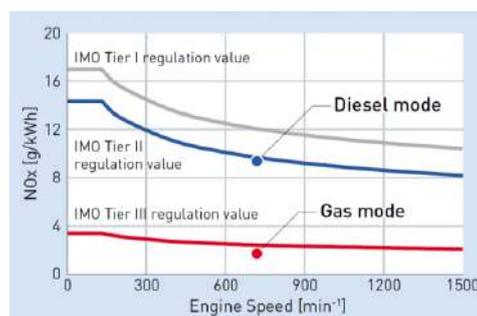


Рис. 5. Соответствие двигателей фирмы Daihatsu серии DF требованиям IMO

Двигатель оснащен отдельными системами топливоподачи основного и запального топлива (рис. 6). Этот вариант компоновки форсунок упрощает их техническое обслуживание и стоимость.

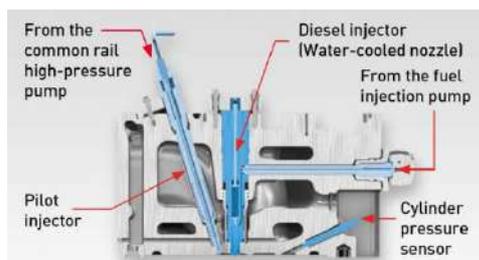


Рис. 6. Крышка цилиндра двигателей фирмы Daihatsu серии DF

Система запального топлива реализована по принципу технологии «Micro-Pilot», что позволяет добиться расхода дизельного топлива <1% от общего тепловыделения при работе двигателя на газовом топливе на номинальной мощности. Данная топливная система выполнена по технологии «Common Rail» первого поколения с давлением в аккумуляторной системе до 1000 бар (рис. 7).



Рис. 7. Система запального топлива

Система управления двигателем включает в себя механизм изменения фаз газораспределения (рис. 8). Система оптимально контролирует время открытия и закрытия впускных клапанов в соответствии с частотой вращения двигателя и нагрузкой, тем самым помогая снизить выбросы NO_x и улучшить характеристики детонационной стойкости. Она также обеспечивает управление временем открытия впускных клапанов для обеспечения стабильной работы при запуске и во время работы при низкой нагрузке. Система VVT реализована следующим образом: между толкателем и кулаком распредвала установлено дополнительное коромысло на специальном ролике. Коромысло тягой связано с управляющим эксцентриком. Эксцентрик приводится в действие приводом, которым управляет система контроля рабочего процесса двигателя в соответствии с заложенным в нее алгоритмом.

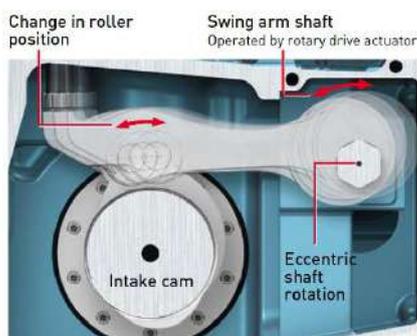


Рис. 8. Система управления фазами газораспределения

Стоит отметить, что данный способ реализации VVT имеет один существенный недостаток: отсутствие возможности регулирования продолжительности открытия впускного клапана. Регулировка фаз газораспределения осуществляется только путем смещения фаз открытия/закрытия впускного клапана (рис. 9).

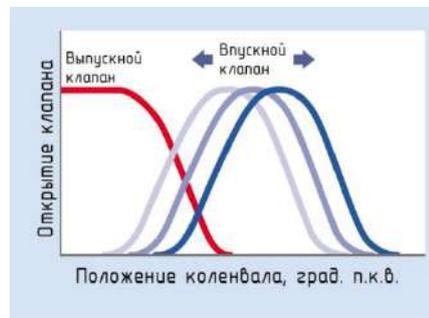


Рис. 9. Профиль регулировки открытия/закрытия впускного клапана

2. Перспективы применение изменяемых фаз газораспределения в судовых двухтопливных дизельных двигателях

Эффективность современных двухтопливных дизельных двигателей сильно ограничивается их детонационной стойкостью. Для поддержания стабильного рабочего процесса, в современных двигателях Dual Fuel сильно занижена степень сжатия ($\epsilon \approx 11-13$). Для повышения эффективности двигателей данного типа необходимо повысить степень сжатия до характерного значения классических дизелей $\epsilon = 16$, что можно осуществить только с применением углубленного цикла Миллера. Однако подобное усиление влечет за собой соответствующие проблемы: закрытие впускного клапана происходит значительно быстрее, чем в умеренном цикле Миллера, что увеличивает снижение давления наддувочного воздуха при продувке цилиндра. Низкое давление воздуха в цилиндре в начале такта сжатия может отрицательно сказываться на расходе топлива. Для решения этой проблемы приходится применять турбонаддув с более высокой степенью повышения давления (от 6 до 12), для более быстрого наполнения цилиндра. На рис. 10 показана зависимость необходимой степени повышения давления в ТК от времени закрытия впускного клапана [4].

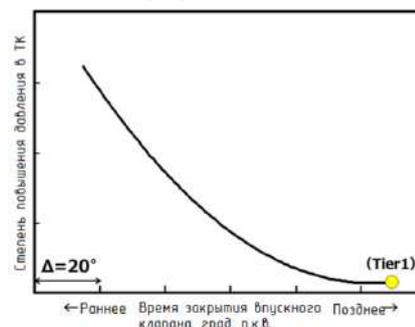


Рис. 10. Зависимость необходимой степени повышения давления в ТК от времени закрытия впускного клапана

Данная проблема требует комплексного решения. Во-первых, разработок эффективных компактных систем двухступенчатого турбонаддува (ДСН) с промежуточными воздухоохладителями (ВО). В этом отношении внимание привлекает технология двухступенчатого турбонаддува, при которой используются два различных типа турбоагнетателей (высокого и низкого давления – ТВД/КВД и ТНД/КНД соответственно). Фирма MAN Diesel & Turbo SE предлагает комбинированный ДСН (рис. 11) состоящий из ТК серии TCX и TCA (ТК высокого давления с аксиальной турбиной и ТК низкого давления с осевой турбиной соответственно [5]).

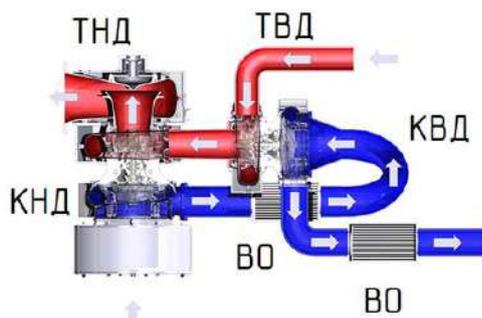


Рис. 11. Двухступенчатый турбонаддув

Во-вторых, требуются более гибкие системы управления фазами газораспределения. На данный момент можно выделить два типа систем: гибридные – с применением распредвала в системе управления, и независимые – с индивидуальным приводом каждого клапана. Наиболее выгодным решением пока что является применение гибридных систем, т.к. они не требуют изменения конструкции крышек цилиндров серийных двигателей, а так же более компактные и менее дорогостоящие. Концепция системы VVT (рис. 12) предлагаемая фирмой ABB Turbo Systems Ltd. [6] является наиболее перспективной, на данный момент.



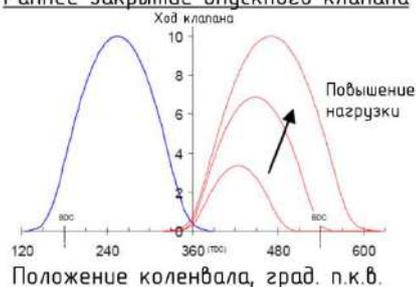
Рис. 12. Система Valve Control Management (VCM) компании ABB

Данная система получает усилие для открытия клапана от распредвала. Это усилие передается в гидравлический блок. В гидравлическом блоке, распределительное устройство либо блокирует перепуск гидравлики в гидроаккумулятор и

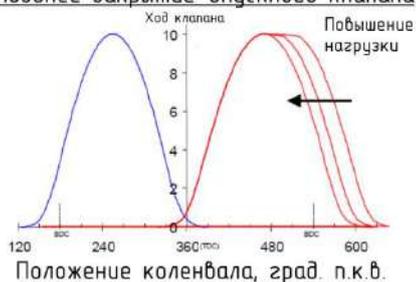
происходит активный ход клапана, либо происходит перепуск и активный ход сокращается.

Данные системы позволяют получать различные профили открытия клапанов (рис. 13).

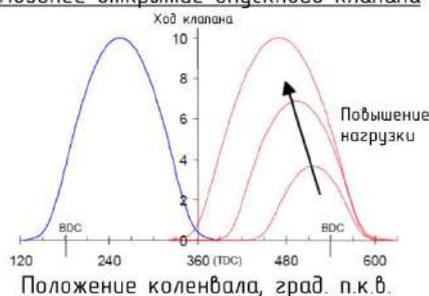
Раннее закрытие впускного клапана



Позднее закрытие впускного клапана



Позднее открытие впускного клапана



Изменяемый ход клапана

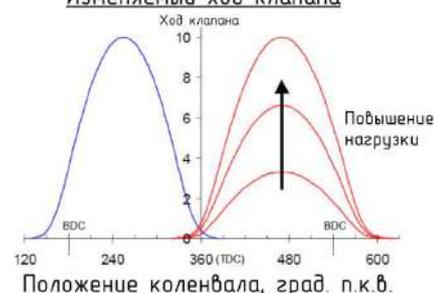
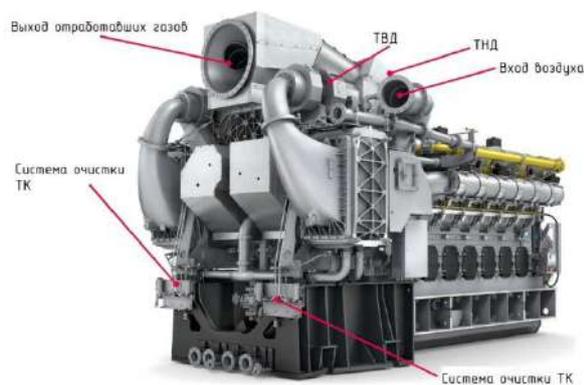


Рис. 13. Профили открытия клапанов систем VVT

Применение данного комплекса решений по организации рабочего процесса двухтопливного дизельного двигателя открывает возможность его применения для работы на винт фиксированного шага (ВФШ), что может существенно повысить общую эффективность судовой энергетической установки (СЭУ).

Концептуальная модель двигателя данного типа изображена на рис. 14.



Как видно из рис. 14, система наддува будет занимать значительное место в машинном отделении, так же потребуются усиленная подача

воздуха в помещение главного двигателя, для предотвращения помпажа ТК.

Заключение

Применение усиленного цикла Миллера является одним из способов выполнения все более ужесточающихся экологических норм. Так же, его применение ведет к увеличению эффективности дизельных двигателей. Однако стоит отметить, что подобные модернизации ДВС влекут за собой усложнение конструкции, что отрицательно сказывается на надежности механизма, а так же увеличивает стоимость двигателя и связанные с ним эксплуатационные расходы. Доводка подобных двигателей до оптимальной надежной конструкции займет еще как минимум несколько лет, но подобные издержки являются оправданными в условиях, когда конкурентоспособность на рынке во многом определяется способностью к выполнению требований экологических норм.

Литература

1. MAN 32/44CR Engineered to Set Benchmarks. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marine.man-es.com/four-stroke/engines/32-44cr/features> (дата обращения 29.05.2019).
2. Technology for Ecology. Medium speed engines for cleaner air. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/technology-for-ecologyb574f4e240cb4e5e84e04fcd258d3c0d.pdf?sfvrsn=babfbab1_5 (дата обращения 29.05.2019).
3. Daihatsu Diesel. Dual Fuel Engine. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.dhtd.co.jp/assets/flash/pdf_dual_en/book.pdf (дата обращения 20.06.2019).
4. Two-stage Turbocharging for Four-Stroke Medium-Speed Diesel Engines. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yanmar.com/sq/technology/technical_review/2016/0727_3.html (дата обращения 02.06.2019).
5. MAN Diesel & Turbo Introduces Two-Stage Turbocharging with New TCX Generation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.corporate.man.eu/man/media/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/6510-0183_PR_Two-stage_Turbocharging.pdf (дата обращения 20.06.2019).
6. Valve Control Management (VCM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.abb.com/turbocharging/technologies/vcm> (дата обращения 20.06.2019).

References

1. MAN 32/44CR Engineered to Set Benchmarks. <https://marine.man-es.com/four-stroke/engines/32-44cr/features> (29.05.2019).
2. Technology for Ecology. Medium speed engines for cleaner air. https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/technology-for-ecologyb574f4e240cb4e5e84e04fcd258d3c0d.pdf?sfvrsn=babfbab1_5 (29.05.2019).
3. Daihatsu Diesel. Dual Fuel Engine. http://www.dhtd.co.jp/assets/flash/pdf_dual_en/book.pdf (20.06.2019).
4. Two-stage Turbocharging for Four-Stroke Medium-Speed Diesel Engines. https://www.yanmar.com/sq/technology/technical_review/2016/0727_3.html (02.06.2019).
5. MAN Diesel & Turbo Introduces Two-Stage Turbocharging with New TCX Generation. https://www.corporate.man.eu/man/media/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/6510-0183_PR_Two-stage_Turbocharging.pdf (20.06.2019).
6. Valve Control Management (VCM) <http://new.abb.com/turbocharging/technologies/vcm> (20.06.2019).

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТУПЕНЕЙ ОСЕВЫХ МИКРОТУРБИН С ЧАСТИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА В СОПЛОВОЙ АППАРАТ

Александр Александрович Юртаев

соискатель кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

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, 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

Аннотация

В работе рассмотрена задача проектирования ступеней микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловый аппарат с оптимальной, с точки зрения энергетической эффективности, конфигурацией. Для решения указанной задачи была в работе представлена инженерная методика, которая служит руководством для применения конструкции ступеней микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловый аппарат при проектировании новых ступеней микротурбин или модернизации эксплуатируемых.

Методика основана на использовании математической модели внутреннего КПД, полученной по результатам экспериментальных исследований 9 ступеней микротурбин с различной степенью интеграции корневого и периферийного козырьков рабочего колеса. Предлагаемая инженерная методика применима в диапазоне варьирования параметров: величина корневого козырька рабочего колеса 1...3 мм; величина периферийного козырька рабочего колеса 1...3 мм; отношение давлений на ступень 1,79...3,97; относительная скорость (отношение окружной скорости на среднем диаметре ступени турбины к скорости звука в критическом сечении соплового аппарата) 0...0,54.

Методика учитывает, что ступени микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса при исследованиях показали наибольшую эффективность в случае малых отношений давлений на ступень. Для достижения оптимального значения относительной скорости с сохранением заданной частоты вращения предлагается определять соответствующий диаметр ступени.

В случае необходимости перехода на отличные от рассмотренных в работе параметров рабочего тела, другое рабочее тело или другие типоразмеры ступени микротурбины следует применять инструменты теории подобия.

Ключевые слова: эффективность, судовая энергетическая установка, микротурбина, сопло, рабочее колесо, турбинная ступень, лопатки, газодинамика.

METHODOLOGY FOR DESIGN OF AXIAL-FLOW MICROTURBINE STAGES WITH PARTIAL INTEGRATION OF THE IMPELLER INTO THE NOZZLE BLADE CASCADE

Aleksandr A. Yurtaev

Applicant for a degree, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Andrey Y. Fershalov

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Yuri Ya. Fershalov

Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Viktor V. Porshkevich

Postgraduate Student, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Abstract

The paper reviews the task of designing microturbine stages with partial integration of the impeller into a nozzle blade cascade with an optimal configuration in terms of energy efficiency. To solve this problem, an engineering methodology was presented in the work, which serves as a guide for applying the design of microturbine stages with partial integration of the impeller into the nozzle blade cascade when designing new microturbine stages or upgrading the operated ones.

The methodology is based on the use of a mathematical model of internal efficiency, obtained from the results of experimental studies of 9 stages of microturbines with varying degrees of integration of the root and peripheral visors of the impeller. The proposed engineering methodology is applicable in the range of variation of parameters: the value of the root visor of the impeller is 1 ... 3 mm; the size of the peripheral visor of the impeller is 1 ... 3 mm; the ratio of pressure to the stage is 1.79 ... 3.97; relative speed (the ratio of the peripheral speed at the average diameter of the turbine stage to the speed of sound in the critical section of the nozzle blade cascade) is 0 ... 0.54.

The methodology takes into account that the stages of microturbines with partial integration of the impeller in studies have shown the greatest efficiency in case of small ratios of pressure to a stage. In order to achieve the optimal value of the relative speed with maintaining the set rotational speed, it is proposed to determine the corresponding stage diameter.

If it is necessary to switch to parameters of working fluid that differ from the working fluid parameters reviewed in this paper, another working fluid or other standard sizes of microturbine stage, the tools of the similarity theory should be applied.

Key words: efficiency, ship power plant, microturbine, nozzle, impeller, turbine stage, blades, gas dynamics.

Введение

Все большее распространение в судовой и других отраслях энергетики получают осевые микротурбины [1, 2]. Они решают задачу привода механизмов и устройств в случае ограничения габаритов и/или расхода рабочего тела. В настоящее время уровень КПД осевых микротурбин ниже, чем у полноразмерных высокомоментных газовых турбин [3, 4]. В это же время, значения профильных потерь энергии при течении газа в проточной части микротурбин и полноразмерных турбин практически идентичны [5, 6, 7, 8]. Этот факт указывает на то, что возможность повышения эффективности осевых микротурбин кроется в совершенствовании их конструкции.

В работе [9] предложена конструкция ступени осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат, которая показала значительный прирост уровня КПД микротурбин [10].

На данный момент стоит задача разработки методики, позволяющей на стадии проектирования выбрать оптимальные значения величин корневого и периферийного козырьков рабочего колеса, внедренного в сопловой аппарат, в случае применения конструкции ступеней с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат.

1. Задачи и область применения методики

Разработанная инженерная методика служит руководством для применения конструкции ступени микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат при проектировании

новых ступеней микротурбин или модернизации эксплуатируемых.

Суть методики заключается в том, что проектировщик задает располагаемый диапазон изменения параметров рабочего тела перед турбиной, требуемые значения мощности и частоты вращения ротора. В результате методика позволяет получить необходимые значения параметров рабочего тела перед турбиной, оптимальное значение степени интеграции рабочего колеса в сопловой аппарат, КПД и средний диаметр ступени микротурбины.

Предлагаемая инженерная методика применима в диапазоне варьирования параметров: величина корневого козырька рабочего колеса $l_k = 1...3$ мм; величина периферийного козырька рабочего колеса $l_p = 1...3$ мм; отношение давлений на ступень $\pi_T = 1,79..3,97$; относительная скорость (отношение окружной скорости на среднем диаметре ступени турбины к скорости звука в критическом сечении соплового аппарата) $\lambda_u = 0..0,54$. Указанные ограничения обусловлены тем, что в методике используется математическая модель, полученная на основании экспериментальных исследований 9 ступеней микротурбин в указанном диапазоне варьирования параметров. При исследованиях рабочим телом выступал воздух. При этом адекватность математической модели гарантируется только в диапазоне проведенного эксперимента. Математическая модель имеет вид

$$\eta = (x_4 + 1) \left(a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 a_{ij} x_i x_j \right) \quad (1)$$

где: $x_1 - I_k$; $x_2 - I_n$; $x_3 - \pi_T$; $x_4 - \lambda_u$, a_{ij} – постоянные коэффициенты (таблица 1).

Таблица 1

Коэффициенты математической модели КПД ступени микротурбины

Наименование	Величина	Наименование	Величина
a_0	0,208	a_{14}	0,0154
a_1	-0,0204	a_{22}	-0,0140
a_2	0,000918	a_{23}	-0,00675
a_3	-0,0195	a_{24}	0,00395
a_4	-0,276	a_{33}	0,00279
a_{11}	0,00218	a_{34}	0,0838
a_{12}	0,00911	a_{44}	0,0175
a_{13}	0,000569		

В случае перехода на отличные от экспериментов параметры рабочего тела, другое рабочее тело или другие типоразмеры ступени микротурбины следует применять инструменты теории подобия.

Методика учитывает, что исследуемые ступени микротурбин показали наибольшую эффективность в случае малых π_T . Для достижения оптимального значения λ_u с сохранением заданной частоты вращения предлагается определять соответствующий диаметр ступени.

2. Алгоритм методики

Алгоритм методики состоит в следующем:

1. Задаем параметры проектирования:

N_e – требуемая мощность на валу микротурбины, Вт;

$N_{mp.n}$ – потери мощности на трение в подшипниках, Вт;

n – частота вращения ротора турбины, об/мин;

2. Задаем параметры рабочего тела

P_{0max}^* – максимальное давление перед сопловым аппаратом, которое может обеспечить система подвода рабочего тела, Па;

P_{0min}^* – минимальное давление перед сопловым аппаратом, которое может обеспечить система подвода рабочего тела, Па;

P_2 – давление за турбиной, Па;

G_{max} – максимальный расход газа, обеспечиваемый системой подвода рабочего тела, кг/с;

T_0^* – температура торможения газа перед сопловым аппаратом, К;

R – газовая постоянная рабочего тела, Дж/кгК;

k – показатель адиабаты рабочего тела.

3. $i=0$ – вспомогательная переменная.

4. задаемся первым приближением КПД в области оптимального значения $\eta=0,25$.

5. Задаем давление перед сопловым аппаратом равное минимальному давлению в системе подачи рабочего тела к турбине $P_{0c}^*=P_{0min}^*$.

6. Определяем отношение давлений на ступень

$$\pi_T = P_0^* / P_2 \tag{2}$$

7. Рассчитываем теоретический теплоперепад на ступени

$$H_t = \frac{k}{k-1} R T_0^* \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_T} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \tag{3}$$

8. Рассчитываем требуемый для обеспечения заданной мощности расход рабочего тела

$$G = \frac{N_e}{H_t \eta} \tag{4}$$

9. Проводим проверку возможности обеспечения давления и расхода рабочего тела

$$P_0^* > P_{0max}^* \text{ и } G > G_{max} \tag{5}$$

В случае если условие (5) выполняется, то вспомогательная переменная $i=1$ и переходим к пункту 11. Если нет, то переходим к пункту 10.

10. Проводим проверку

$$G > G_{max} \tag{6}$$

Если условие (6) выполняется, то увеличиваем давление перед сопловым аппаратом на 1%

$$P_0^* = P_0^* + 0,01 P_0^* \tag{7}$$

И переходим к пункту 6. Если условие (6) не выполняется, то переходим к пункту 11.

11. Рассчитываем значение π_T , нормированное от -1 до 1 в диапазоне проведенных исследований

$$\pi_T = (\pi_T - 2,88) / (3,97 - 2,88) \tag{8}$$

12. Находим значение КПД при оптимальном сочетании параметров $(I_k, I_n, \lambda_u)_{opt}$ по математической модели (1).

13. Рассчитываем фактическую мощность на валу турбины

$$N = H_t \eta G - N_{mp.n} \tag{9}$$

14. Проверяем условие

$$i = 1 \tag{10}$$

Если условие (10) выполняется, то достигнуть требуемой мощности невозможно. Если условие (10) не выполняется, то переходим к пункту 15.

15. Проводим проверку

$$|N - N_e| > \varepsilon \tag{11}$$

где ε – допустимое расхождение мощностей, Вт.

Если условие (11) выполняется, то переходим к пункту 5. При этом начинается следующая итерация расчета, при которой используется расчетное значение КПД, а не его первое приближение.

Если условие (11) не выполняется значит достигнута требуемая мощность с заданным допустимым расхождением.

16. Определяем абсолютные значения параметров $(I_k, I_n, \lambda_u)_{opt}$

$$I_k = (I_k - 2) / (3 - 2); \tag{12.1}$$

$$I_n = (I_n - 2) / (3 - 2); \tag{12.2}$$

$$\lambda_u = (\lambda_u - 0,27)(0,54 - 0,27) \quad (12.3)$$

17. Определяем окружную скорость на среднем диаметре ступени микротурбины, соответствующую оптимальному значению $(\lambda_u)_{opt}$

$$u_{opt} = \lambda_{u_{opt}} \sqrt{\frac{k}{k+1} RT_0^*} \quad (13)$$

18. Определяем средний диаметр ступени микротурбины, соответствующий заданной проектной частоте вращения и обеспечивающий u_{opt}

$$d = \frac{30u_{opt}}{\pi n} \quad (14)$$

19. По результатам расчета получаем:
 N – фактическая мощность на валу МТ, Вт;
 d – средний диаметр ступени МТ, м;
 P^*_0 – требуемое давление перед сопловым аппаратом, Па;
 G – требуемый расход газа на турбине, кг/с;
 η – КПД турбины на заданной частоте вращения;
 l_k – оптимальная величина корневого козырька, м;
 l_n – оптимальная величина периферийного козырька, м.
 Блок-схема алгоритма методики представлена на рис. 1.

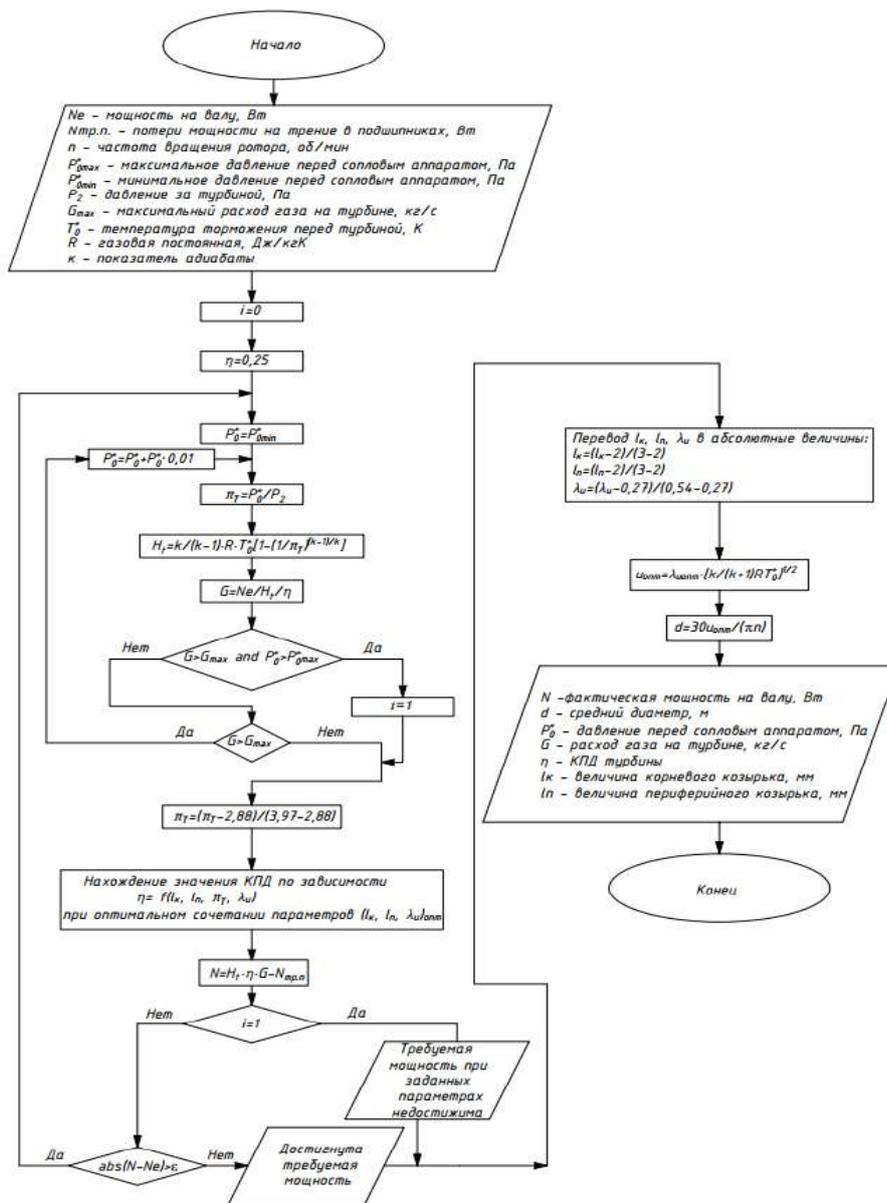


Рис. 1. Блок-схема алгоритма методики

Заключение

Проведенные исследования показали значительный прирост КПД за счет применения конструкции ступени микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат в

сравнении с «классическими» ступенями осевых микротурбин.

Разработанная инженерная методика позволяет производить расчеты параметров рабочего тела и конструкции ступени микротурбины с частичной интеграцией рабочего

колеса в сопловой аппарат для заданного режима работы приводного механизма.

При этом использование методики возможно не только при проектировании новых турбин, но и при модернизации эксплуатируемых.

В случае необходимости перехода на отличные от экспериментов параметры рабочего тела, другое рабочее тело или другие типоразмеры ступени микротурбины следует применять инструменты теории подобия.

Литература

1. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, А.Ю., Акуленко, В.М., Фершалов, М.Ю., Цыганкова, Л.П. Перспективность исследований и области применения малорасходных турбин // Вологдинские чтения. 2010. № 78. С. 159-164.
2. Фершалов, А.Ю., Фершалов, Ю.Я., Фершалов, М.Ю. Состояние вопроса и определение цели исследования сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // Вологдинские чтения. 2007. № 65. С. 100-102.
3. Fershalov, Yu. Ya., Fershalov, A. Yu., Fershalov, M. Yu. Microturbine with new design of nozzles. Energy 157 (2018). p. 615-624.
4. Фершалов, Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 2015, 355 с.
5. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V. Results of the study rotor wheels supersonic microturbines with a large angle of rotation of the flow. Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 752-753. p. 884-889.
6. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V., Ibragimov, D.I. Research data of turbine nozzles of 5-9 degree outlet angles. Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 770. p. 547-550.
7. 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.
8. 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.
9. Фершалов, А.Ю., Фершалов, Ю.Я., Поршкевич, В.В., Камаев, Н.А. Конструкция ступени осевой турбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №4 (38), Т.3. С. 94-98.
10. Фершалов, А.Ю., Камаев, Н.А., Поршкевич, В.В. Эффективность ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4 (42), Т.4. С. 71-75.

References

1. Fershalov, Yu.Yu., 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.
2. Fershalov, A.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, M.Yu. (2007) Sostoyanie voprosa i opredelenie tseli issledovaniya sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. Vologdinskie chteniya. № 65. s. 100-102.
3. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A. Yu., Fershalov M. Yu. (2018) Microturbine with new design of nozzles. Energy 157. p. 615-624.
4. Fershalov, Yu.Ya. Modelirovanie, analiz i sovershenstvovanie gazodinamicheskikh kharakteristik sudovykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupeney. (2015) Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. Vladivostok. 355 s.
5. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V. (2015) Results of the study rotor wheels supersonic microturbines with a large angle of rotation of the flow. Applied Mechanics and Materials. Т. 752-753. p. 884-889.
6. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V., Ibragimov, D.I. (2015) Research data of turbine nozzles of 5-9 degree outlet angles. Applied Mechanics and Materials. Т. 770. p. 547-550.
7. Fershalov, A.Yu. (2011) Povysheniye effektivnosti rabochikh koles sudovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, Vladivostok. 125 s.
8. 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.
9. Fershalov, A.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Porshkevich, V.V., Kamaev, N.A. (2017) Konstruktsiya stupeni osevoy turbiny s chastichnoy integratsiyey rabocheho kola v soplovy apparat. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 4 (38). Т.3. s. 94-98.
10. Fershalov, A.Yu., Kamaev, N.A., Porshkevich, V.V. (2018) Effectivnost' stupeni osevoy mikrotrubiny s chastichnoy integratsiyey rabocheho kola v soplovy apparat. Morskie intellektual'nye tekhnologii. №4 (42). Т.4. s. 71-75.

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНЕЙ ОСЕВОЙ МИКРОТУРБИНЫ С ЧАСТИЧНОЙ ИНТЕГРАЦИЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА В СОПЛОВОЙ АППАРАТ

Александр Александрович Юртаев

соискатель кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

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, 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

Аннотация

Работа посвящена разработке математической модели и, на ее основании, нахождению оптимального значения энергетической эффективности ступеней микротурбин. В качестве показателя энергетической эффективности принят внутренний КПД ступени турбины. Результаты основаны на экспериментальных исследованиях 9 ступеней микротурбин с различной степенью интеграции корневого и периферийного козырьков рабочего колеса и с средним диаметром 50 мм. Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне варьирования отношения давлений на ступень от 1,79 до 3,97 и частоты вращения ротора от 0 до 60000 об/мин.

Представлены математическая модель внутреннего КПД осевых микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат в зависимости от отношения давлений на ступень, относительной скорости (отношение окружной скорости на среднем диаметре ступени к скорости звука в критическом сечении), величины корневого и периферийного козырьков рабочего колеса, внедренных в сопловой аппарат. Приведены результаты проверки модели на адекватность экспериментальным данным.

Выполнено оптимизационные вычисления с целью поиска глобального оптимума по внутреннему КПД в области проведенных исследований: величина корневого козырька рабочего колеса 1...3 мм, величина периферийного козырька рабочего колеса 1...3 мм, отношение давлений на ступень 1,79...3,97, относительная скорость 0...0,54. По результатам исследования достигнуто значение внутреннего КПД 26,4%.

Проведен анализ полученных результатов и приведены рекомендации по проектированию ступеней микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат.

Ключевые слова: эффективность, судовая энергетическая установка, микротурбина, сопло, рабочее колесо, турбинная ступень, лопатки, газодинамика.

ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION OF AXIAL-FLOW MICROTURBINE STAGING WITH PARTIAL INTEGRATION OF IMPELLER INTO NOZZLE BLADE CASCADE

Aleksandr A. Yurtaev

Applicant for a degree, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Andrey Y. Fershalov

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Yuri Yakovlevich Fershalov

Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Viktor V. Porshkevich

Postgraduate Student, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Abstract

The work is devoted to development of a mathematical model and, on its basis, to finding the optimal value of the energy efficiency of microturbine stages. The efficiency ratio of the turbine stage is taken as an indicator of energy efficiency. The results are based on experimental studies of 9 microturbine stages with varying degrees of integration of the root and peripheral visors of the impeller and with 50 mm pitch diameter. The experimental studies have been carried out in the range of variation of the pressure ratio per stage from 1.79 to 3.97, the rotor speed from 0 to 60000 rpm.

A mathematical model of the efficiency ratio of axial microturbines with partial integration of the impeller into a nozzle blade cascade depending on the ratio of pressures per stage, relative speed (the ratio of peripheral speed at the pitch stage diameter to the speed of sound in the critical section), the root and peripheral visor value of the impeller incorporated in nozzle blade cascade. The results of testing the model for the adequacy of the experimental data are given.

Optimization calculations were performed in order to search for a global optimum in efficiency ratio in the field of performed studies: the root visor of the impeller is 1 ... 3 mm, the peripheral visor of the impeller is 1 ... 3 mm, the ratio of pressures per stage is 1.79 ... 3.97, relative speed is 0 ... 0.54. According to results of the study, 26.4% efficiency ratio was achieved.

The analysis of the obtained results is carried out and recommendations on the design of microturbine stages with partial integration of impeller into nozzle blade cascade are given.

Key words: efficiency, ship power plant, microturbine, nozzle, impeller, turbine stage, blades, gas dynamics.

Введение

На современных судах газовые турбины применяются в качестве привода вспомогательного оборудования судовой энергетической установки (компрессоры, генераторы, насосы и т.д.), для утилизации тепла отработавших в главном двигателе газов и для привода пневмоинструмента, используемого при ремонте и обслуживании судна [1, 2]. В случаях малых надводных и подводных судов газовая турбина выступает как оптимальный выбор в качестве главного двигателя судна. Наибольшее распространение получили осевые микротурбины в диапазоне мощностей от 5 Вт до 250 кВт. Коэффициент полезного действия (КПД) микротурбин варьируется от 15% до 60% в зависимости от конструкции, габаритов и режимных параметров [3, 4].

В работе [5] предложена конструкция ступени осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат [6], позволяющая повысить уровень КПД микротурбин.

Авторы работы [7] проверили гипотезу о наличии положительного эффекта от использования предложенной конструкции. По результатам исследования было показано, что ступени микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат имеют более высокие значения КПД. В некоторых случаях прирост КПД, по сравнению с классической ступенью турбины с идентичным профилем лопаток, составил вплоть до 7%.

Для оценки эффективности ступеней с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат во

всем диапазоне проведённых исследований требуется разработать математическую модель, адекватную экспериментальным данным и, на ее основании, провести глобальную оптимизацию с ограничениями в пределах проведенных экспериментов для поиска экстремума внутреннего КПД как функции от конструктивных и режимных параметров ступени микротурбины. Полученные при этом результаты позволят провести анализ влияния степени интеграции рабочего колеса в сопловой аппарат и разработать рекомендации по проектированию ступеней микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат.

1. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования были проведены на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1 [8].

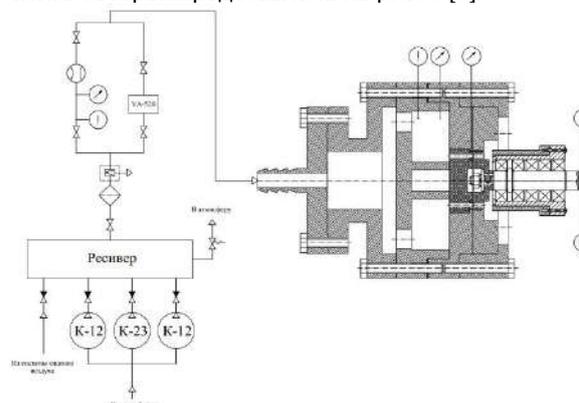


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Объектом исследования являлись ступени микротурбин, включающая в себя сопловой аппарат, рабочее колесо, бандаж рабочего колеса, снабженный уплотняющим козырьком, отличающаяся тем, что козырек бандажа рабочего колеса выполнен как продолжение периферийной поверхности выходной части сопла и его косога среза, при этом названный козырек частично размещен в проточной части соплового аппарата, кроме того, рабочее колесо снабжено дополнительным козырьком, выполненным как продолжение корневого поверхности выходной части сопла, при этом дополнительный козырек частично размещен в проточной части соплового аппарата [6].

Исследованию подверглись 9 модельных ступеней с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат и 1 «классическая» ступень микротурбины. Все ступени выполнены с идентичными каналами проточной части [7].

В качестве показателя эффективности работы ступени микротурбины использовался ее внутренний КПД (η).

Эксперименты проводились в диапазоне варьирования отношения давлений на ступень от 1,79 до 3,97 и частоты вращения ротора от 0 до 60000 об/мин.

2. Математическая модель

База экспериментальных данных КПД исследованных турбинных ступеней в зависимости от режимных и конструктивных параметров, полученная при исследованиях, была использована для построения математической модели, в которой целевой функцией является внутренний КПД ступени микротурбины.

Подбор вида математической модели основывался на физическом представлении работы ступени микротурбины. Исходя из условия равенства нулю КПД турбины при неподвижном вале и при угонных оборотах можно сделать вывод о существовании экстремума функции η между указанными точками. Этот факт был учтен при выборе вида модели.

Для математической модели КПД ступени микротурбины были приняты:

- в качестве целевой функции: внутренний КПД ступени микротурбины (η);
- в качестве режимных факторов: отношение давлений на ступень (π_T) и относительная скорость (λ_u), которая характеризует отношение окружной скорости на среднем диаметре ступени к скорости звука в критическом сечении;
- в качестве конструктивных факторов: величины корневого (l_k) и периферийного (l_n) козырьков на бандаже рабочего колеса и, соответственно, проточек на сопловом аппарате.

В результате проведенного анализа по выбору факторов с целью выявления эффекта от интеграции рабочего колеса в сопловой аппарат была разработана математическая модель вида:

$$\eta = f(l_k, l_n, \pi_T, \lambda_u) \quad (1)$$

Все факторы, вошедшие в модель, были нормированы в пределах от -1 до +1 в пределах проведенных экспериментов.

По результатам анализа различных видов уравнений, описывающих взаимосвязь указанных выше параметров на η была выбрана модель вида

$$\eta = (x_4 + 1) \left(a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 a_{ij} x_i x_j \right) \quad (2)$$

где: $x_1 - l_k$; $x_2 - l_n$; $x_3 - \pi_T$; $x_4 - \lambda_u$, a_{ij} – постоянные коэффициенты.

Коэффициенты уравнения, полученные методом наименьших квадратов, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты математической модели КПД ступени микротурбины

Наименование	Величина	Наименование	Величина
a_0	0,208	a_{14}	0,0154
a_1	-0,0204	a_{22}	-0,0140
a_2	0,000918	a_{23}	-0,00675
a_3	-0,0195	a_{24}	0,00395
a_4	-0,276	a_{33}	0,00279
a_{11}	0,00218	a_{34}	0,0838
a_{12}	0,00911	a_{44}	0,0175
a_{13}	0,000569		

Для проверки качества модели выполнялась проверка ее адекватности экспериментальным данным, которая подтвердила непротиворечивость проверяемого вида функции регрессии имеющимся исходным данным. Проверка осуществлялась по критерию Фишера [9]. Для модели (2) получено значение критерия Фишера $F=1,060$ при его критическом значении $F_{кр}=1,077$.

Для визуального анализа соответствия модели (2) экспериментальным данным представлены графики (рис. 2 и 3).

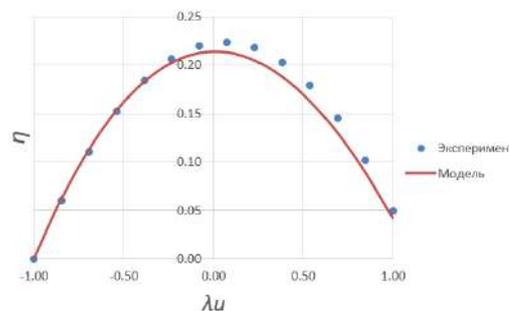


Рис. 2. График η от λ_u для проверки адекватности модели (2). Ступень 1-1 при $\pi_T = 3,97$.

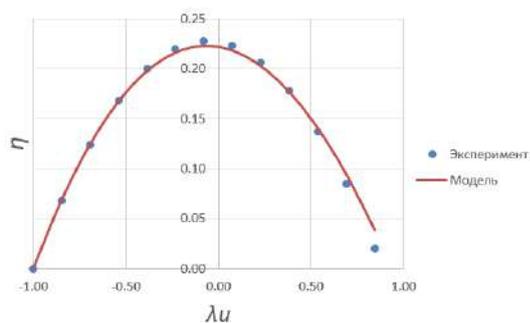


Рис. 3. График η от λ_u для проверки адекватности модели (2). Ступень 1-2 при $\pi_T = 3,31$.

Визуальный анализ графиков позволяет утверждать, что модель (2) адекватно описывает зависимость КПД от исследуемых параметров. При этом разница между значениями КПД в области рабочих режимов не превышает $\pm 1\%$.

Оптимизация эффективности

Целевой функцией оптимизации является внутренний КПД ступени микротурбины

$$\eta = f(I_k, I_n, \pi_T, \lambda_u) \rightarrow \text{extr} \quad (3)$$

В работе стояла задача оптимизации с ограничениями в диапазоне проведенного эксперимента. Эти ограничения обоснованы тем, что адекватность полученной математической модели доказана для значений параметров модели, находящихся в области проведенных экспериментов.

В работе рассмотрены следующие ограничения задачи оптимизации: $1 < l_k < 3$ мм, $1 < l_n < 3$ мм, $1,79 < \pi_T < 3,97$, $0 < \lambda_u < 0,54$.

В результате поиска экстремума функции было получено, что $\eta_{max} = 26,4\%$ при совокупности значений факторов: $l_k = 1$ мм, $l_n = 1,92$ мм, $\pi_T = 1,79$, $\lambda_u = 0,224$.

Для проверки результатов оптимизации по математической модели была изготовлена ступень микротурбины с параметрами, полученными при оптимизации. Эксперимент подтвердил расчеты. Графики для сравнения экспериментальных данных и данных, полученных по модели (2) представлены на рис. 4.

По результатам оптимизации можно сделать следующие выводы:

- величина корневого козырька попала в ограничение задачи оптимизации. Т.е. корневым козырьком рабочего колеса должен иметь минимальное значение в области проведенного эксперимента;

- отношение давлений на ступень также попало в ограничение оптимизации. Т.е. максимальному КПД соответствует минимальное значение

отношения давлений, что обусловлено утечкой рабочего тела между вращающимися козырьками рабочего колеса и неподвижного соплового аппарата;

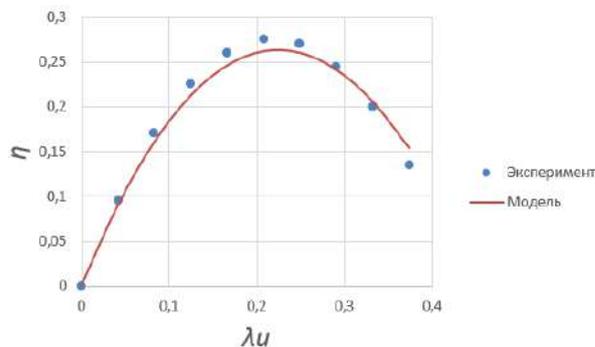


Рис. 3. Зависимость η от λ_u для ступени с $l_k=1$ мм, $l_n=1,92$ мм при $\pi_T=2,97$.

- по величине периферийного козырька рабочего колеса и относительной скорости оптимум оказался внутри области оптимизации. Т.е. по этим факторам существует перегиб функции в области проведенного эксперимента.

Заключение

Учитывая результаты проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Отношение давлений на ступень попало в ограничение оптимизации. Это происходит из-за наличия утечки через зазор между козырьками рабочего колеса и лопатками соплового аппарата. Использование развитого уплотнения между козырьками рабочего колеса и статором микротурбины может значительно снизить утечку и, соответственно, повысить КПД даже при больших значениях π_T .

2. Увеличение корневого козырька приводит к снижению КПД исследованных ступеней микротурбин. Т.е. можно сделать вывод о том, что корневым козырьком необходимо выполнять минимально возможным для закрытия осевого зазора. Дальнейшее его увеличение приводит к увеличению утечки, тогда как положительный эффект от снижения трения незначителен.

3. По величине периферийного козырька экстремум находится в области проведенного эксперимента. Это связано с усилением положительного эффекта от внедрения козырька рабочего колеса в сопловой аппарат из-за наличия кривизны каналов соплового аппарата и рабочего колеса. За счет этого на их периферийной поверхности возникают большие силы трения.

Литература

1. 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.
2. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V. Results of the study rotor wheels supersonic microturbines with a large angle of rotation of the flow. Applied Mechanics and Materials (2015) t. 752-753. p. 884-889.
3. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A. Yu., Fershalov M. Yu. Microturbine with new design of nozzles. Energy 157 (2018) 615-624.

4. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю. Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 1 (39). С. 57-62.
5. Фершалов, А.Ю., Фершалов, Ю.Я., Поршкевич, В.В., Камаев, Н.А. Конструкция ступени осевой турбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №4 (38), т.3. с. 94-98.
6. Фершалов, Ю.Я., Фершалов, М.Ю., Фершалов, А.Ю. Патент на изобретение №2338887. Ступень осевой турбины / Дальневосточный федеральный университет, 2007.
7. Фершалов, А.Ю., Камаев, Н.А., Поршкевич, В.В. Эффективность ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4 (42), т.4. с. 71-75.
8. Ибрагимов, Д.И., Камаев, Н.А., Кузнецов, Д.А. Экспериментальный стенд для исследования энергетической эффективности и эксплуатационных характеристик осевых микротурбин // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4 (42), т.4. с. 152-155.
9. Блохин, А.В. Теория эксперимента [Электронный ресурс]: Курс лекций в двух частях: Часть 2. — Электрон. текст. дан. (1,0 Мб). - Мн.: Научно-методический центр "Электронная книга БГУ", 2003. – Режим доступа: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/blohin2.pdf> . - Электрон. версия печ. публикации, 2002. - PDF формат, версия 1.4 . - Систем. требования: Adobe Acrobat 5.0 и выше.

References

1. 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.
2. Fershalov, A.Yu., Fershalov, M.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Sazonov, T.V. (2015) Results of the study rotor wheels supersonic microturbines with a large angle of rotation of the flow. Applied Mechanics and Materials, t. 752-753. p. 884-889.
3. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A. Yu., Fershalov M. Yu. (2018) Microturbine with new design of nozzles. Energy 157, p. 615-624.
4. Fershalov, A.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, M.Yu. (2018) Effektivnost' malogabaritnykh turbinnykh stupeney s malymi uglami vykhoda sopel. Morskie intellektual'nye tekhnologii. T. 1, № 1, (39), s. 57-62.
5. Fershalov, A.Yu., Fershalov, Yu.Ya., Porshkevich, V.V., Kamaev N.A. (2017) Konstruktsiya stupeni osevoy turbiny s chastichnoy integratsiyey rabocheho koleasa v soplovooy apparat. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4 (38), t.3, s. 94-98.
6. Fershalov, Yu.Ya., Fershalov, M.Yu., Fershalov, A.Yu. Patent na izobretenie №2338887. Stupen' osevoy turbiny. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, 2007.
7. Fershalov, A.Yu., Kamaev, N.A., Porshkevich, V.V., (2018) Effectivnost' stupeni osevoy mикroturbiny s chastichnoy integratsiyey rabocheho koleasa v soplovooy apparat. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4 (42), t.4, s. 71-75.
8. Ibragimov, D.I., Kamaev, N.A., Kuznetsov, D.A., (2018) Eksperimental'nyy stend dlya issledovaniya energeticheskoy effektivnosti i ekspluatatsionnykh kharakteristik osevykh mикroturbin. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4 (42), t.4, s. 152-155.
9. Blokhin, A.V. Teoriya eksperimenta [Elektronnyy resur]: Kurs lektsiy v dvukh chastyakh: Chast' 2. - Elektron. tekst. dan. (1,0 Mb). - Mн.: Nauchno-metodicheskiy tsentr "Elektronnaya kniga BGU", 2003. - Rezhim dostupa: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/blohin2.pdf>. - Elektron. versiya pech. publikatsii, 2002. - PDF format, versiya 1.4 . - Sistem. trebovaniya: Adobe Acrobat 5.0 i vyshe.

УДК 629.5.062.13

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

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

профессор кафедры

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Марин Любенов Маринов

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13
тел. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

Сергей Николаевич Турусов

доктор технических наук, профессор, генеральный директор
АО «ВНИТИ ЭМ», 196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 2
тел. (921) 752-65-44 e-mail: serniktur@yandex.ru

Аннотация

Выполнен анализ отечественных авторулевых - системы управления движением судна. Приведена оценка качества стабилизации судна для авторулевых с фиксированной и переменной структурой. Рассмотрены особенности возникновения «морской болезни». Для судов различного типа сформулированы математические выражения, позволяющие определить влияние качки и боковых перегрузок на работу экипажа. Изучены адаптивные авторулевые, обеспечивающие, без участия оператора, оптимальную настройку параметров системы при изменении состояния объекта управления и условий плавания (скорости хода, осадки судна, состояния погоды, глубины под килем). Исследованы особенности различных типов адаптивных авторулевых в зависимости от принципов адаптации. Проанализированы особенности авторулевых «Корракс», которые координируют совместное управление движением в режимах автоматического маневрирования и стабилизацию судна на заданном курсе. Представлены алгоритмы стабилизации курса, управления креном, алгоритмы оценивания и фильтрации системы «Корракс», а также функции авторулевого и локальной системы управления. Изложена концепция алгоритмического обеспечения систем, дана сравнительная оценка точностных и динамических характеристик авторулевого в различных режимах плавания, в том числе в условиях развитого морского волнения.

Ключевые слова: авторулевой, алгоритм, адаптивность, настройка, боковые перегрузки, вертикальное ускорение, динамические характеристики, координированное управление.

PERSPECTIVES FOR IMPROVING VESSEL MOTION CONTROL SYSTEM

Valery Y. Kaminsky

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Laboratory of the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 12 line, 13 tel. : +7 (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy @ yandex.ru

Dmitry A. Skorokhodov

Dr.Sci.Tech, Professor of

the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 12 line, 13 tel. : 8 (812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

Professor of the Department of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"), 197376, Russia, St. Petersburg, Professora Popova street, 5
tel. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Marin Lyubenov Marinov

PhD in Engineering Science, leading researcher of
the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13,
tel. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

Sergey N. Turusov

Dr.Sci.Tech, Professor, General Director of JSC "VNITI EM", 196128, St. Petersburg, Blagodatnaya Str., 2
tel. (921) 752-65-44 e-mail: serniktur@yandex.ru

Abstract

The analysis of domestic autopilot - a system for controlling the motion of a vessel was performed. The assessment of stabilization quality of a vessel for autopilots with fixed and variable structures is given. The features of "seasickness" occurrence are reviewed. For ships of various types, mathematical expressions are formulated to determine the effect of swell and lateral accelerations on the crew's performance. Adaptive autopilots were studied, which ensure, without operator's involvement, the optimal setting of the system parameters when the state of the control object and navigation conditions change (rate of sailing, vessel draft, weather conditions, depth under keel). The features of various types of adaptive autopilots are investigated depending on the principles of adaptation. The features of the autopilot "Corrax" were analyzed, which coordinate the integrated motion control in the modes of automatic maneuvering and stabilization of the vessel on a given course. Algorithms for course stabilization, list control, algorithms for estimating and filtering of the Corrax system, as well as autopilot and local control system functions are presented. The concept of algorithmic system support, a comparative assessment of accuracy and dynamic characteristics of the autopilot in various navigation modes, including under conditions of arisen sea are presented.

Keywords: autopilot, algorithm, adaptability, tuning, lateral accelerations, vertical acceleration, dynamic characteristics, coordinated control.

Введение

В начале 50-х годов прошлого века на судах и кораблях ВМФ стали широко применяться авторулевые. Разнообразие типов рулевых машин (паровые, секторные, гидравлические с механическими обратными связями) обусловило разработку ряда авторулевых: «Самшит», АБР, АР, «Альбатрос» и др. [1]. В авторулевых сложной кинематики использовались электромеханические элементы - вращающиеся трансформаторы, электродвигатели постоянного тока, асинхронные двигатели с полым ротором, контактные и бесконтактные сельсины.

В начале 60-х годов были разработаны электрогидравлические рулевые машины типизированного ряда (типа «Р») с электрическими обратными связями. Для управления этими машинами созданы авторулевые «АТР» и «Питон», в которых также использовались электромеханические элементы, но кинематика которых была значительно проще.

Подобные авторулевые имели следующий алгоритм управления:

$$\delta = \frac{1}{K_{OC}}(K_1\varphi + K_2\dot{\varphi} + K_3 \int \varphi dt), \quad (1)$$

где:

δ - угол перекадки руля;

$K_{OC} = \frac{\varphi}{\delta}$ - коэффициент обратной связи;

$\varphi, \dot{\varphi}$ - угол и скорость изменения курса;

K_1, K_2, K_3 - коэффициенты передачи по каналу курса, производной по курсу, интегралу по курсу.

В начале 70-х годов разработаны унифицированные авторулевые «Аист» и «Печора». Авторулевые «Аист» предназначались для морских судов и кораблей ВМФ, а «Печора» – для судов смешанного плавания и речного флота.

Основное отличие авторулевых «Печора» и «Аист» состоит в том, что в режиме стабилизации судна на курсе «Печора» позволяет обеспечить поворот судна с заданной угловой скоростью. В сравнении с предшественниками, «Печора» имеет более простую кинематику и использует электронные корректирующие устройства.

Для стабилизации судна на заданной траектории авторулевые «Аист» сопрягались с навигационным комплексом «Бриз» или «Бирюза».

Для улучшения стабилизации судна на заданном курсе разработаны алгоритмы с переменной структурой следующего вида:

$$\delta = \frac{1}{K} \left[K_1\varphi + \frac{K_2p}{T_2p+1}\varphi + \frac{K_3p}{T_3p+1}\varphi + K_4 \cdot F(\dot{\varphi}, \ddot{\varphi}) \right], \quad (2)$$

где $F(\dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$ - нелинейная функция, зависящая от координат системы управления по курсу судна.

В частном случае зависимость может быть представлена в виде:

$$F(\dot{\varphi}, \ddot{\varphi}) = \begin{cases} +1: \dot{\varphi}, \ddot{\varphi} > 0 \\ -1: \dot{\varphi}, \ddot{\varphi} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

В алгоритм управления добавляется сигнал, знак которого определяется сочетанием знаков первой и второй производной от угла изменения курса. Как показали лабораторные и натурные испытания, это позволяет улучшить стабилизацию судна на курсе и снизить количество кладок руля, что увеличивает ресурс рулевой машины.

Использование авторулевых на скоростных судах в режиме стабилизации приводит к раскачке по крену судна под воздействием кормового руля [2,3]. Качка вызывает у экипажа и пассажиров «морскую болезнь». Основной причиной укачивания является физиологическая реакция на угловые и линейные ускорения. Порог чувствительности к угловым ускорениям находится в пределах 2-3 гр/с, а к вертикальным – в пределах

0,4-0,12 м/с². «Морская болезнь» развивается бурно, когда вертикальные ускорения превышают 1,0 м/с². Подобные ускорения в определённой точке судна являются следствием не только линейных, но и угловых колебаний. Наибольшие вертикальные ускорения бывают в оконечностях корабля. Если считать, что эти ускорения не должны превышать 1,0 м/с² (≈0,1g), то допустимые амплитуды бортовой и килевой качки можно рассчитать по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \theta_{\max} \leq \theta_{md} &= 0,1g \left(\frac{T_{\theta}}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2}{B} \cdot 57,3^{\circ}; \\ \psi_{\max} \leq \psi_{md} &= 0,1g \left(\frac{T_{\psi}}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{2}{L} \cdot 57,3^{\circ}, \end{aligned} \quad (4)$$

где: T_{θ} и T_{ψ} - периоды бортовой и килевой качки, B и L - наибольшая ширина и длина судна.

Помимо «морской болезни», качка ограничивает возможности персонала при выполнении различных задач вследствие потери равновесия. Исследования этого явления, проведенные в центре им. Д.Тейлора, позволили получить универсальный показатель, обозначенный как *MII* (*Motion Induced Interruptions*). Фактически *MII* представляет собой функцию, отражающую состояние равновесия членов команды. *MII* обозначает возникновение условий, при которых человек вынужден либо ухватиться за что-нибудь, либо изменить позу для удержания равновесия. В качестве приближенного показателя *MII* используют оценочный показатель поперечной силы *LFE* (*Lateral Force Estimator*) или боковых перегрузок. Предложено боковые перегрузки классифицировать по степени риска. Первый уровень риска соответствует $LFE=0,08g$. При такой качке на восемнадцать производственных операций на верхней палубе судна, будет наблюдаться одна потеря равновесия. Второй уровень риска характеризует потерю равновесия в одной из двух выполняемых операций. Этому уровню соответствует $LFE=0,1g$. Серьезный уровень риска – потеря равновесия 1,44 раза на одну операцию, $LFE=0,12g$. Высокий уровень риска – 2,61 раза на одну операцию, $LFE=0,14g$. Чрезвычайно опасные условия – четыре раза на одну операцию, $LFE \geq 0,16g$.

Для снижения риска потери равновесия изготовлена приставка стабилизации крена. Авторулевой с такой приставкой обеспечивает следующий закон управления:

$$\delta = \frac{1}{K_{oc}} \left(K_1 \varphi + \frac{K_2 p}{T_2 p + 1} \varphi + \frac{K_3}{T_3 p + 1} \varphi + K_4 \theta + \frac{K_4 p}{T_4 p + 1} \right), \quad (5)$$

где θ - угол крена; K_3, K_4 - коэффициенты передачи по крену и его производной.

Внедрение на морских и речных судах систем автоматического управления движением судна по курсу увеличивает скорость доставки грузов, что позволяет сократить оборотные средства, приводит к росту провозной способности судна в результате увеличения валовой эксплуатационной скорости, а также снижает эксплуатационные

расходы в результате уменьшения энергетических потерь и сокращения численности экипажа. Опыт эксплуатации авторулевых показал, что при автоматическом управлении движением судна потери ходового времени снижаются на 2-3 %, что позволяет экономить до 5-6 % топлива, а также создает предпосылки для ускорения грузооборота [4].

Однако системы автоматического управления движением судна с простейшими законами управления были не совершенны. В начале 1970-х годов начались работы по созданию более эффективных систем. Поиск новых решений был связан с резким ростом цен на топливо, с требованием повышения безопасности мореплавания в условиях интенсивного судоходства, а также со строительством крупнотоннажных и скоростных судов, автоматическое управление которыми, при использовании авторулевых с традиционным законом управления, не обеспечивается или реализуется неудовлетворительно.

1. Адаптивные авторулевые

Одним из направлений создания более совершенных систем управления является создание автономных адаптивных авторулевых. Адаптивные авторулевые обеспечивают оптимальную настройку параметров системы без участия оператора при изменении состояния объекта управления и внешних условий плавания (скорости хода, осадки, состояния погоды, глубины под килем) [5]. В зависимости от реализуемых принципов адаптации (параметрическая адаптация с настройкой коэффициентов ПИД-регулятора, адаптация с параметрической идентификацией объекта в реальном времени, адаптация с эталонной моделью, прямая компенсация возмущающих воздействий и др.) различают несколько типов адаптивных авторулевых [6].

Адаптивные авторулевые первого типа характеризуются частичной автоматической настройкой параметров. Они реализуют косвенные критерии оценки качества работы системы, не всегда достаточно обоснованные. К ним относят адаптивные авторулевые Т5 (Польша), А5АР-11 (Швеция) и др. Эти схемы не позволяют обеспечить оптимальную настройку параметров системы автоматизированного управления (САУ) движением судна по курсу в различных условиях плавания.

Ко второму типу относят авторулевые автоматически адаптирующие систему использованием эталонной математической модели объекта или, в целом, системы управления. Здесь формирование сигналов, воздействующих на параметры управления, осуществляется на основе анализа качества удержания судна на курсе по наблюдаемым и моделируемым переменным состояния. Существенной особенностью систем является наличие математической модели судна. Возможны различные способы использования эталонной математической модели. Модель может соответствовать либо полной замкнутой САУ либо только объекту управления. Подобным устройством является адаптивный авторулевой «Ракал-Декка» DP – 780» (Англия).

Третий тип адаптивных авторулевых - самонастраивающиеся системы, определяющие оптимальные значения параметров настройки непосредственно по заданному, математически обоснованному, критерию качества. Таким критерием обычно служит функционал, обеспечивающий минимум потерь полезной мощности судовой силовой установки при управлении и, как следствие, минимизирующий расход топлива на единицу пройденного расстояния. В состав авторулевого входит специализированный компьютер морского исполнения с набором вычислительных программ, в который поступает информация от судового гирокомпаса, лага, гироскопического измерителя угловой скорости поворота судна, маятникового кренометра, измеряющего период бортовой качки, а также передаются значения заданного и истинного углов перекадки руля.

Существуют адаптивные авторулевые, использующие априорную информацию о динамике работы САУ при движении судна по курсу в различных условиях плавания.

Спектр параметров управления, рассчитанный по специальной программе, хранится в блоке памяти судового микрокомпьютера в виде матрицы и реализуется в зависимости от скорости хода судна, полосы пропускания - частот и результатов минимизации критерия качества в замкнутой системе. К этой группе адаптивных авторулевых можно отнести системы «Сперри гироайлот ASM» и «Диджипайлот AP-9» американских фирм «Сперри» и «Айотрон» и др.

Анализ особенностей эксплуатации адаптивных авторулевых подтвердил их более высокую технико-экономическую эффективность в сравнении с традиционными устройствами.

Однако проблема адаптивного авторулевого, до сих пор не имеет практического решения на уровне современных требований. Настройка коэффициентов авторулевого или частичное изменение его структуры с помощью корректирующих элементов осуществляется только в отдельных режимах его работы и не является в полной мере адекватной фактическим изменениям характеристик судна и внешних воздействий.

2. Перспективы развития авторулевых

Создание теории оптимальной стабилизации и фильтрации по Калману, разработка алгоритмов оптимального быстрогодействия и прогнозирования, формирование класса наблюдателей и идентификаторов для выработки оценок вектора измерения координат корабля, применение спутниковых навигационных систем наряду с внедрением средств цифровой вычислительной техники и управляющих компьютеров позволили приступить к созданию современных авторулевых.

Сотрудниками различных организаций промышленности и Российской академии наук предложены научно-технические решения, направленные на оптимизацию авторулевых и положенные в основу управляющих алгоритмов [7, 8]. В частности были созданы авторулевые типа «Корракс» [9], особенностью которых является реализация координированного совместного

управления движением судна в режимах автоматического маневрирования и его стабилизации на заданном курсе.

Подобная система управления движением предусматривает:

- адаптацию к меняющимся условиям плавания, динамике судна, приводам и органам управления;
- высокий уровень отказоустойчивости и надежности работы, обусловленный резервированием аппаратуры, каналов управления и индикации, а также сетевой структурой системы с дублированием каналов межприборных и внешних связей;
- диагностику и контроль технического состояния систем управления и управляемого оборудования;
- возможность сопряжения по стандартным цифровым интерфейсам с другими системами судна различного назначения;
- наличие широкого выбора освоенных серийным производством электромеханических и электрогидравлических устройств для сопряжения с силовыми приводами рулей и другими исполнительными органами.

Системы управления обеспечивают стабилизацию заданного курса, а так же оптимальное по быстродействию автоматическое маневрирование. Погрешность стабилизации генерального курса - не более 0,2°, угол рыскания не превышает 0,5° - 1° на волнении до 3-х баллов и не более 2° на волнении от 3-х до 7-ми баллов. Впервые обеспечивается стабилизация судна на волнении до 7 баллов с расчетным средним значением величины рыскания до 3° (при достаточной эффективности рулевого привода).

Алгоритмы стабилизации курса, управления креном, оценивания и фильтрации системы управления движением «Корракс» имеют следующий вид:

$$\sigma_{cm} = f(\Delta\dot{\varphi}) + K_{11}(V)\dot{\beta} + K_{12}(V)\dot{\omega}_y + K_{13}\dot{\varphi}. \quad (6)$$

$$f(\Delta\dot{\varphi}) = \begin{cases} \Delta\dot{\varphi} & \text{при } |\Delta\dot{\varphi}| \leq \Delta\varphi_0; \\ \Delta\dot{\varphi} = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{зад}; & \\ \Delta\dot{\varphi}_0 = const = 10; & \\ \Delta\dot{\varphi}_0 \text{sign}\Delta\dot{\varphi} & \text{при } |\Delta\dot{\varphi}| > \Delta\varphi_0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_M = \Delta\theta + K_{21}(V)\dot{\theta} + K_{22}\dot{\omega}_x + K_{23}(V)\dot{\varphi} + K_{24}\dot{\varphi}; \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{зад}^{оп} \text{sign}\Delta\varphi;$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{зад}.$$

Алгоритм управления креном.

$$\begin{cases} \dot{\beta} = b_{11}V\dot{\beta} + b_{12}\dot{\omega}_y + b_{13}V\delta_B; \\ \dot{\omega}_y = b_{21}V^2\dot{\beta} + b_{22}V\dot{\omega}_y + \\ + b_{23}V^2\delta_B + b_{24}V(\dot{\varphi} - \dot{\omega}_y); \\ \dot{\varphi} = b_{31}V^2\dot{\beta} + b_{32}V\dot{\varphi} + b_{33}V^2\delta_B; \\ \dot{\varphi} = \dot{\omega}_y + b_{34}(\varphi - \dot{\varphi}). \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = C_{11}V\dot{\omega}_x + C_{12}\dot{\theta} + C_{13}V\dot{\omega}_y; \\ \dot{\theta} = \dot{\omega}_x + C_{21}(\theta - \dot{\theta}). \end{cases}$$

где (6) и (7) - алгоритм стабилизации курса; (8) - алгоритм управления креном и (9) - алгоритм оценивания и фильтрации.

Шумы электронной аппаратуры, особенности электрических линий связи судна, импульсные помехи могут вызывать высокочастотные колебания управляющих сигналов системы. В существующих системах для подавления колебаний управляющих сигналов прибегают к оперативному уменьшению общего коэффициента усиления системы (режим «коррекция на волну»), отключению резервных электрогидравлических насосов, переходу на полуавтоматическое управление движением. Однако, указанные способы, как правило, ухудшают характеристики систем управления движением.

В системе «Корракс» реализован новый класс цифровых алгоритмов управления движением, основанный на использовании оптимальных линейных цифровых фильтров, построенных с помощью современной теории цифровых систем для больших интервалов квантования, и блока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Такая структура исключает скользящие режимы и обеспечивает заданную частоту перекачки руля с сохранением устойчивости системы и требуемой точностью стабилизации [9-12].

Авторулевой обеспечивает:

- автоматическое ограничение угловой скорости по курсу и маневрирование с заданным радиусом циркуляции;

- полуавтоматическое маневрирование по курсу с использованием прогнозирования;

- следящее управление положением руля от штурвала, установленного на пульте управления;

- дистанционное - простое управление положением руля кнопками ЛЕВО, ПРАВО с пультов управления в ходовой рубке;

- местное - простое управление положением руля кнопками ЛЕВО, ПРАВО с местных пультов управления;

- интегрированное представление информации на пультах управления в различных постах управления о текущих и заданных углах перекачки руля, а так же техническом состоянии оборудования рулевой машины;

- аварийную сигнализацию на местных пультах управления от датчиков, контролирующих в рулевой машине параметры гидросистемы;

- возможность включения/отключения основных и масляных насосов правого и левого бортов с различных пультов управления, а также с местных постов управления;

- сопряжение с любыми навигационными средствами и навигационными комплексами по интерфейсу MIL-1553 (ГОСТ 26765.52-87), а также RS485/422/232;

- возможность включения/отключения резервного насоса с местного поста управления.

Типовая локальная система управления (ЛСУ), совместно с рулевой машиной (РМ) обеспечивает:

- дистанционное следящее управление рулем в соответствии с сигналом заданного положения руля от системы верхнего уровня;

- дистанционное простое управление рулем по дискретным сигналам задания направления

перемещения руля от кнопок ЛЕВО, ПРАВО систем верхнего уровня («Дистанционное-простое»);

- дистанционный пуск и остановка электрических двигателей силовых агрегатов рулевой машины по сигналам от системы верхнего уровня и местного пульта управления ЛСУ РМ;

- местное простое управление рулем по дискретным сигналам задания направления перемещения руля от кнопок ЛЕВО, ПРАВО на местном пульте управления ЛСУ РМ («Местное – простое»);

- индикацию аварийных сигналов рулевой машины на местном пульте управления ЛСУ РМ, а также их передачу в систему верхнего уровня;

- дистанционное и местное управление рулевыми машинами;

- статическую ошибку привода руля не более 1° при нулевом сигнале задания от системы верхнего уровня и не более $1,5^\circ$, в диапазоне $+35^\circ$;

- ограничение перекачки пера рулей на предельных углах для всех видов управления, кроме «Ручного»;

- передачу в систему верхнего уровня по последовательному каналу MIL-1553 информации о текущем отклонении руля, а также о режимах управления (местный, аварийный), параметрах электродвигателя управления приводом насоса и о параметрах гидросистемы (состояние масла, фильтра и т.п.)

Системы управления движением комплектуются в различных вариантах в зависимости от специфики судна. Следует отметить, что электрогидравлические агрегаты (ЭГА), предназначены для управления рулевыми машинами и выполняют функции распределения рабочей жидкости в полости гидроцилиндров рулевых машин, функции дросселирования, коммутации и отсеки. Приборы ЭГА – двухканальные, обеспечивают следящее дистанционное управление положением руля в составе системы управления и по командам системы выполняют необходимые переключения в контуре РМ с выдачей в систему информационных сигналов о выполнении команд. При необходимости реализуется местное управление перекачкой руля от приборов ЭГА.

Цифровая система управления успокоителями качки с активными бортовыми рулями - «Доломит», созданная на базе контроллеров, наряду с высокой эффективностью в части умерения бортовой качки позволяет контролировать параметры движения судна и решает задачи оценки технического состояния успокоителя качки.

Система включает измеритель угла и угловой скорости бортовой качки, прибор удаленного управления работой успокоителя местного пульта управления в отсеке размещения бортовых рулей, электрогидравлические усилители, установленные на насосных агрегатах, прибор связи по положению люльки насоса, прибор обратной связи.

Применение координированного управления курсом и креном корабля при циркуляции позволяет уменьшить радиус циркуляции в среднем в 1,5 раза, а время разворота - в 1,2 раза. Улучшается стабилизация курса при развитом морском волнении.

Заключение

В статье выполнен анализ отечественных систем управления движением (авторулевых). Выявлены особенности их формирования, достоинства и недостатки.

Рассмотрены алгоритмы управления, реализованные в авторулевых с фиксированной структурой, требующие ручной перенастройки коэффициентов управления в зависимости от внешних условий. Алгоритмы авторулевых с переменной структурой повышают качество стабилизации судна.

Рассмотрены особенности возникновения «морской болезни». Представлены математические выражения, позволяющие определить вертикальные ускорения от бортовой и килевой качки для различных типов судов, вызывающие вертикальные перегрузки, воздействующие на экипаж и пассажиров.

Показано влияние боковых перегрузок на экипаж при выполнении им своих функциональных обязанностей. Обозначена градация боковых перегрузок, влияющих на потерю равновесия при выполнении экипажем служебных обязанностей, предложенная в центре им. Д.Тейлора и позволяющая получить универсальный показатель, обозначенный как *MII* (*Motion Induced*

Interruptions).

Рассмотрены алгоритмы адаптивных авторулевых, обеспечивающие, без участия оператора, оптимальную настройку параметров системы при изменении состояния объекта управления и внешних условий плавания (скорости хода, осадки, состояния погоды, глубины под килем). В зависимости от реализуемых принципов адаптации рассмотрены особенности различных типов авторулевых.

Проанализированы отличительные особенности авторулевых типа «Корракс», которые реализуют координированное совместное управление движением судна в режимах автоматического маневрирования и стабилизацию на заданном курсе.

Представлены алгоритмы стабилизации курса, управления креном, оценивания и фильтрации системы управления движением «Корракс», а также функции авторулевого и локальной системы управления.

Изложена концепция алгоритмического обеспечения и дана сравнительная оценка точностных и динамических характеристик систем в различных режимах плавания, в том числе в условиях развитого морского волнения.

Литература

1. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. Учебник. СПб.: Элмор, 2002. 360 с.
2. Интегрированные системы управления технических средств транспорта: учебное пособие / В. М. Амбросовский, О. В. Белый, Д. А. Скороходов, С. Н. Турусов; под ред. Ю. А. Лукомского. СПб.: Элмор, 2001. 287 с.
3. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем / Д.А. Скороходов, В.Ю. Каминский, М.Л. Маринов, А.Л. Стариченков // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т.3. №1(43). С. 20-28.
4. Быков Э.Б., Туркин И.И., Баскаков Л.В. Новое поколение адаптивных авторулевых // Рациональное управление предприятием. 2007. №4. С 88-91.
5. Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Синтез оптимальных энергетических характеристик гидроприводов систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т.2. №2(36). С. 47-54.
6. Корчанов В.М., Скороходов Д. А., Стариченков А. Л. Интеллектуальные технологии в системах управления движением судов // Морские интеллектуальные технологии. 2008. №1. С. 25-30.
7. Исследование энергетических характеристик исполнительных приводов систем управления движением судна на подводных крыльях / В.Ю. Каминский, М.Л. Маринов, Д.А. Скороходов, С.Н.Турусов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.4. №4(42). С. 65-70.
8. Острецов Г.Э., Клячко Л.М. Основные этапы автоматизации управления движением морского судна // Судостроение. 2005. №4. С. 55-59.
9. К созданию нового класса интегрированных систем управления движением корабля / В.М. Корчанов // Научно-технический сборник ФГУП «НПО «Аврора». СПб, 2000. Вып. 1. С. 37-41.
10. Корчанов В.М., Поляков К.Ю. Синтез цифровых алгоритмов управления движением с регулируемой интенсивностью работы исполнительных приводов // Морской вестник. 2007. Спец. выпуск №3(6). С.152-155.
11. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е.И. Веремей, В.М. Корчанов, В.А. Коровкин, С.В. Погожев. СПб: НИИ Химии СПбГУ, 2002. 370 с.
12. Войтецкий В.В., Корчанов В.М., Черныш Ю.Н. Современные комплексы управления скоростными кораблями с динамическими принципами поддержания // Военный парад. 2005. №3. С. 83-92.

References

1. Lukomskij YU.A., Peshekhonov V.G., Skorohodov D.A. Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov. Uchebnik [Navigation and vessel traffic control. Textbook]. SPb. Elmor. 2002. 360 p.
2. Integrirovannyye sistemy upravleniya tekhnicheskikh sredstv transporta: uchebnoye posobie [Integrated management systems of technical means of transport: tutorial]. V. M. Ambrosovskij, O. V. Belyj, D. A. Skorohodov, S. N. Turusov; pod red. YU. A. Lukomskogo. SPb.: Elmor, 2001. 287 p.
3. Upravlenie dvizheniem vodoizmeshchayushchih sudov na perekhode morem [Movement control of displacement vessels at sea crossing]. D.A. Skorohodov, V.YU. Kaminsky, M.L. Marinov, A.L. Starichenkov. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. V.3. №1(43). pp. 20-28.

4. Bykov E.B., Turkin I.I., Baskakov L.V. Novoe pokolenie adaptivnyh avtorulevyh [A new generation of adaptive gyropilot]. Racional'noe upravlenie predpriyatiem. 2007. №4. pp. 88-91.
5. Bogdanov A.G., Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A. Sintez optimal'nyh energeticheskikh harakteristik gidroprivodov sistem upravleniya dvizheniem [Synthesis of optimal energy characteristics of hydraulic drives of motion control systems]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. V.2. №2(36). pp. 47-54.
6. Korchanov V.M., Skorohodov D. A., Starichenkov A. L. Intellektual'nye tekhnologii v sistemah upravleniya dvizheniem sudov [Intelligent technologies in control systems of movement of courts]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2008. №1. pp. 25-30.
7. Issledovanie energeticheskikh harakteristik ispolnitel'nyh privodov sistem upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [Study of the energy characteristics of the actuators of the hydrofoil motion control systems]. V.YU. Kaminsky, M.L. Marinov, D.A. Skorohodov, S.N.Turusov. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. V.4. №4(42). pp. 65-70.
8. Ostrecov G.E., Klyachko L.M. Osnovnye etapy avtomatizacii upravleniya dvizheniem morskogo sudna [The main stages of automation of marine vessel traffic control]. Sudostroenie. 2005. №4. pp. 55-59.
9. K sozdaniyu novogo klassa integrirovannyh sistem upravleniya dvizheniem korablya [To the creation of a new class of integrated ship motion control systems]. V.M. Korchanov. Nauchno-tekhnicheskij sbornik FGUP «NPO «Aurora». SPb. 2000. Vyp. 1. pp. 37-41.
10. Korchanov V.M., Polyakov K.YU. Sintez cifrovyyh algoritmov upravleniya dvizheniem s reguliruemoj intensivnost'yu raboty ispolnitel'nyh privodov [Synthesis of digital motion control algorithms with adjustable intensity of actuators]. Morskoy vestnik. 2007. Spec. vypusk №3(6). pp.152-155.
11. Komp'yuternoe modelirovanie sistem upravleniya dvizheniem morskikh podvizhnyh ob"ektov [Computer simulation of motion control systems for marine moving objects]. E.I. Veremej, V.M. Korchanov, V.A. Korovkin, S.V. Pogoshev. SPb. NII Himii SPbGU. 2002. 370 p.
12. Vojteckij V.V., Korchanov V.M., CHernysh YU.N. Sovremennyye kompleksy upravleniya skorostnymi korablyami s dinamicheskimi principami podderzhaniya [Modern control systems of high-speed ships with dynamic principles of maintenance]. Voennyj parad. 2005. №3. pp. 83-92.

УДК 621.79; 620.193; 544.653.1

ЭФФЕКТИВНАЯ ЗАЩИТА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1579 ОТ ЛОКАЛЬНОГО КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Андрей Сергеевич Гнеденков

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел.+7(914) 792-57-16; e-mail: asg17@mail.com

Сергей Леонидович Синебрюхов

Доктор химических наук, зам. директора по научной работе
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел.+7(914) 707-51-13; e-mail: sls@ich.dvo.ru

Дмитрий Валерьевич Машталя

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
доцент кафедры судовой энергетики и автоматики Дальневосточного федерального университета
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел. +7(908) 440-47-88; e-mail: madiva@inbox.ru

Игорь Евгеньевич Вялый

младший научный сотрудник
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел. +7(914) 322-98-31; e-mail: igorvyal@gmail.com

Владимир Сергеевич Егоркин

Кандидат химических наук, заведующий лабораторией
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел. +7(902) 556-20-27; e-mail: egorkin@ich.dvo.ru

Александр Николаевич Минаев

Доктор технических наук, профессор, директор совместного научно образовательного центра
Дальневосточного федерального университета и Института химии ДВО РАН «Экотехнологии в морской технике»
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
Тел. +7(914) 726-60-58; e-mail: aminaev@mail.ru

Сергей Васильевич Гнеденков

Член-корреспондент РАН, директор
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159
Тел.+7(914) 703-77-91; e-mail: svg21@hotmail.com

Аннотация

Сварное соединение перспективного для использования в судостроении алюминиевого сплава 1579 представляет собой зону повышенной коррозионной активности в хлоридсодержащей среде в силу агломерации интерметаллидных соединений в результате термического воздействия. Проведены сравнительные исследования коррозионных свойств покрытий, сформированных на сплаве 1579 методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) без дополнительной обработки и с дополнительной обработкой в суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ). Установлено, что создание такого композиционного покрытия (КП) значительно улучшает защитные свойства зоны сварного соединения. Методами сканирующего вибрирующего электрода и сканирующего ионоселективного электрода были изучены защитные свойства и особенности гетерогенных коррозионных процессов на поверхности образцов в 0,5 М NaCl. Установлена меньшая интенсивность протекания локальных электрохимических процессов на КП по сравнению с базовым ПЭО-слоем. Дополнительная обработка УПТФЭ позволяет повысить защитные свойства ПЭО-покрытия в 5,5 раз.

Ключевые слова: сварной шов, локальные электрохимические методы, плазменное электролитическое оксидирование.

EFFECTIVE PROTECTION OF THE WELDED JOINT OF ALUMINUM ALLOY 1579 AGAINST LOCAL CORROSION DESTRUCTION

Andrei S. Gnedkov

PhD in Chemical Science, Senior Researcher
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159

tel. +7 (914) 792-57-16, e-mail: asg17@mail.com

Sergey L. Sinebryukhov

Dr. Sci. in Chemistry, Deputy research director
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159
tel. +7 (914) 707-51-13, e-mail: sls@ich.dvo.ru

Dmitry V.h Mashtalyar

PhD in Engineering Science, Head of the Laboratory
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Associate Professor of the Department of Marine Energy and Automation at the Far Eastern Federal University
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159
tel. : +7 (908) 440-47-88, e-mail: madiva@inbox.ru

Igor E. Vyaly

Junior Researcher
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159
tel. : +7 (914) 322-98-31, e-mail: igorvyal@gmail.com

Vladimir S. Egorkin

PhD in Chemical Science, Head of the Laboratory
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159
tel. : +7 (902) 556-20-27, e-mail: egorkin@ich.dvo.ru

Alexander N. Minaev

Dr.Sci.Tech, Professor, Director of the Joint Scientific and Educational Center
Far Eastern Federal University and the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
"Ecotechnology in Marine Engineering"
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.
tel. : +7(914) 726-60-58; e-mail: aminaev@mail.ru

Sergey V. Gnedenkov

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director
Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690022, Vladivostok, pr. 100th anniversary of Vladivostok, 159
tel. +7 (914) 703-77-91, e-mail: svg21@hotmail.com

Abstract

Welded joint of aluminum alloy 1579, which is promising for use in shipbuilding, is an area of increased corrosivity in a chloride-containing medium due to the agglomeration of intermetallic compounds as a result of thermal exposure. Comparative studies of the corrosion properties of coatings formed based on alloy 1579 using plasma electrolytic oxidation (PEO) without additional treatment and with additional treatment in a suspension of ultradispersed polytetrafluoroethylene (UPTFE) were carried out. It has been established that the formation of such a composite coating significantly improves the protective properties of the welded joint zone. The methods of scanning vibrating electrode and scanning ion-selective electrode were used to study the protective properties and peculiarities of heterogeneous corrosion processes on the surface of 0.5 M NaCl samples. A lower intensity in the course of local electrochemical processes on the composite coating was established in comparison with the base PEO layer. Additional UPTFE processing allows increasing the protective properties of PEO-coating by a factor of 5.5.

Keywords: weld, local electrochemical methods, plasma electrolytic oxidation.

Введение

В предыдущей работе [1] коррозионные свойства образца алюминиевого сплава 1579 без покрытия со сварным соединением были изучены с помощью метода сканирующего вибрирующего электрода (SVET), сканирующего ионоселективного электрода (SIET), посредством выдержки образцов в коррозионно-активной среде и анализа продуктов коррозии. Было установлено, что интенсивное растворение магния, присутствующего в качестве легирующего элемента в алюминиевом сплаве 1579, существенно сдвигает значения pH коррозионного раствора в щелочную область. Этот процесс снижает коррозионную устойчивость сплава 1579. Показано, что место сварного соединения является зоной активации процесса коррозии из-за наличия микродефектов в морфологической структуре и

интерметаллических соединений, отличающихся по значениям потенциала коррозии.

Данная работа посвящена исследованию электрохимических свойств покрытий, полученных с использованием метода плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Свойства сформированных поверхностных слоев зависят от режима ПЭО, состава электролита, состава и структуры обрабатываемого сплава [2–10].

Для улучшения защитных свойств базового ПЭО-слоя, покрытие было модифицировано с использованием суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ). Применение УПТФЭ позволяет заполнить поры ПЭО-покрытия полимером и сформировать дополнительный компактный барьерный слой, который значительно снижает проникновение ионов агрессивной среды к

подложке материала, уменьшает диффузию ионов металлов в раствор и улучшает стабильность образца в коррозионно-активной среде [11,12].

Особенности гетерогенного характера развития процесса коррозии на поверхности сварного соединения с покрытиями были изучены локальными электрохимическими методами (SVET и SIET).

Целью настоящей работы было сравнительное исследование с использованием методов SVET и SIET характера протекания локальных коррозионных процессов на сварном соединении алюминиевого сплава 1579 с полимерсодержащим покрытием по сравнению с базовым ПЭО-слоем. Новизна этой работы связана с развитием методов коррозионной защиты сварного шва, являющегося зоной повышенной коррозионной активности.

1. Материалы и методы

В качестве образца для исследования использовали пластины сплава алюминия 1579 (6,78 масс. % Mg; 0,62 масс. % Zn; 0,30 масс. % Mn; 0,14 масс. % Cu; 0,51 масс. % Si; 0,15 масс. % Fe; 0,13 масс. % Zr; 0,13 масс. % Sc; 0,17 масс. % Cr; 0,1 масс. % Ni; 0,02 масс. % Ti; Al – остальное) [1], сваренные аргонодуговым методом.

ПЭО-слой формировали в тартратнофторидном электролите в монополярном гальваностатическом режиме. Коэффициент заполнения равен 100 %. Частота поляризующего сигнала составляла 300 Гц (длительность импульса 3,3 мс, без пауз). Устройство Smart Chiller H150-3000 (LabTech Inc., USA) использовали для контроля и поддержания температуры электролита (15 °С) во время процесса оксидирования. Для контроля электрических параметров использовали автоматизированную систему управления, подключенную к персональному компьютеру с соответствующим программным обеспечением. Длительность ПЭО-процесса была равна 150 с.

Модификация ПЭО-покрытия осуществлялась обработкой образца в суспензии порошка УПТФЭ (15 мас. %) в изопропанол. Полимер наносили на базовый ПЭО-слой методом окунания (dip-coating method). Время выдержки образца в суспензии составляло до 10–15 с. Затем образец высушивали на воздухе при комнатной температуре в течение 20 мин. Температура и продолжительность термической обработки образца с композиционным слоем после процесса нанесения покрытия составляли 350 °С и 15 мин, соответственно. В конце процесса образец с полимерсодержащим покрытием после термообработки охлаждали до 25 °С. Была использована однократная обработка ПЭО-покрытия.

В настоящей работе для исследования изменения защитных свойств образца после ПЭО и УПТФЭ обработки была использована система SVET/SIET (Applicable Electronics, USA). Детальное описание методики проведения измерений SVET и SIET приведено в работе [1].

Квазиодновременные SVET/SIET измерения [13] были проведены на образцах из алюминиевого сплава с защитными покрытиями. Исследуемая площадь не превышала 6 мм² и была ограничена воском. Развитие процесса коррозии на поверхности области сварного соединения

алюминиевого сплава 1579 с покрытиями регистрировали с использованием методов SVET/SIET в процессе выдержки образца в коррозионно-активной среде (в течение 98 ч для образца с ПЭО-покрытием и 500 ч для образца с композиционным полимерсодержащим покрытием).

Расчет общих анодных и катодных токов или суммы этих токов и представление в виде графика зависимости этих значений от времени выдержки образца в коррозионной среде [14,15] были использованы в данной работе для оценки развития коррозионного процесса.

Поперечный шлиф исследуемого образца, включая область сварного шва, для проведения измерений методами SVET/SIET был изготовлен с использованием оборудования Tegamin 25 (Struers A/S, Denmark) согласно методики, представленной в работе [1]. Базовое ПЭО-покрытие и композиционное покрытие были сформированы на образцах, залитых в эпоксидную смолу и представляющих собой поперечный разрез сварного соединения (рис. 1).

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 исследуемая область образца из алюминиевого сплава 1579 со сварным соединением, обработанного методом ПЭО, отмечена рамкой, а граница сварного шва образца – пунктирной линией.

Методами SVET и SIET были обнаружены незначительные изменения электрохимической активности (на микроуровне) на поверхности образца (рис. 2). Катодная активность (темно-синяя область с более низкими значениями плотности тока и с более высокими значениями pH) была обнаружена на границе сварного шва и соседней области сварного соединения. Диаграммы SVET и SIET представлены после 510 мин выдержки образца в растворе, поскольку коррозионная активность образца, обработанного ПЭО методом, практически не изменилась за этот период времени. Стоит отметить, что после формирования ПЭО-покрытия на поверхности образца, первоначально анодная зона сварного шва (до ПЭО) стала катодной.

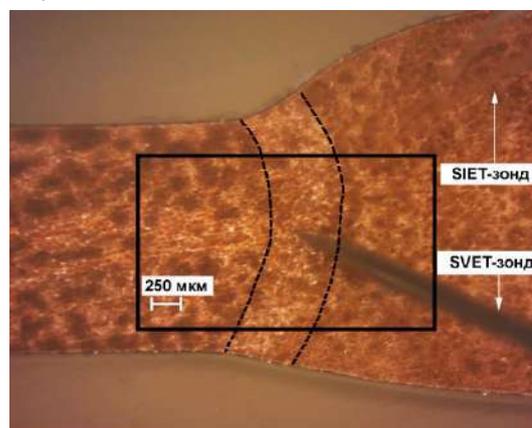


Рис. 1. Оптическое изображение исследуемой области сварного соединения образца из алюминиевого сплава 1579 с ПЭО-покрытием перед проведением SVET/SIET экспериментов

Результаты измерений SVET и SIET указывают на гетерогенный характер протекания электрохимических процессов на поверхности материала. Причина электрохимической активности границы шва связана с морфологическими особенностями этой области и наличием микродефектов, которые были обнаружены SVET/SIET измерениями [1]. После проведения ПЭО обработки дефектные зоны были закрыты в результате формирования ПЭО-слоя, вследствие чего зона сварного соединения стала катодной (рис. 2). Из-за наличия микродефектов в морфологической структуре области сварного шва, покрытие, полученное методом ПЭО на поверхности этой области, является более плотным и обладает более высокими защитными свойствами, чем покрытие на поверхности сплава. Эффект изменения полярности области сварного соединения с анодной на катодную (значения плотности тока в области сварного шва достигает -7 мкА см^{-2}) является результатом повышения защитных свойств материала после ПЭО процесса. Другая часть образца играет роль анода с невысокой электрохимической активностью, поскольку значения плотности анодного тока не превышали 2 мкА см^{-2} после 510 мин выдержки образца (рис. 2а). Причина невысоких значений плотности анодного тока, равномерно распределенного по поверхности исследуемого материала, связана с несквозными порами ПЭО-покрытия, что является одной из особенностей такого типа покрытий [11,16–21]. Максимальная разница плотностей тока между анодным и катодным значениями для образца из сплава алюминия без покрытия после 510 мин выдержки образца в 0,5 М растворе NaCl составила 180 мкА см^{-2} [1]. Для образца с ПЭО-покрытием этот параметр не превышает 9 мкА см^{-2} (рис. 2а). Метод SIET также зарегистрировал катодную зону (с более высокими значениями pH) в области сварного соединения (рис. 2б). Этот результат указывает на низкую скорость процесса коррозии образца с ПЭО-покрытием.

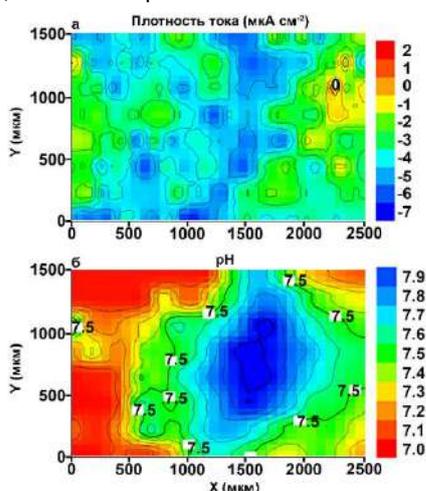


Рис. 2. Диаграммы распределения плотности тока (SVET) (а) и pH (SIET) (б) на поверхности области сварного соединения образца алюминиевого сплава 1579 с ПЭО-покрытием после 510 мин выдержки в 0,5 М растворе NaCl

Для дальнейшего улучшения защитных свойств и снижения активности границы сварного шва, ПЭО-покрытие было обработано УПТФЭ. После формирования композиционного покрытия образцы выдерживали в 0,5 М растворе NaCl в течение 500 ч.

Методами SVET и SIET была зафиксирована низкая электрохимическая активность на микроуровне на поверхности исследуемого образца с КП. Согласно полученным данным в ходе эксперимента не было зарегистрировано питтингообразования, разрушения покрытия и других серьезных изменений. Отмечено существенное улучшение защитных свойств алюминиевого сплава с композиционным поверхностным слоем по сравнению с образцом с ПЭО-покрытием и без покрытия согласно данным, представленным на рис. 3. Изменение во времени суммы общих катодных и анодных токов для КП незначительное.

По сравнению с образцом без покрытия двукратное снижение активности было зарегистрировано для образца с ПЭО-слоем в течение всего времени выдержки. В тоже время через 87 ч выдержки после монотонного незначительного повышения значения общего тока наблюдается ускорение процесса коррозии с увеличением тока от 0,18 мкА до 0,29 мкА. Что обусловлено образованием питтинга и протеканием процесса коррозии под ПЭО-слоем. Образец с композиционным полимерсодержащим покрытием обладает наименьшей коррозионной активностью с максимальным значением общего тока 0,15 мкА после 500 ч выдержки образца.

На основании анализа экспериментальных данных было установлено, что однократная обработка УПТФЭ позволяет значительно улучшить ПЭО-покрытие, и благодаря формированию КП, существенно повысить защитные свойства (более чем в 5,5 раз) алюминиевого сплава, обработанного ПЭО, что было подтверждено методами SVET/SIET.

Для оценки изменения распределения локального pH для образцов из алюминиевого сплава, максимальные и минимальные значения pH представлены на рис. 4 как функция от времени выдержки.



Рис. 3. Изменение суммы общих катодных и анодных токов для трех образцов из алюминиевого сплава (без покрытия, с ПЭО-слоем, с композиционным полимерсодержащим покрытием)

pH для образца без защитного покрытия динамически изменялся в течение всего эксперимента, что указывает на высокую интенсивность протекания реакции растворения и гидролиза алюминия, которые сдвигают pH в более кислотную область до значения 4,5. Для образца с ПЭО-слоем максимальные и минимальные значения pH увеличились (до 7,9 и 7,0 соответственно) в течение 30 ч. Затем значения pH практически не изменялись до 90 ч, после чего произошло образование питтинга (значения pH снизились до 4,4) (рис. 4). Максимальные и минимальные pH для образца с композиционным покрытием находятся в щелочной области и незначительно увеличиваются со временем (8,24 и 8,12, соответственно).

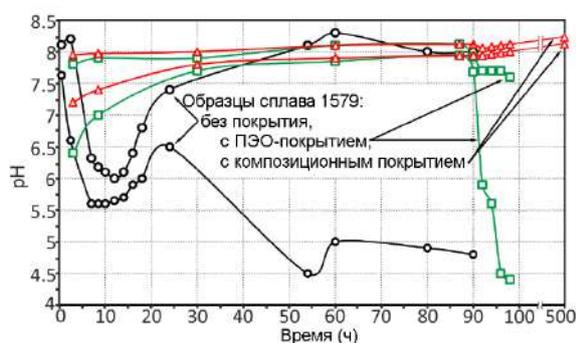


Рис. 4. Изменение максимального и минимального pH как функции от времени для образцов из сплава 1579 без покрытия, с ПЭО-слоем и с композиционным полимерсодержащим покрытием

Заключение

Разработан способ формирования защитного композиционного покрытия на поверхности подвергнутого сварке алюминиевого сплава 1579 (перспективного для использования в судостроении) для снижения электрохимической активности зоны сварных соединений.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-73-00078).

Литература / References

- Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D. V., Vyaliy I.E., Egorkin V.S., Gnedenkov S. V., *Materials.*, 11 (2018) 2053.
- Matykina E., Arrabal R., Mohamed A., Skeldon P., Thompson G.E., *Corrosion Science.*, 51 (2009) 2897.
- Monfort F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K., *Corrosion Science.*, 49 (2007) 672.
- Stojadinovic S., Vasilic R., Belca I., Petkovic M., Kasalica B., Nedic Z., Zekovic L., *Corrosion Science.*, 52 (2010) 3258.
- Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Puz A.V., Gnedenkov A.S., Vyaliy I.E., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., *Solid State Phenomena.*, 213 (2014) 149.
- Liu X., Wang S., Du N., Li X., Zhao Q., *Coatings.*, 8 (2018) 105.
- Sieber M., Simchen F., Morgenstern R., Scharf I., Lampke T., *Metals.*, 8 (2018) 356.
- Egorkin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyaliy I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G., *Surface and Coatings Technology.*, 334 (2018) 29.
- Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V., *Solid State Phenomena.*, 213 (2014) 143.
- Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Khrisanfova O.A., Gnedenkov S.V., *Surface Engineering.*, 25 (2009) 565.
- Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S., *Corrosion Science.*, 85 (2014) 52.
- Gnedenkov S. V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov S.L., Puz A. V, Gnedenkov A.S., *Materials and Manufacturing Processes.*, 23 (2008) 879.
- Lamaka S.V., Taryba M., Montemor M.F., Isaacs H.S., Ferreira M.G.S., *Electrochemistry Communications.*, 13

(2011) 20.

14. Alvarez-Pampliega A., Lamaka S.V., Taryba M.G., Madani M., De Strycker J., Tourwé E., Ferreira M.G.S., Terryn H., *Electrochimica Acta.*, 61 (2012) 107.
15. Montemor M.F., Snihirova D.V., Taryba M.G., Lamaka S.V., Kartsonakis I.A., Balaskas A.C., Kordas G.C., Tedim J., Kuznetsova A., Zheludkevich, M.L. Ferreira, M.G.S., *Electrochimica Acta.*, 60 (2012) 31.
16. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V., *Corrosion Science.*, 102 (2016) 348.
17. Golestani-Fard F., Bayati M.R., Zargar H.R., Abbasi S., Rezaei H.R., *Materials Research Bulletin.*, 46 (2011) 2422.
18. Mohedano M., Blawert C., Zheludkevich M.L., *Surface and Coatings Technology.*, 269 (2015) 145.
19. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V., *Physics Procedia.*, 23 (2012) 98.
20. Sobolev A., Kossenko A., Zinigrad M., Borodianskiy K., *Applied Sciences.*, 7 (2017) 889.
21. Liu H., Pan W., Si F., Huang K., Liu Y., Liu J., *Metals.*, 8 (2018) 118.

УДК 621.438

ЗАМКНУТЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Валерий Тимофеевич Матвеевко

Доктор технических наук, профессор,
Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28
тел.: +7(978)-81-46-744, e-mail: mvt3900@mail.ru

Андрей Вартазарович Дологлонян

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией,
Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28
тел.: +7(978)-77-92-749, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Владимир Анатольевич Очеретяный

Кандидат технических наук, доцент,
Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, Университетская, 33
тел.: +7(978)-76-72-861, e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Аннотация

В условиях Арктики при освоении месторождений шельфа морей и океанов существенная роль отводится подводной технике, которая должна обладать значительной энергоемкостью, возможностью длительное время работать в отрыве от инфраструктуры мест базирования. Среди различных типов энергоустановок для этих целей перспективны замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ), обладающие большой удельной мощностью.

В работе проведен анализ характеристик рабочих циклов ЗГТУ различных схем и в качестве базовой выбрана ЗГТУ с регенерацией теплоты, как наиболее экономичная по сравнению с ЗГТУ простого цикла и конструктивно предпочтительная для микрогазотурбинной установки, способной работать по одноконтурной схеме на органическом топливе с воздухом в качестве окислителя.

В качестве рабочего тела используется смесь азота, как основного компонента, и продуктов сгорания топлива. Излишки рабочего тела в виде азота и углекислого газа удаляются из цикла за борт.

Дальнейшее повышение экономичности простого цикла предложено за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов в турбокомпрессорном утилизаторе (ТКУ), состоящем из турбины перерасширения, приводящей дожимающий компрессор и регенератора с охладителем газа между ними.

Установлено, что экономичность ЗГТУ с ТКУ и регенерацией теплоты выше по сравнению с базовой ЗГТУ с регенерацией на 15...25 %, удельная мощность увеличивается в среднем в 1,5 раза при оптимальной для микрогазотурбинной установки степени повышения давления в компрессоре двигателя.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор

CLOSED-CYCLE GAS-TURBINE PLANTS FOR PROPULSION COMPLEXES OF UNDERWATER ENGINEERING

Valery T. Matveenko

Dr.Sci.Tech, Professor

Institute of Natural Technology Systems, 299011, Sevastopol, Lenin, 28
tel.: +7(978)-81-46-744, e-mail: mvt3900@mail.ru

Andrey V. Dologlonyan

PhD in Engineering Science, Senior Researcher, Head of Laboratory
Institute of Natural Technology Systems, 299011, Sevastopol, Lenin, 28
tel.: +7(978)-77-92-749, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Vladimir A. Ocheretyaniy

PhD in Engineering Science, Associate Professor
Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33
tel.: +7(978)-76-72-861, e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Abstract

In the Arctic, when developing offshore deposits of the seas and oceans, a significant role is given to underwater equipment, which should have significant energy consumption, an ability to work for a long time in isolation from the infrastructure. Among various types of power plants, closed-cycle gas turbine plants (CCGT) with a high specific power are promising for these purposes.

The paper analyzes the characteristics of CCGT operating cycles of various schemes and selects CCGT with heat recovery as the base one, which is the most economical in comparison with CCGT of an ordinary cycle and structurally preferable for a micro-gas turbine plant capable of operating according to a single-circuit scheme on organic fuel with air as an oxidizing agent.

As a working fluid, a mixture of nitrogen, as the main component, and fuel combustion products is used. Excess fluid in the form of nitrogen and carbon dioxide is removed from the cycle overboard.

A further increase in the efficiency of a simple cycle was proposed due to the deep utilization of the heat of the exhaust gases in a turbocompressor utilizer (TCU), consisting of an over-expansion turbine actuating a booster compressor and a regenerator with a gas cooler between them.

It has been established that the efficiency of CCGT with TCU and heat recovery is higher by 15 ... 25% in comparison with the base CCGT with regeneration, specific power increases by 1.5 times on average with the optimum degree of pressure increase in the engine compressor for a micro-gas turbine plant.

Keywords: closed-cycle gas turbine plant, microturbine, heat recovery, over-expansion turbine, turbocompressor utilizer.

Введение

При освоении природных богатств морей и океанов, а также Арктического шельфа, существенная роль отводится подводной технике, выполняющей как технологические, так и эксплуатационные функции в составе пропульсивных установок подводных судов и аппаратов. Возможности подводной техники в значительной степени зависят от энергетической оснащенности судов и аппаратов. Среди различных типов энергоустановок [1, 2, 3, 4] вызывает интерес замкнутые газотурбинные установки, как более энергоэффективные, способные в одноконтурном варианте с различными способами усложнения рабочего цикла двигателя работать на органических видах топлива [5, 6]. Окислителем традиционно является кислород, находящийся на борту аппарата в газообразном или жидком виде в соответствующих системах хранения. Для получения и обеспечения кислородом нужна специальная береговая инфраструктура, которая ограничивает радиус действия подводной техники.

В качестве окислителя можно использовать сжатый воздух, который на подводных судах и аппаратах хранится в сжатом виде в баллонах [7]. В надводном положении баллоны наполняются сжатым воздухом от объекта базирования или собственного компрессора.

В новом рабочем теле, включающем продукты сгорания органического топлива, присутствует в значительном количестве и азот, поэтому необходимо определить термодинамические параметры и оптимальные их значения в рабочих циклах замкнутых газотурбинных двигателей (ГТД).

Рабочее тело замкнутого ГТД, работающего на органическом топливе и окислителе-воздухе

В одноконтурном замкнутом ГТД при горении органического топлива (C_nH_m) с окислителем-воздухом (газовая смесь $N_2 + O_2$) образуются основные продукты сгорания: это диоксид углерода CO_2 и пары воды H_2O в смеси с азотом N_2 . Так как окислитель-воздух подается непосредственно в зону горения в жаровую трубу камеры сгорания с определенным избытком, то перед турбиной рабочее тело состоит из смеси $N_2 + CO_2 + H_2O$ при коэффициенте избытка воздуха в зоне горения жаровой трубы камеры сгорания $\alpha = 1$, при $\alpha > 1$ рабочее тело состоит из $N_2 + CO_2 + H_2O + O_2$. После турбины при охлаждении рабочего тела часть паров воды конденсируется и удаляется из цикла и, далее, перед компрессором вода находится в виде пара на линии насыщения при температуре T_1 на

входе в компрессор. После компрессора двигателя избыток рабочего тела удаляется непосредственно за борт.

Базовые схемы замкнутых одноконтурных ГТД, работающих на органическом топливе и окислителе-воздухе

За основу базовой схемы замкнутого ГТД принят ГТД простого цикла, который на первом этапе усложнен с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла одновальный для привода электрогенератора или двухвальной со свободной силовой турбиной.

Усложнение ГТД простого цикла предлагается рассмотреть за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [8, 9, 10, 11] с целью повышения мощности ГТД.

На рис. 1 изображена схема замкнутой газотурбинной установки с регенерацией теплоты, в которой по отношению к схеме ЗГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подгрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, который позволит повысить КПД самого двигателя.

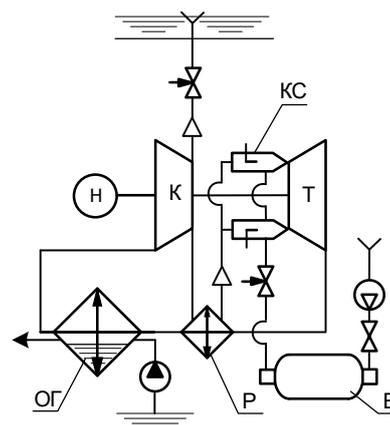


Рис. 1. Схема замкнутой ГТУ с регенерацией теплоты

К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; Р – регенератор; ОГ – охладитель газа; Н – нагрузка; Б – баллон сжатого воздуха

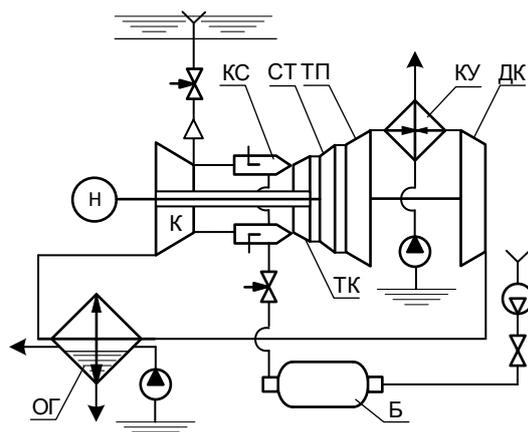


Рис. 2. Схема замкнутой ГТУ с турбиной перерасширения

К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – турбина компрессора; СТ – силовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ОГ – охладитель газа; Н – нагрузка; Б – баллон сжатого воздуха; ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор

На рис. 2 изображена схема ЗГТУ с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК), охлаждает газ между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор. Посредством применения в рабочем цикле перерасширения газа за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя и, следовательно, при том же расходе топлива повышается КПД двигателя.

В г. Севастополе создан опытный газотурбогенератор с ТКУ на базе вспомогательной газотурбинной установки АИ-8 (рис. 4). Испытание газотурбогенератора с ТКУ подтвердили достоверность теоретических разработок по утилизации теплоты в турбине перерасширения в составе ТКУ. Установка обладает постоянно высоким теплотехническим (общим) КПД и устойчивой работой всех элементов на всех режимах нагружения.

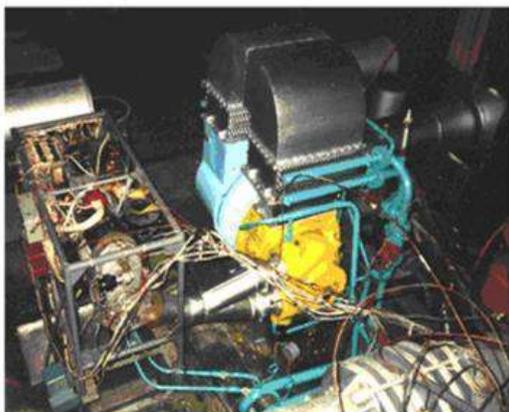


Рис. 3. экспериментальный газотурбогенератор с турбиной перерасширения (турбокомпрессорным утилизатором) электрической мощностью 60 кВт

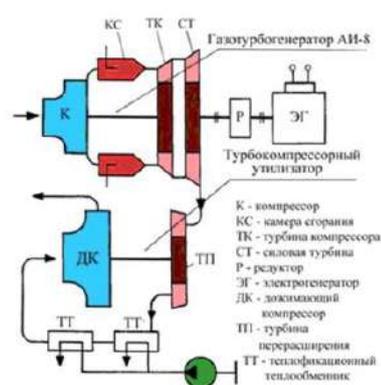


Рис. 4. Схема экспериментального газотурбогенератора с турбокомпрессорным утилизатором

В схеме опытной газотурбинной установки применена свободная газовая турбина, характерная для ГТУ пропульсивных комплексов судов, работающих при винтовом виде нагружения.

Методика и результаты исследования характеристик усложненных замкнутых ГТД

Исследование характеристик рабочих циклов замкнутых ГТД (ЗГТД) производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в ЗГТУ, приведенных в работе [5]. При анализе циклов одноконтурных ЗГТД в имеемые математические модели термодинамических процессов были введены параметры нового рабочего тела – смеси газов азота и продуктов сгорания органического топлива.

Для подводных судов предпочтительны ЗГТУ средней мощности, которые могут быть созданы на базе турбомашин, освоенных промышленностью. При этом КПД турбокомпрессоров достигает значений 86...88 %, охлаждаемой турбинной ступени – 86...88 %, силовых турбин – в пределах 88...92 %.

В микрогазотурбинных установках необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [12, 13]. Так КПД компрессора находится в пределах 76...80 %, неохлаждаемой турбины достигает 88...90 %. Начальная температура газа в микротурбине имеет значение от 1173 до 1373 К, при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для ЗГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для микротурбинных установок. Так при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, для микротурбины степень регенерации $\sigma = 0,8$ является оптимальной.

Анализ характеристик циклов ЗГТД производился при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, начальной температуры газа T_3 и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для газотурбинных установок.

На рис. 5 изображены характеристики циклов ЗГТД с регенерацией теплоты (Р), ЗГТД с турбиной перерасширения (П+ТП) и для сравнения ЗГТД простого цикла (П). Рабочим телом в ЗГТД является смесь газов, состоящая из $N_2 + CO_2 + H_2O$

+ O_2 . При начальной температуре газа $T_3 = 1373$ К турбинная ступень высокого давления выполнена неохлаждаемой. Окислителем при горении органического топлива является воздух.

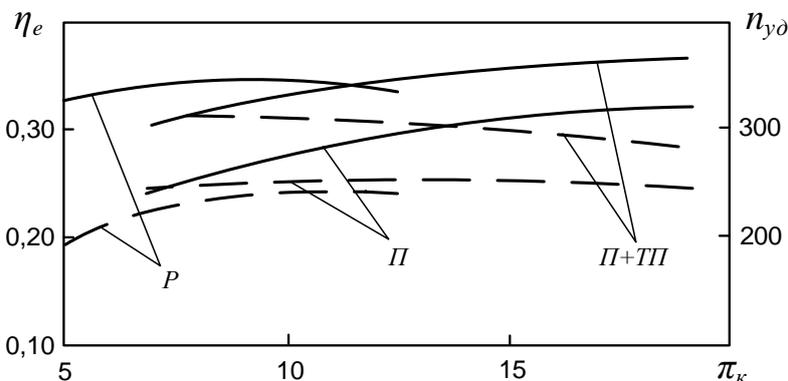


Рис. 5. Зависимость КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (пунктирные линии) от степени повышения давления π_k для ЗГТД с регенерацией (Р), ЗГТД с турбиной перерасширения (П+ТП) и простого цикла (П) при $T_3 = 1373$ К, $\sigma = 0,8$, $\pi_{dk} = 2,0$, окислитель – воздух

Дожимающий компрессор со степенью повышения давления $\pi_{dk} = 2,0$ создает понижение давления за силовой турбиной, что обеспечивает увеличение мощности двигателя.

КПД ЗГТД с Р и ЗГТД с ТП примерно равны и выше, чем в ГТД простого цикла. Однако, оптимальные по КПД степени повышения давления π_k в двигателях существенно различаются. Поэтому для микрогазотурбинных установок целесообразно применять ЗГТД с регенерацией теплоты, конструктивно имеющий меньшие оптимальные значения π_k в компрессоре двигателя.

Замкнутый микрогазотурбинный двигатель (ЗМГТД) с регенерацией теплоты для энергоустановки подводной техники принимаем за базовый и как двигатель, имеющий потенциальные возможности увеличения КПД.

В перспективе ЗГТУ с ТП, построенные на базе ГТД простого цикла, могут рассматриваться в качестве главных двигателей в пропульсивном комплексе подводных судов обеспечения.

Результаты исследования характеристик ЗГТД сложного цикла

Повышение КПД ЗГТД возможно за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, превратив часть ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности ГТД, а именно, за силовой турбиной ГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор встроить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На рис. 6 изображена схема ЗГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия. Охладитель ОГ1 может выполнять функции котла-

утилизатора для обеспечения объекта теплотой. Подача окислителя-воздуха и удаление излишков рабочего тела из контура производится также как в схеме на рис. 1.

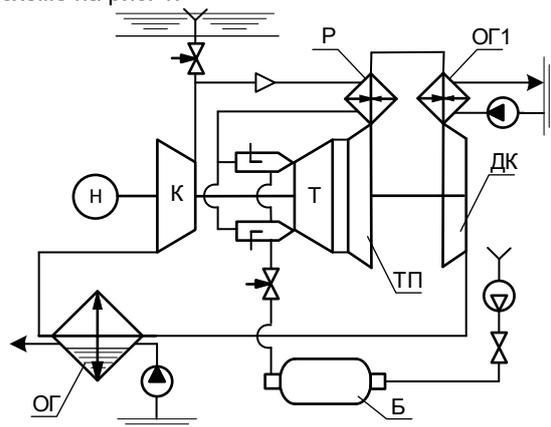


Рис. 6. Схема замкнутого ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты.

Параметры узлов при исследовании циклов ЗГТД с ТКУ и Р применялись при расчетах такие же, как и в ЗГТД с регенерацией теплоты. Для определения оптимальных параметров циклов ЗГТД исследования проводились при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре π_{dk} и при различных начальных температурах газа T_3 в двигателе.

На рис. 7 изображены характеристики циклов ЗГТД с ТКУ и Р (ТП+Р) и ЗМГТД с Р (Р). Рабочим телом также являлась смесь $N_2 + CO_2 + H_2O + O_2$, а окислителем – воздух. Температура газа на входе в компрессор двигателя и дожимающий компрессор принята равной 313 К.

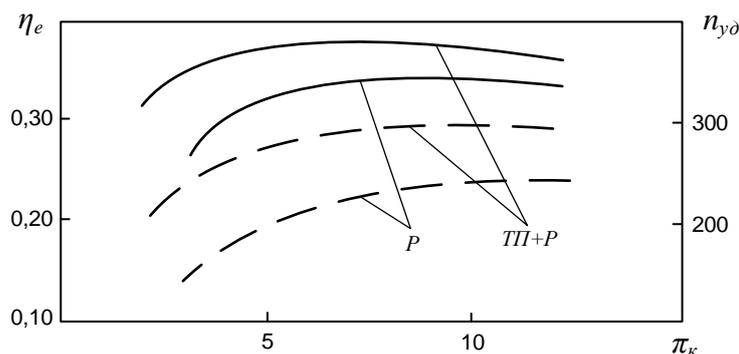


Рис. 7. Зависимости КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности n_{yd} (пунктирные линии) от π_k для ЗГТД при $T_3 = 1373\text{ K}$, $\pi_{dk} = 2,0$ и $\sigma = 0,8$

Установлено, что при оптимальных степенях повышения давления π_k в ЗГТД с ТКУ и Р экономичность более высокая, чем в ЗМГТД с Р относительно на 12...15%, удельная мощность увеличивается в среднем в 1,3...1,5 раза. Увеличение удельной мощности единицы рабочего тела в цикле двигателя положительно влияет на массовые и габаритные показатели энергоустановки, особенно, включающей теплообменное оборудование.

Заключение

1. Достоинство ЗГТД заключается в одноконтурности, в применении органического топлива и окислителя-воздуха, что исключает

необходимость иметь сложную инфраструктуру берегового базирования.

2. Замкнутую микрогазотурбинную установку с регенерацией теплоты целесообразно принять в качестве базовой для энергетики подводной техники.

3. ЗМГТД с регенерацией теплоты и турбиной перерасширения можно рассматривать как перспективное направление развития микрогазотурбинных двигателей для подводной техники.

4. ЗГТУ с турбиной перерасширения целесообразно применять для пропульсивного комплекса подводных судов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00469

Литература

1. Чернышев Е.А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е.А. Чернышев, Е.А. Романова, А.Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова – 2015. – № 5(33) – С. 140-152.
2. Замуков В.В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В.В. Замуков, Д.В. Сидоренков // Судостроение. – 2012. – № 4 – С. 29-33.
3. Commander J G Hawley, Lieutenant & Commander S J Ashcroft, Lieutenant & Commander M A Patrick, Lieutenant. (1994). Advanced underwater power systems. Proc IME J Power Energ. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 208. 37-45. 10.1243/PIME_PROC_1994_208_007_02.
4. L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P.V. Aravind, A review of fuel cell systems for maritime applications, Journal of Power Sources, Volume 327, 2016, Pages 345-364,
5. Матвеев В.Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный, А.В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова – 2018. – № 3(43) – С. 612-618.
6. Патент на полезную модель 180005 Российская Федерация, МПК F02C6/12. Газотурбинная воздухонезависимая установка подводного аппарата / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный: заявитель и патентообладатель ФГБВОУВО «Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова», – № 2011111332, заяв. 04.04.2017; опубл. 30.05.2018, Бюл. № 16.
7. Патент на полезную модель 188226 Российская Федерация, МПК F02C1/10. Замкнутая газотурбинная воздухонезависимая установка для подводной несущей платформы / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный: заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Институт природно-технических систем», – № 2018131778, заяв. 03.09.2018; опубл. 03.04.2019, Бюл. № 10.
8. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 4-5. – С. 81-85.
9. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matvienko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
10. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.

11. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianyi // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
12. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. – М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 678 с.
13. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.

References

1. CHernyshev E.A. Razvitie vozduhonezavisimyh energeticheskikh ustanovok podvodnyh lodok / E.A. CHernyshev, E.A. Romanova, A.D. Romanov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova – 2015. – № 5(33) – S. 140-152.
2. Zamukov V.V. Vybor vozduhonezavisimoy energoustanovki neatomnyh podvodnyh lodok / V.V. Zamukov, D.V. Sidorenkov // Sudostroenie. – 2012. – № 4 – S. 29-33.
3. Commander J G Hawley, Lieutenant & Commander S J Ashcroft, Lieutenant & Commander M A Patrick, Lieutenant. (1994). Advanced underwater power systems. Proc IME J Power Energ. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 208. 37-45. 10.1243/PIME_PROC_1994_208_007_02.
4. L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P.V. Aravind, A review of fuel cell systems for maritime applications, Journal of Power Sources, Volume 327, 2016, Pages 345-364,
5. Matveenko V.T. Harakteristiki rabochih processov vozduhonezavisimyh odnokonturnyh mikrogazoturbinnih ustanovok dlya podvodnoj tekhniki / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj, A.V. Dologlonyan // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova – 2018. – № 3(43) – S. 612-618.
6. Patent na poleznuyu model' 180005 Rossijskaya Federaciya, MPK F02C6/12. Gazoturbinnaya vozduhonezavisimaya ustanovka podvodnogo apparata / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj: zayavitel' i patentoobladatel' FGBVOUVO «CHernomorskoe vysshee voenno-morskoe uchilishche im. P.S. Nahimova», – № 2011111332, zayav. 04.04.2017; opubl. 30.05.2018, Byul. № 16.
7. Patent na poleznuyu model' 188226 Rossijskaya Federaciya, MPK F02C1/10. Zamknutaya gazoturbinnaya vozduhonezavisimaya ustanovka dlya podvodnoj nesushchej platformy / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj: zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU «Institut prirodno-tekhnicheskikh sistem», – № 2018131778, zayav. 03.09.2018; opubl. 03.04.2019, Byul. № 10.
8. Matveenko V.T. Glubokaya utilizaciya teploty v gazoturbinnih dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. – 1997. – T. 19. – № 4-5. – S. 81-85.
9. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansionturbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
10. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
11. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianyi // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
12. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnih i kombinirovannyh ustanovok / A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. – M. Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2017. – 678 s.
13. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.

УДК 621.165

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КПД ИНДУКТОРНОГО ТОРМОЗА

Дамир Ирекович Ибрагимов

старший преподаватель кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточного федерального университета
690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: damir-vl@mail.ru

Дмитрий Анатольевич Макаров

старший преподаватель военного учебного центра
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

Никита Александрович Камаев

студент кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: kamaev.nikita@mail.ru

Александр Михайлович Шилов

студент кафедры судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный Федеральный Университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: jak1998antoni@mail.ru

Аннотация

В статье представлена методика определения электрического КПД индукторного тормоза, который будет использоваться в дальнейшем в качестве нагрузочного и измерительного устройства при исследованиях микротурбин, эксплуатируемых в судовых энергетических установках. Это связано с тем, что при испытаниях малоразмерных и маломощных газовых микротурбинных ступеней, необходимо уделять повышенное внимание точному определению их КПД с целью корректной оценки влияния различных конструктивных и режимных факторов на потери в проточной части ступени кинетической энергии газа. Применение методики позволит определять мощность на валу микротурбины посредством измерения, подводимых к зажимам индукторного тормоза, тока и напряжения. Такое решение позволит проводить качественные экспериментальные исследования микротурбинных двигателей транспортных энергетических установок при условии достаточно точного определения электрического КПД индукторного тормоза (ИТ) и использовании созданной на основе полученной экспериментальной базы данных математической модели описывающей зависимость КПД индукторного тормоза в зависимости от исследованных факторов.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия (КПД), индукторный тормоз, электродвигатель, зажим, тормозное устройство, микротурбина.

EXPERIMENTAL DETERMINATION METHOD FOR ELECTRIC EFFICIENCY OF INDUCTOR BRAKE

Damir I. Ibragimov

Senior Lecturer, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: damir-vl@mail.ru

Dmitry A. Makarov

Senior teacher of the military training center
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Viktor V. Porshkevich

Postgraduate Student, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Nikita A. Kamaev

Student, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: kamaev.nikita@mail.ru

Alexander M. Shilov

Student, Department of Ship Power and Automation
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova, 8.
e-mail: jak1998antoni@mail.ru

Abstract

The article presents a method for determining the electrical efficiency of an inductor brake, which will be used in the future as a loading and measuring device for research of microturbines used in ship power plants. This is due to the fact that when testing small-sized and low-power gas microturbine stages, it is necessary to pay special attention to accuracy of determining their efficiency in order to correctly assess the effect of various design and operation factors on the losses of the kinetic energy of gas in the stage flow path. The application of the method will allow determining the power at a microturbine shaft by measuring the current and voltage applied to the terminals of the induction brake. Such a solution will allow for qualitative experimental studies of microturbine engines of transport power plants, provided that the electric efficiency of the induction brake (IB) is sufficiently accurately measured and the mathematical model, created on the basis of the experimental database that describes dependence of the induction brake efficiency depending on the factors studied, is applied.

Key words: coefficient of performance (EFFICIENCY), inductor brake, electric motor, terminal, brake device, microturbine.

Введение

Перспективность исследования турбин с малыми размерами проточных частей подтверждается большой распространенностью их в транспортной энергетике и не только в качестве двигателей, входящих в состав энергетических установок транспортных средств, но и в качестве приводных двигателей пневмоинструмента для их ремонта и обслуживания [1-5].

Исследования турбин начинают в основном со статических режимов [6], однако и в этом случае исследования проводятся на установке, позволяющей без конструктивных изменений перейти к динамическим исследованиям. Для этого экспериментальные стенды должны быть оснащены тормозным устройством, позволяющим измерять момент на валу турбины, для определения мощности. Для мощных малооборотных турбин в этом случае могут использоваться электрогенераторы, однако микротурбины, имеют частоту вращения ротора, в области оптимальных режимов, более 50000 об/мин. И если вопрос, связанный с ограничением частоты вращения подшипников решается с помощью перевода шариковых подшипников на подшипники с газовой смазкой [7-9], остается проблема – отсутствие электрогенераторов способных работать с такой частотой вращения ротора. В этом случае в качестве нагрузочного устройства необходимо применять индукторный тормоз (ИТ). С таким устройством было проведено основная масса экспериментов по определению КПД микротурбин, путем "взвешивания" индукторного тормоза на внешние подшипники, с целью получения возможности измерять момент силы на валу турбины [10, 11] и с его же помощью изменять частоту вращения вала турбины для исследования ее характеристик на частичных режимах [12-21].

В статье описан метод использования ИТ в качестве нагрузочного устройства без "взвешивания" его на внешние подшипники, которые привносят

значительную погрешность при измерениях, а измерив подаваемое напряжение и ток на зажимах и определив затраченную мощность определить мощность на валу микротурбины. При этом необходимо учесть электрический КПД ИТ, который представляет собой отношение полезной мощности (мощность на валу турбины) к затраченной мощности (произведение тока и напряжения, подаваемых на зажимы ИТ). В связи с тем, что величина электрического КПД заранее неизвестна была сформулирована цель работы.

Цель работы – разработать методику определения электрического КПД ИТ в зависимости от: мощности подаваемой на него; значения тока при постоянном напряжении на зажимах; значения напряжения при постоянном токе на зажимах; частоты вращения вала; время непрерывной работы на каждом режиме; температуре окружающей среды.

При достижении цели необходимо решить задачи:

1. Определить факторы, влияющие на КПД индукторного тормоза.
2. Спроектировать и изготовить установку, позволяющую экспериментально определять электрический КПД ИТ на различных режимах его работы. При этом необходимо учесть: обеспечение необходимой частоты вращения вала и определение ее значения; отсутствие прямого воздействия и поддержание температуры окружающей среды; обеспечение нагрузочным устройством на ИТ изменения ряда значений напряжения при постоянном значении тока (ряда значений тока при постоянном значении напряжения).
3. Перед созданием базы данных на основе эксперимента разработать методику проведения эксперимента.
4. На основании полученной экспериментальной базы данных необходимо разработать математические модели, которые будут описывать зависимость электрического КПД индукторного тормоза от изменения исследованных факторов.

1. Описание стенда

Для определения электрического КПД индукторного тормоза в любой точке факторного пространства необходимы:

1. Электродвигатель (предлагаемый тип электродвигателя – ДПР или ДПМ). Желательно, чтоб двигатель был с валом, выходящим с двух сторон двигателя (предлагаемый тип ДПМ Н1 или Н2). Это позволит проводить исследования при разных комбинациях соединения индукторных тормозов с электродвигателем.
2. Источник питания, позволяющий менять мощность двигателя;
3. Нагрузочное устройство, позволяющее задавать значения тока при постоянном напряжении (напряжения при постоянном токе) на зажимах ИТ;
4. Два индукторных тормоза;
5. Измерительные приборы – частотомер; три вольтметра; три амперметра; секундомер; термометр.

2. Методика определения КПД ИТ

Для одной точки факторного пространства предлагается следующий порядок проведения исследований.

1. Проводится эксперимент с двумя индукторными тормозами, валы которых соединены между собой муфтами, работающими от одного двигателя (рис. 1).

При постоянных значениях (согласно строки плана эксперимента) входных параметров: напряжения ($U_{ИТ}$) и тока ($I_{ИТ}$) подаваемых на зажимы индукторного тормоза, меняем частоту вращения вала (n) (согласно строки плана эксперимента) с помощью варьирования напряжения ($U_{д}$) и тока ($I_{д}$) на зажимах электродвигателя. В результате можно записать баланс потерь мощности в виде уравнения (1).

$$\Delta N_{ИТ1} + \Delta N_{ИТ2} + \Delta N_{д} = \Delta N_{д+ИТ1+ИТ2} \quad (1)$$

где: $\Delta N_{ИТ1}$ – потери мощности на индукторном тормозе №1 (в данный момент неизвестная величина);

$\Delta N_{ИТ2}$ – потери мощности на индукторном тормозе №2 (в данный момент неизвестная величина);

$\Delta N_{д}$ – потери мощности на электродвигателе (в данный момент неизвестная величина);

$\Delta N_{д+ИТ1+ИТ2}$ – суммарная потеря мощности на электродвигателе и на двух индукторных тормозах.

Значение $\Delta N_{д+ИТ1+ИТ2}$ определяется после измерений величин тока и напряжения на зажимах индукторных тормозов и электродвигателя –

$$\Delta N_{д+ИТ1+ИТ2} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}} - U_{ИТ1} \cdot I_{ИТ1} - U_{ИТ2} \cdot I_{ИТ2}.$$

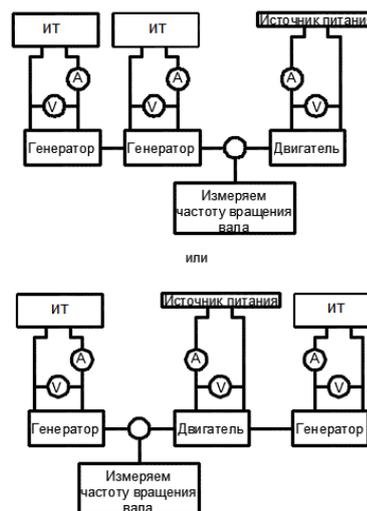


Рис. 1. Схема стенда, вариант компоновки №1

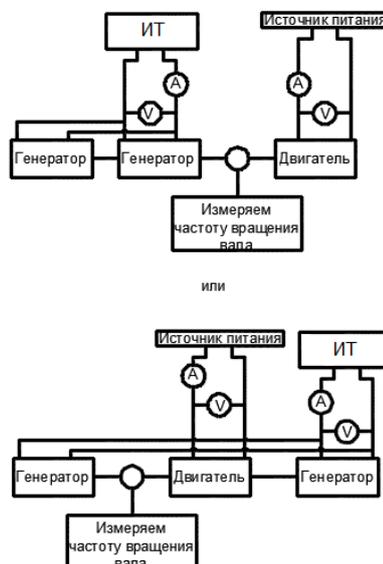


Рис. 2. Схема стенда, вариант компоновки №2

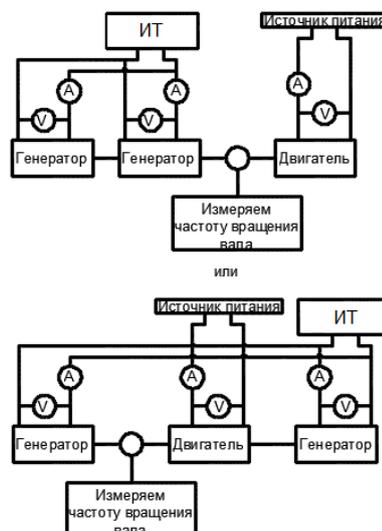


Рис. 3. Схема стенда, вариант компоновки №3

2. Проводится эксперимент с одним индукторным тормозом при тех же параметрах (согласно строки плана эксперимента) (рис. 2)

В этом случае баланс потерь мощности можно записать

$$\Delta N_{ИТ1} + \Delta N_D = \Delta N_{Д+ИТ1} \quad (2)$$

где: $\Delta N_{ИТ1}$ – потери мощности на индукторном тормозе №1 (в данный момент неизвестная величина);

ΔN_D – потери мощности на электродвигателе (в данный момент неизвестная величина);

$\Delta N_{Д+ИТ1}$ – суммарная потеря мощности на электродвигателе и индукторном тормозе –

$$\Delta N_{Д+ИТ1} = U_{вход} \cdot I_{вход} - U_{ИТ1} \cdot I_{ИТ1}$$



Рисунок 4. Схема стенда для второго этапа исследований

3. Решая уравнения (1) и (2) как систему уравнений (вычтя из первого второе) найдем потери мощности на индукторном тормозе №2.

$$\Delta N_{ИТ2} = \Delta N_{Д+ИТ1+ИТ2} - \Delta N_{Д+ИТ1} \quad (3)$$

Аналогично – при определении потери мощности на ИТ №1.

$$\Delta N_{ИТ1} = \Delta N_{Д+ИТ1+ИТ2} - \Delta N_{Д+ИТ2} \quad (4)$$

После чего найдем потери мощности на двигателе

$$\Delta N_D = \frac{(\Delta N_{Д+ИТ1+ИТ2} - \Delta N_{ИТ1} - \Delta N_{ИТ2})}{3} + \frac{(\Delta N_{Д+ИТ1} - \Delta N_{ИТ1}) + (\Delta N_{Д+ИТ2} - \Delta N_{ИТ2})}{3}$$

или

$$\Delta N_D = \frac{\Delta N_{Д+ИТ1+ИТ2} + \Delta N_{Д+ИТ1} + \Delta N_{Д+ИТ2} - 2\Delta N_{ИТ1} - 2\Delta N_{ИТ2}}{3}$$

п р и м е ч а н и е – суммируем, а затем делим на 3 – для снижения случайной ошибки измерения.

В итоге – будут найдены потери мощности на индукторных тормозах и двигателе на каком-то, определенном режиме – $\Delta N_{ИТ1}$; $\Delta N_{ИТ2}$; ΔN_D

Далее появляется возможность найти электрический КПД индукторных тормозов и электродвигателя в какой-либо точке факторного пространства плана эксперимента.

Известно

$$\Delta N_D = (1 - \eta_D) \cdot U_{вход} \cdot I_{вход}$$

$$\Delta N_{ИТ1} = (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot N_{ИТ1}, \quad (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot N_D \text{ где:}$$

$N_{ИТ1}$ – теоретическая мощность ИТ (равна мощности на валу)

Можно записать:

$$\Delta N_{ИТ1} = (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot \eta_D \cdot N_D = (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot \eta_D \cdot U_{вход} \cdot I_{вход}$$

$$\text{т.е. } \Delta N_D = (1 - \eta_D) \cdot U_{вход} \cdot I_{вход}$$

$$\Delta N_{ИТ1} = (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot \eta_D \cdot U_{вход} \cdot I_{вход}$$

$$\Delta N_{ИТ2} = (1 - \eta_{ИТ2}) \cdot \eta_D \cdot U_{вход} \cdot I_{вход}$$

Перенеся известные в одну сторону можно найти электрический КПД двигателя и индукторных тормозов.

$$Q1 = \Delta N_D / (U_{вход} \cdot I_{вход}) = (1 - \eta_D) \text{ следовательно } \eta_D = 1 - Q1;$$

$$Q2 = \Delta N_{ИТ1} / (U_{вход} \cdot I_{вход}) = (1 - \eta_{ИТ1}) \cdot \eta_D \text{ следовательно } \eta_{ИТ1} = 1 - Q2 / \eta_D;$$

$$Q3 = \Delta N_{ИТ2} / (U_{вход} \cdot I_{вход}) = (1 - \eta_{ИТ2}) \cdot \eta_D \text{ следовательно } \eta_{ИТ2} = 1 - Q3 / \eta_D.$$

Заключение

При использовании данной методики становится возможным реализовать получившуюся по результатам серии экспериментов базу экспериментальных данных при использовании которой становится возможно разработать регрессионную математическую модель в зависимости от выбранных факторов для описания зависимости электрического КПД индукторного тормоза, выбранного в качестве нагрузочного устройства для исследований микротурбин.

Литература

1. 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.
2. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, ДВФУ, 2015
3. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 2015
4. Фершалов Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 2000
5. Фершалов Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 1999

6. Фершалов Ю.Я., Чехранов С.В. Статические испытания сопловых аппаратов с малым углом выхода потока // Судостроение. 2005. № 5. С. 54-56.
7. Грибиниченко М.В., Куренский А.В., Фершалов Ю.Я. Обобщенная математическая модель осевых подшипников с газовой смазкой элементов судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № 1-1. С. 21-23.
8. Куренский А.В., Грибиниченко М.В., Фершалов Ю.Я. Результаты численного эксперимента осевых гибридных лепестковых подшипников с газовой смазкой // Научное обозрение. 2011. № 5. С. 303-311.
9. Грибиниченко М.В., Куренский А.В., Самсонов А.А., Фершалов Ю.Я. Численный эксперимент при исследовании свойств смазочного слоя осевых подшипников с газовой смазкой // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 12. С. 18-20.
10. Фершалов Ю.Я., Ханькович И.Н., Минаев А.Н., Карастелёв Б.Я., Якубовский Ю.В., Кончаков Е.И. Влияние режимных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 425-439.
11. Фершалов Ю.Я., Ханькович И.Н., Минаев А.Н., Карастелёв Б.Я., Якубовский Ю.В., Кончаков Е.И. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 440-450.
12. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Фершалов М.Ю. Влияние степени расширения сопел с малым углом выхода на эффективность сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. 2012. № 1. С. 39-41.
13. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т., Якубовский Ю.В., Карастелёв Б.Я., Кончаков Е.И. Влияние конструктивных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 346-357.
14. 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.
15. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т. Влияние режимных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 332-345.
16. Fershalov Yu.Ya., Sazonov T.V. Experimental research of the nozzles // Advanced Materials Research. 2014. Т. 915-916. С. 345-348.
17. Фершалов А.Ю., Грибиниченко М.В., Фершалов Ю.Я. Эффективность рабочих колес малорасходных турбин с большим углом поворота потока // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 117. С. 52-55.
18. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т. Обоснование и выбор метода исследования степени реактивности малорасходных турбин // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 322-331.
19. Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Алексеев Г.В. Степень реактивности малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 149-153.
20. Фершалов Ю.Я., Акуленко В.М. Угол выхода рабочего тела из сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин с соплами новой конструкции // Научное обозрение. 2011. № 4. С. 91-96.
21. Фершалов Ю.Я., Акуленко В.М. Коэффициент скорости сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин с соплами новой конструкции // Научное обозрение. 2011. № 5. С. 362-368.

References

1. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Akulenko V.M., Fershalov M.Yu., Tsygankova L.P. Perspektivnost issledovaniy I oblasti primeneniya maloraskhodnyh turbin. Vologda Readings. 2010. No. 78. P. 159-164.
2. Fershalov Yu.Ya. Modelirovaniye, analys I sovershenstvovaniye gasodynamicheskikh harakteristik sudovih osevyh sverhzhvukovih malorskhodnyh turbinnih stupeney. diss. na soiskaniye uch. stepeny doctora tehnic. nauk. Far Eastern Federal University. Vladivostok, FEFU, 2015
3. Fershalov Yu.Ya. Modelirovaniye, analys I sovershenstvovaniye gasodynamicheskikh harakteristik sudovih osevyh sverhzhvukovih malorskhodnyh turbinnih stupeney. author. diss. na soiskaniye uch. stepeny doctora tehnic. nauk. Far Eastern Federal University. Vladivostok, 2015
4. Fershalov Yu.Ya. Sovershenstvovaniye cverhzhvukovih osevih malorskhodnyh turbin. diss. na soiskaniye uch. stepeny kandidata tehnic. nauk. Far Eastern Federal University. Vladivostok, 2000
5. Fershalov Yu.Ya. Sovershenstvovaniye cverhzhvukovih osevih malorskhodnyh turbin. author. diss. na soiskaniye uch. stepeny kandidata tehnic. nauk. Far Eastern Federal University. Vladivostok, 1999
6. Fershalov Yu.Y., Chekhranov S.V. Statcheskiye ispitaniya soplovih apparatov s malim uglom vikhoda potoka. Shipbuilding. 2005. No. 5. P. 54-56.
7. Gribinichenko M.V., Kurensky A.V., Fershalov Yu.Ya. Obobshenaya matematicheskaya model osevih podshipnikov s gazovoy smazkoy elementov sudovih energeticheskikh ustanovok. Marine intellectual technologies. 2011. No. 1-1. P. 21-23.
8. Kurensky, A.V., Gribinichenko, M.V., and Fershalov, Yu.Ya. Resultaty chislennogo experimenta osevih gibridnih lepestkovih podshipnikov s gazovoi smazkoi. Scientific Review. 2011. No. 5. P. 303-311.
9. Gribinichenko M.V., Kurensky A.V., Samsonov A.A., Fershalov Y.Ya. Chislenny experiment pri issledovanii svoystv smazochnogo sloya osevih podshipnikov s gazovoi smazkoi. Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2011. No. 12. P. 18-20.
10. Fershalov Yu.Y., Khankovich I.N., Minaev A.N., Karastelev B.Ya., Yakubovsky Yu.V., Konchakov E.I. Vliyaniye regimnih factorov na KPD maloraskhodnyh turbinnih stupeney. Scientific Review. 2012. No. 5. P. 425-439.

11. Fershalov Yu.Y., Khankovich I.N., Minaev A.N., Karastelev B.Ya., Yakubovsky Yu.V., Konchakov E.I. Vliyaniye constructivnih factorov na KPD maloraskhodnih turbinnih stupeney. Scientific Review. 2012. No. 5. P. 440-450.
12. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Fershalov M.Yu. Vliyaniye stepeni rashireniya sopel s malim uglom vikhoda na effektivnost soplovih apparatov maloraskhodnih turbin. Shipbuilding. 2012. № 1. S. 39-41.
13. Alekseev G.V., Fershalov M.Yu., Fershalov Yu.Y., Lutsenko V.T., Yakubovsky Y.V., Karastelev B.Ya., Konchakov E.I. Vliyaniye constructivnih factorov na stepen reaktivnosti maloraskhodnih turbinnih stupeney. Scientific Review. 2012. № 2. S. 346-357.
14. Fershalov A.Yu., Gribinichenko M.V., Fershalov Yu.Ya. Gasodynamicheskiye haracteristici rabochih koles osevih turbin s bolshim uglom povorota protochnoi chasti. Bulletin of Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Series: Mechanical Engineering. 2012. № 1. S. 88-98.
15. Alekseev G.V., Fershalov M.Yu., Fershalov Yu.Y., Lutsenko V.T. Vliyaniye regimnih factorov na stepen reaktivnosti maloraskhodnih turbinnih stupeney. Scientific Review. 2012. № 2. S. 332-345.
16. Fershalov Yu.Ya., Sazonov T.V. Experimental research of the nozzles. Advanced Materials Research. 2014. T. 915-916. P. 345-348.
17. Fershalov A.Yu., Gribinichenko M.V., Fershalov Yu.Ya. Effictivnost rabochih koles maloraskhodnih turbin s bolshim uglom povorota potoka. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. 2011. No. 117. S. 52-55.
18. Alekseev G.V., Fershalov M.Yu., Fershalov Yu.Y., Lutsenko V.T. Obosnovaniye i vibor metoda issledovaniya stepeni reaktivnosti maloraskhodnih turbin. Scientific Review. 2012. № 2. S. 322-331.
19. Fershalov M.Yu., Fershalov Yu.Y., Alekseev G.V. Stepen reaktivnosti maloraskhodnoy turbine s malimi constructivnimi uglami vikhoda sopel soplovogo apparata. Scientific Review. 2013. No. 1. P. 149-153.
20. Fershalov Yu.Ya., Akulenko V.M. Ugol vikhoda rabocheho tela iz soplovix apparatov osevih maloraskhodnih turbin s soplami novoi konstrukcii. Scientific Review. 2011. No. 4. S. 91-96.
21. Fershalov Yu.Y., Akulenko V.M. Koefficient skorosti soplovih apparatov osevih maloraskhodnih turbin s soplami novoi konstrukcii// Scientific Review. 2011. No. 5. P. 362-368.

УДК 535.343.3

ПРИМЕНЕНИЕ ИНВЕРСИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ-ВИДИМОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СУДОВЫХ ТОПЛИВ И МАСЕЛ

Николай Яковлевич Синявский

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Ирина Павловна Корнева

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: likorneva05@rambler.ru

Наталья Анатольевна Кострикова

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Аннотация

Целью данной работы явилась разработка метода анализа спадов оптической плотности нефтепродуктов с ростом длины волны, основанного на нахождении распределений показателей окраски и исследование судовых топлив и масел с целью характеристики их свойств, качества и идентификации. Подобные подходы при исследовании абсорбции в УФ-видимом диапазоне нефтепродуктов в литературе не описаны и результаты, приводимые в настоящей работе являются новыми.

При исследовании использовался метод адсорбционной оптической спектроскопии. Для нахождения распределений характеристических параметров применялся модифицированный метод инверсии интегрального преобразования, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения и регуляризации.

На спектрах адсорбции в УФ-видимом диапазоне судовых топлив и масел показан не экспоненциальный характер зависимости оптической плотности от энергии квантов, обусловленный совокупностью различных хромофоров. Установлено, что распределения показателей окраски существенно различаются для разных нефтепродуктов. Модальность распределений, интенсивности и координаты максимумов на распределениях зависят от состава и молекулярной массы ароматических углеводородов, входящих в состав топлив и масел.

Надежность полученных в работе результатов подтверждается общим признанием эффективности метода оптической спектроскопии для решения различных научных задач. Разработан оригинальный алгоритм инверсии интегральных преобразований, описывающих спектр абсорбции в нефтепродуктах. Получены распределения параметров окраски и характеристических энергий в сложных материалах, таких как судовые топлива и масла.

Ключевые слова: судовые топлива и масла, контроль качества, оптическая абсорбция, распределение параметров окраски

INTEGRAL TRANSFORMATION INVERSE APPLICATION IN ULTRAVIOLET- VISIBLE ABSORPTION SPECTROSCOPY FOR THE ANALYSIS OF SHIP FUELS AND OILS

Nikolay Y. Sinyavsky

the professor, Dr.Sci.

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad 1236022, Russian Federation
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Irina P. Korneva

the professor, PhD

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad 1236022, Russian Federation
e-mail: likorneva05@rambler.ru

Natalya A. Kostrikova

the associate professor, PhD

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad 1236022, Russian Federation
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Abstract

The objective of this paper is to develop a method for petroleum products with increasing wavelength optical density decline analysis which is based on finding the distribution of color indices and the study of marine fuels and oils to characterize their properties, quality and identification. There are no similar approaches in the study of absorption in the UV-visible range of petroleum products in the contemporary publications therefore the results given in this paper are new.

The authors used the method of adsorption optical spectroscopy in the study. To find the distributions of the characteristic parameters, a modified inversion method for the integral transform was used, based on minimizing the standard deviation and regularization.

A non-exponential dependence of the optical density on the energy of quanta, due to the combination of different chromophores is shown in the UV-visible range of marine fuels and oils on the adsorption spectra. It is established that the distribution of color indices differ significantly for different petroleum products. The modality of the distributions, the intensity and coordinates of the maxima in the distributions depend on the composition and molecular weight of the aromatic hydrocarbons that make up the fuels and oils.

The reliability of the results obtained in the work is confirmed by the general recognition of the effectiveness of the method of optical spectroscopy for solving various scientific problems. The authors developed the original algorithm for inverting integral transforms describing the absorption spectrum in petroleum products. As a result they obtained the distributions of color parameters and characteristic energies in complex materials, such as marine fuels and oils.

Keywords: marine fuels and oils, quality control, optical absorption, color parameters distribution

Введение

Оптическая спектроскопия является чрезвычайно эффективным методом для исследования молекулярной структуры и молекулярной динамики веществ. Ультрафиолетовые спектры поглощения являются удобным методом идентификации нефтепродуктов, присутствующих в морской среде. Это может быть полезно для выявления разливов нефтепродуктов и определения их происхождения [1]. Электронному поглощению соответствует ультрафиолетовая и видимая часть спектра. Поглощение в ближней ИК-области спектра определяются колебательным молекулярным поглощением. Это поглощение и электронная абсорбция доминируют в разных частях спектра. Спектры электронного поглощения обусловлены наличием «цвета» у образца. Чистые легкие углеводороды практически бесцветны. Углеводородные конденсаты могут иметь очень легкий красновато-желтый, дизельное топливо коричневый, мазут темно-коричневый или черный цвет. Эти цвета углеводородов являются результатом поглощения синих и зеленых или желтых и красных длин волн. Такая избирательная абсорбция связана с долей сложных ароматических молекул в нефтепродукте. По мере увеличения концентрации тяжелых ароматических углеводородов нефтепродукт становится темнее. Цвет является результатом поглощения электронами в ароматических соединениях энергии фотонов, в результате чего изменяется энергетическое состояние электронов.

Исследование спектров поглощения большого количества нефтепродуктов показало, что их оптическая плотность, вызванная только электронным поглощением, может быть аппроксимирована [2] выражением:

$$D = C e^{\frac{\chi}{\lambda}} = C e^{\frac{h\nu}{\lambda \bar{\nu}}}, \quad (1)$$

где χ - является эмпирически определенным показателем окраски, а C - коэффициент окрашивания, характеризующий цвет определенного нефтепродукта при данной

толщине образца, λ – длина волны облучения, U – характеристическая энергия, выражаемая обычно в эВ. По мнению авторов работы [2], показатель окраски χ является примерно одинаковым для всех нефтепродуктов.

Однако, как показано в работе [3], показатель окраски χ далеко не всегда является одинаковым для всех нефтепродуктов и логично предположить, что речь может идти о распределении этого параметра, причем не всегда унимодального.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Для измерений в работе использовали спектрофотометр для видимого и ультрафиолетового диапазонов СФ-2000. Регистрировались полные спектр в интервале от 200 нм до 1100 нм. Использовалась стандартная кварцевая кювета размером 10x10 мм. Для исследования брались образцы топлив: ЭКТ-дизель, судовое маловязкое топливо (СМТ), солярка судовая и масла: базовое масло SN-150, базовое масло SN-500, масло ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 12/40.

Значение оптической плотности нефтепродуктов, вызванной только электронным поглощением мы представляли в виде:

$$D(\lambda) = \int_0^\infty f(\chi) C(\lambda) e^{\frac{\chi}{\lambda}} d\chi, \quad (2)$$

где $f(\chi)$ - распределение показателей окраски,

$C(\chi) = e^{-\frac{\chi}{\lambda_1}}$ – нормировочный множитель, λ_1 – начальное значение длины волны зарегистрированного в эксперименте спектра поглощения в диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$.

Распределение показателей окраски определялось инверсией интегрального преобразования выражения (2). К распределению характеристических энергий легко перейти, учитывая связь $U = \frac{hc}{\lambda}$.

Для инверсии интегрального преобразования нами использовалась программа RILT, описанная в работе [4]. Искомый массив распределения показателей окраски $f(\chi)$

рассчитывался с использованием регуляризации с помощью метода наименьших квадратов и функции *fminsearch* (Matlab), позволяющей находить минимум функции нескольких переменных.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Оптическое поглощение (оптическую плотность) в зависимости от длины волны для исследованных топлив и масел иллюстрирует рис. 1. Каждый спектр на этом рисунке показывает увеличение поглощения на более коротких длинах волн. Это непрерывное электронное поглощение связано с ароматическими компонентами нефтепродуктов [5]. Спектральное расположение края поглощения электронного возбуждения различно для разных нефтепродуктов и определяется перекрытием спектров поглощения многих молекулярных компонентов.

В спектрах поглощения топлив и масел наблюдается определенное сходство. Смолистые масла показывают заметное электронное поглощение в длинноволновом диапазоне, легкие нефтепродукты слабо поглощают свет даже в коротковолновом диапазоне.

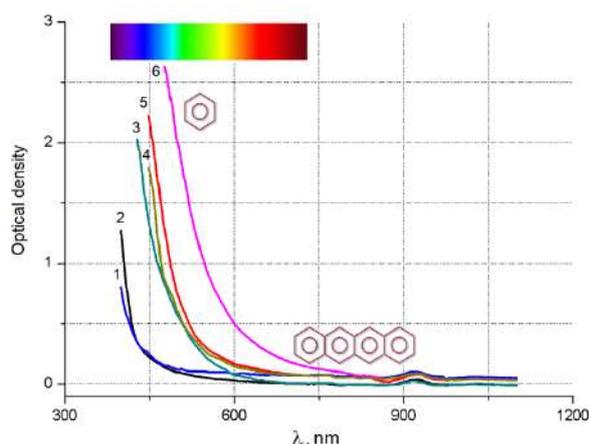


Рис. 1. Спектры поглощения: 1- экто-дизель, 2 - масло базовое SN-150, 3 – маловязкое судовое топливо, 4 – солярка судовая, 5 - масло базовое SN-500, 6 - масло ТПЭО.

Хвосты поглощения нефтепродуктов затухают с уменьшением энергии фотона почти экспоненциально. Неравномерность наклона линий на рис. 2 означает, что продолжительности не экспоненциальных спадов оптического поглощения при уменьшении энергии фотонов для исследованных нефтепродуктов не одинаковы.

На рис. 2 показаны те же спектры поглощения, что и на рис. 1, за исключением того, что оптическая плотность показана в логарифмическом масштабе и в зависимости от энергии фотона вместо длины волны. В области больших энергий фотонов спектры имеют почти одинаковый наклон для всех исследованных нефтепродуктов. Одинаковый наклон в электронном поглощении свидетельствует о том, что у всех нефтепродуктов имеется совокупность хромофоров одного вида.

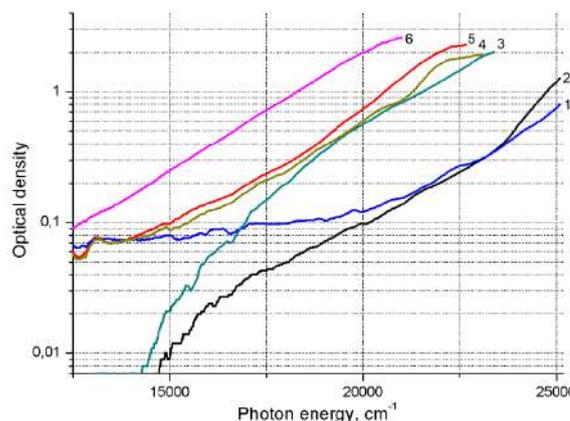


Рис. 2. Оптические спектры поглощения, как функции волнового вектора: 1- экто-дизель, 2 - масло базовое SN-150, 3 – маловязкое судовое топливо, 4 – солярка судовая, 5 - масло базовое SN-500, 6 - масло ТПЭО.

Отсутствие отдельных пиков на кривых поглощения (рис. 1) означает вклад от большого количества хромофоров с перекрывающимися спектрами. Из-за их интенсивного электронного поглощения, колебательные гармоники высших порядков проявляются в спектрах слабо. Постоянная ширина спада края электронного поглощения, впервые наблюдавшаяся в неорганических твердых телах, описывается моделью Урбаха [6]. Урбаховская область в спектрах поглощения нефтепродуктов, по мнению авторов работы [7], соответствует самым низким оптическим плотностям, где спектры имеют вид близкий к прямому.

Было доказано, что многие материалы обладают «хвостом» Урбаха в области электронного поглощения, т.е. коэффициент оптического поглощения α имеет экспоненциальный характер:

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{hv}{E_0}}, \tag{3}$$

где hv - энергия фотона, а E_0 - энергия Урбаха, для многих аморфных материалов примерно равная: $E_0 \approx kT$.

Для сырых нефтей в области наименьших оптических плотностей имеет место спад Урбаха [7], в то время как при больших поглощениях оптическая плотность растет не так быстро, как экспонента. Однако ширины спадов кривых поглощения нефтей в области Урбаха намного больше, чем тепловая ширина kT .

Из рис.2 видно, что в области высоких энергий фотонов все исследованные нефтепродукты имеют зависимости в виде приблизительно параллельных линий с примерно одинаковым наклоном. В области низких энергий фотонов картина существенно меняется: наклон линий для судового маловязкого топлива и базового масла SN-150 существенно увеличивается, а для экто-дизеля, наоборот, значительно уменьшается. Это значит, что спектр поглощения не характеризуется одним параметром окраски χ и кривые спада оптической плотности не являются простыми экспонентами. Предполагая, что спад кривой, в

Таблица 1

Показатели окраски и характеристические энергии

№ п/п	Образец	$\chi \pm 0.05$, мкм	$U_0 \pm 0.05$, эВ
1	Экто-дизель	0.30 5.50	4.14 0.23
2	Базовое масло SN-150	3.10 12.50	0.40 0.10
3	Судовое маловязкое топливо	4.15	0.30
4	Солярка судовая	4.15	0.30
5	Базовое масло SN-500	4.75	0.26
6	Масло ТПЭО	4.15	0.30

общем случае, является суммой экспонент, т.е. результатом разных вкладов от крупных и мелких молекул ароматических углеводородов, мы выполнили инверсию интегрального преобразования (2). Результаты этой инверсии для исследованных нефтепродуктов иллюстрирует рис. 3. Из него видно, что распределения параметра χ для экто-дизеля и базового масла SN-150 являются бимодальными, в то время как для остальных исследованных образцов эти распределения унимодальные. Значения χ и U_0 пиков на распределениях приведены в таблице 1.

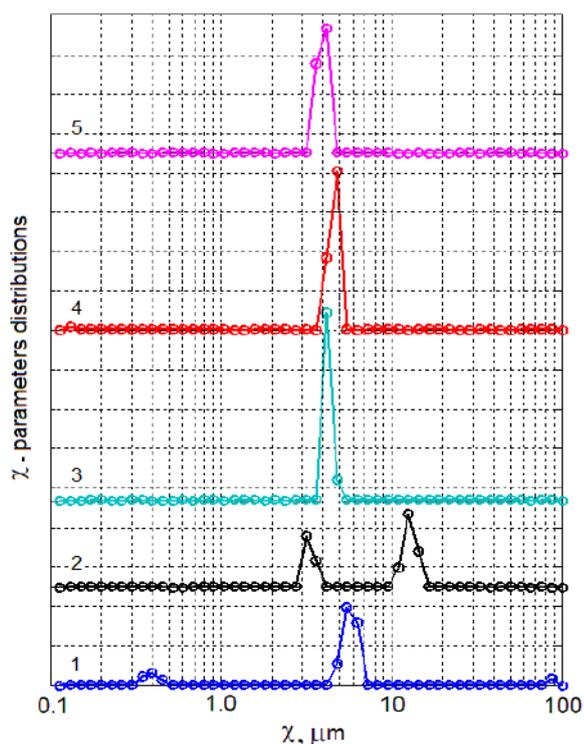


Рис. 3. Распределение параметров χ для разных нефтепродуктов: 1 – эктодизель, 2 - SN-150, 3 - СМТ, 4 - SN-500, 5 - ТПЭО.

Значения параметров окраски у разных образцов, по всей вероятности, определяется соотношением ароматических углеводородов - хромофоров. Эти углеводороды имеют различную структуру, молекулярную массу, что и определяет величины этих параметров и модальность их распределений.

Каждый хромофор имеет свои собственные абсорбционные характеристики. Хвост кривой поглощения соответствует наименьшим энергиям возбуждения, которые, соответствуют крупнейшим ароматическим веществам.

Монотонно уменьшающееся поглощение на более длинных волнах указывает на монотонно увеличивающуюся совокупность крупных хромофоров. Увеличение поглощения с ростом энергии квантов объясняется уменьшающейся совокупностью более крупных хромофоров, т.е. тяжелых ароматических углеводородов и за поглощение отвечают меньшие хромофоры. Определенные с помощью предлагаемого метода распределения параметров окраски и характеристических энергий для каждого образца уникальны и позволяют идентифицировать судовые нефтепродукты и определять их качество.

Заключение

Таким образом, в работе впервые предложен метод анализа спадов оптической плотности нефтепродуктов с ростом длины волны, основанный на нахождении распределений параметров окраски и исследован ряд судовых топлив и масел с целью характеристики их свойств, качества и идентификации. Показано, что этот метод вводит новую характеристику, что существенно повышает информативность абсорбционной фотометрии, т.к. в традиционной фотометрии непрерывная совокупность хромофоров разного типа практически исключает анализ спектров поглощения нефтепродуктов.

Разработан способ инверсии интегральных преобразований, описывающих спектр абсорбции в нефтепродуктах. На основе программы RILT, с использованием стандартной функции *findsearch* реализован оригинальный алгоритм инверсии интегрального преобразования для получения распределения параметров цветности и характеристических энергий в сложных материалах, таких как топлива и масла.

Благодарности. Авторы благодарят Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований.

Литература

1. Levy E. M. (1972). The identification of petroleum products in the marine environment by absorption spectrophotometry, *Water Research*, 6, 57-69.
2. Smits, A. R., Fincher, D. V., Nishida, K., Mullins, O. C., Schroeder, R. J., & Yamate, T. (1995). In-Situ Optical Fluid Analysis as an Aid to Wireline Formation Sampling. *SPE Formation Evaluation*, 10(02), 91–98.
3. Евдокимов И. Н., Лосев А. П. (2007). Применение УФ-видимой абсорбционной спектроскопии для описания природных нефтей, *Нефтегазовое дело*, №1, 1-25.

4. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Электронный ресурс].
5. Andrews, R.J. & Beck, G & Castelijn, K & Chen, A & Cribbs, M.E. & Fadnes, F.H. & Irvine-Fortescue, J & Williams, S & Hashem, M & Jamaluddin, A & Korkjian, A & Sass, B & Mullins, Oliver & Rylander, E & Van Dusen, A. (2001). Quantifying contamination using color of crude and condensate, *Oilfield Review*, 13, 24-43.
6. Urbach F. (1953). The long-wavelength edge of photographic sensitivity and electronic absorption of solids, *APS Journals, Phys. Rev.*, 92, 1324-1326.
7. Mullins O.C. (1998) Optical Interrogation of Aromatic Moieties in Crude Oils and Asphaltenes. In: Mullins O.C., Sheu E.Y. (eds) *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. Springer, Boston, MA, 21-77.

References

1. Levy E. M. (1972). The identification of petroleum products in the marine environment by absorption spectrophotometry, *Water Research*, 6, 57-69.
2. Smits, A. R., Fincher, D. V., Nishida, K., Mullins, O. C., Schroeder, R. J., & Yamate, T. (1995). In-Situ Optical Fluid Analysis as an Aid to Wireline Formation Sampling. *SPE Formation Evaluation*, 10(02), 91–98.
3. Evdokimov I.N., Losev A.P. (2007). Potential of UV-visible absorption spectroscopy for characterizing crude petroleum oils, *Oil and Gas Business*, 1-21.
4. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].
5. Andrews, R.J. & Beck, G & Castelijn, K & Chen, A & Cribbs, M.E. & Fadnes, F.H. & Irvine-Fortescue, J & Williams, S & Hashem, M & Jamaluddin, A & Korkjian, A & Sass, B & Mullins, Oliver & Rylander, E & Van Dusen, A. (2001). Quantifying contamination using color of crude and condensate, *Oilfield Review*, 13, 24-43.
6. Urbach F. (1953). The long-wavelength edge of photographic sensitivity and electronic absorption of solids, *APS Journals, Phys. Rev.*, 92, 1324-1326.
7. Mullins O.C. (1998) Optical Interrogation of Aromatic Moieties in Crude Oils and Asphaltenes. In: Mullins O.C., Sheu E.Y. (eds) *Structures and Dynamics of Asphaltenes*. Springer, Boston, MA, 21-7.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 624.143/ 628.192:665.6/ 629.5.016.8/ 551.574.42.620.124.72

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ КОРАБЛЕЙ

Владимир Васильевич Роенко

кандидат технических наук, профессор
профессор кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. E-mail: piroemail@bk.ru

Андрей Дмитриевич Ищенко

кандидат технических наук,
профессор кафедры пожарной тактики и службы
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. E-mail: adinko@mail.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор
директор ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13. E-mail: malygin_com@mail.ru

Владимир Николаевич Ложкин

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ
профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149. E-mail: vnlojkin@yandex.ru

Аннотация

В работе приведено обоснование целесообразности использования технологии водных сред в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС) для борьбы с обледенением. Доказано, что при использовании ВСМФС для разрушения обледенения может быть использована тепловая энергия мощностью до 5 МВт, передаваемая к месту разрушения льда недогретой до вскипания водой (НВ), для получения которой используется специальный водогрейный котел.

Энергия передается к месту разрушения льда НВ с температурой 250°C под давлением не более 10,0 МПа по рукавам диаметром 25-32 мм. Длина рукавной линии для подачи НВ может составлять до 2000 м, а высота подъема от места установки водогрейного котла установки по получению НВ – 350 м, что позволяет обеспечить выполнение работ по разрушению льда в любой точке самого большого корабля (судна).

Основные преимущества предлагаемой технологии: безопасное для конструктивных элементов корабля разрушение снежно-ледовых образований; безопасность струй ВСМФС для людей и окружающей среды; возможность обеспечения целостности пространственных конструкций корабля при ликвидации обледенения; уменьшение трудоемкости и увеличение скорости выполнения работ по разрушению снежно-ледовых образований; возможность безопасного разрушения снежно-ледовых масс в труднодоступных удаленных местах; энергоэффективность и многофункциональность технологии, возможность использования технологии не только для разрушения снежно-ледовых масс, но и для обеспечения пожаровзрывобезопасности и осаднения дыма в помещениях кораблей, а также для удаления углеродородных и иных загрязнений с поверхности корабля.

Ключевые слова: корабль, обледенение, ледовый плен, энергоэффективность, экологическая безопасность, снежно-ледовое образование, разрушение, водная среда, недогретая до вскипания вода, метастабильном фазовом состоянии.

ENERGY-EFFICIENT ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGY OF COMBATING SHIP ICING

Vladimir V. Roenko

PhD in Engineering Science, Professor
Professor of the Department of Fire and Rescue Equipment
Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia
129366, Moscow, Borisa Galushkina, 4. E-mail: piroemail@bk.ru

Andrei D. Ischenko

PhD in Engineering Science,
Professor of the department of fire tactics and service
Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia
129366, Moscow, Borisa Galushkina, 4. E-mail: adinko@mail.ru

Igor G. Malygin

Dr.Sci.Tech, professor

Director of Federal Publicly Funded Institution of Science, Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, V.O., 12 line, 13. E-mail: malygin_com@mail.ru

Vladimir N. Lozhkin

Dr.Sci.Tech, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation
Professor of the Department of Fire, Rescue and Automotive Equipment and Vehicle Fleet
University of State Fire Service EMERCOM of Russia
196105, St. Petersburg, Moskovskiy prospect, 149 E-mail: vnlojkin@yandex.ru

Abstract

The paper presents justification for use of technology of aqueous media in a metastable phase state to combat icing. It is proved that when aqueous media in a metastable phase state is used for the destruction of icing, thermal energy up to 5 MW can be used, transmitted to the place of destruction of ice with underheated to boiling water, which is obtained using a special hot-water boiler.

Energy is transferred to the place of destruction of ice with underheated to boiling water with a temperature of 250 ° C under a pressure of no more than 10.0 MPa through hoses with a diameter of 25-32 mm. The length of the hose line for supplying underheated to boiling water may be up to 2,000 m, and the height of the ascent from the installation site of a hot-water boiler of a plant for preparation of underheated to boiling water is 350 m, which allows ensuring that the ice be destroyed in any point of the largest ship (vessel).

The main advantages of the proposed technology are: the destruction of snow-ice formations safe for the structural elements of a ship; safety of aqueous media in a metastable phase state jets for people and the environment; ability to ensure integrity of the spatial structures of a ship during de-icing process; reducing labor intensity and increasing speed of work on destruction of snow-ice formations; possibility of safe destruction of snow-ice formations in remote areas; energy efficiency and versatility of technology, ability to use technology not only to destroy snow-ice formations, but also to ensure fire and explosion safety and smoke deposition in spaces of ships, as well as to remove hydrocarbon and other contaminants from a ship surface.

Key words: ship, icing, icebound, energy efficiency, environmental safety, snow-ice formation, destruction, aquatic environment, underheated to boiling water, metastable phase state.

Введение

В работах [1-10] рассмотрена возможность использования технологии водных сред в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС) для реализации проектов в Арктике, а также для обеспечения пожаровзрывобезопасности энергетических установок в замкнутых объемах и моторных отсеках кораблей [2-5]. Сущность технологии ВСМФС кратко изложена в работе [11].

Энергоэффективность и экологическая безопасность технологии достигается за счет получения и транспортирования водных сред (ВС) с параметрами, которые близки к критическим (температуре воды 374°C и давлении 22,0 МПа), а также создания условий для взрывного вскипания ВС в специальных соплах-распылителях с последующей нуклеацией и коагуляцией паро-капельной смеси, полученной в результате взрывного вскипания [11].

В работе [1] приведены физические свойства воды при увеличении ее температуры и давления, а также данные по тепловой мощности, которая может быть передана водой через 1 мм² поперечного сечения трубопровода или рукава (шланга).

Из работы [1] следует, что энергия, которую вода может передавать на расстояние, существенно зависит от ее температуры и давления. Например, при увеличении температуры воды с 100 до 250°C удельная энтальпия воды увеличивается с 419,06 до 1085,78 кДж/кг, а удельная мощность, передаваемая через 1 мм² поперечного сечения трубопровода или гибкого

шланга, увеличивается с 3,476 до 8,848 кВт/мм². Если учесть, что при этом динамическая вязкость воды уменьшается с $2,82 \times 10^{-4}$ до $1,06 \times 10^{-4}$ кг/(м с), т.е. уменьшается в 2,66 раз, то становится очевидной энергоэффективность передачи недогретой до вскипания воды (НВ) с температурой 250°C и более под давлением выше давления насыщенных паров при данной температуре.

Например, для передачи 2,0 МВт тепловой энергии потребуется подавать до 2,0 кг/с НВ с температурой 250°C и давлением не более 10,0 МПа. Технология позволяет подавать НВ на расстояние до 2000 метров или на высоту до 300 метров по трубопроводу или гибкому шлангу с внутренним диаметром не более 25-32 мм [11, 12].

На основании опыта использования НВ при разрушении льда ВСМФС на Саяно-Шушенской ГЭС и на реках Архангельской области можно заключить, что энергетические возможности технологии позволяют использовать ВСМФС не только для обеспечения пожаровзрывобезопасности и осадения дыма [13, 14] в помещениях кораблей, но и для борьбы с обледенением кораблей.

1. Опыт использования технологии ВСМФС для разрушения льда на больших расстояниях

У специалистов Академии ГПС МЧС России и Агентства государственной противопожарной службы и гражданской защиты Архангельской области (АГПС и ГЗ Архангельской области) есть опыт прокладки рукавных линий с внутренним диаметром 25 мм протяженностью до 1500 м по

снегу и льду для разрушения льда струями ВСМФС на реках Архангельской области (рис. 1).



Рис.1. Прокладка рукавной линии с внутренним диаметром 25 мм по льду одним человеком по льду Северной Двины

От одной рукавной линии с внутренним диаметром 25 мм могут одновременно работать 3-4 ствольщика (рис. 2), стволы-пики (рис. 3) которых подключаются через разветвления к рукавным линиям с внутренним диаметром 16 мм.



Рис. 2. Работа трех ствольщиков по разрушению обводненного речного льда стволами-пиками при их подключении к рукавам с внутренним диаметром 16 мм, проложенным от рукавной линии с внутренним диаметром 25 мм



Рис.3. Ствол-пика с насадком для разрушения льда ВСМФС. Длина трубы перед насадком может быть увеличена до 6 метров

При такой схеме организации работы по разрушению льда к стволу-пике каждого ствольщика поступает НВ, тепловая энергия которой составляет от 0,5 до 0,75 МВт. Эта энергия достаточна для эффективного разрушения даже затопленного водой льда.

Прокладка рукавов диаметром 16 и 25 мм не вызывает принципиальных технических и организационных сложностей и может быть

успешно осуществлена как ручным способом одним человеком (рис. 1), так и механическими средствами.

Важно, что при таком сочетании параметров НВ и внутренних диаметров трубопроводы или гибкие шланги безопасны и по ТР 032/2013 не подлежат контролю Ростехнадзором

1. Критерии оценки целесообразности использования технологии ВСМФС

Основные критерии, которые необходимо анализировать при оценке целесообразности использования технологии для борьбы с обледенением кораблей могут быть сведены к следующим критериям:

- энергоэффективность;
- возможность размещения установки получения НВ на корабле (масса и габариты установки должны позволять размещать установку на палубе корабля или в имеющихся внутренних объемах);
- возможность прокладки трубопроводов или гибких рукавов внутри и по надводной части корабля для использования струй ВСМФС при разрушении обледенения;
- оперативность доставки и использования установки для получения НВ на корабль подвергшийся обледенению (доставки установки получения НВ вертолетом или судном на воздушной подушке, временем подключения установки к системе подачи НВ или временем прокладки рукавов, временем смены режимов работы установки для ликвидации обледенения);
- многофункциональность (возможность использования установки не только для разрушения обледенения);
- энергетическая гибкость (возможность работы установки от источников энергии, имеющихся на корабле: источников электрической энергии и различных видов топлива – например дизельного топлива или природного газа);
- экологическая безопасность;
- стоимость и сроки изготовления, поставки и эксплуатации установки получения НВ;
- квалификация и количество персонала обеспечивающего работу установки получения НВ, стоимость и сроки подготовки персонала, а также его содержания.

Кратко анализ перечисленных критериев позволяет сформулировать следующее [1].

Использование атомных станций малой мощности (АСММ), которые могут быть оперативно доставлены или размещены на корабле для получения НВ и использованы для борьбы с обледенением кораблей в настоящее время и, скорее всего, в ближайшей перспективе не реально по следующим причинам:

- низкие значения показателей удельной энергоэффективности. Большие габариты и вес АСММ не позволяют размещать их на кораблях, и тем более доставлять вертолетами или судами на воздушной подушке. Например, вес транспортно-палубного модуля АСММ «АТГОР» с тепловой мощностью 3,5 МВт составляет 60 тонн и для его доставки требуется специальный прицеп УМАПЗ-9990 [1];

- сложность оперативного использования (доставки, подключения, смены режимов работы), которая связана с большим временем их запуска и выведения на рабочий режим. По данным корпорации ROSATOM высокая степень транспортной мобильности АСММ в зависимости от концепции размещения обеспечивается массой от 200 до 1100 тонн [1];

- отсутствие многофункциональности, так как АСММ предназначены только для получения двух видов энергии – тепловой и электрической. Большинство АСММ имеют тепловую мощность до 5-6 МВт и электрическую мощность до 1 МВт;

- сложность и высокая стоимость обеспечения экологической безопасности как при работе АСММ, так и при утилизации отработанного ядерного топлива;

- большая стоимость и сроки изготовления, поставки и эксплуатации АСММ. По данным корпорации ROSATOM срок изготовления – до 36 месяцев, стоимость - 58-260 млн. долларов США. Стоимость эксплуатации в год – 4-13 млн. долларов США;

- большая стоимость и сроки подготовки квалифицированного персонала для эксплуатации АСММ, а также содержания этого персонала.

Поэтому для обеспечения пожарной безопасности и ликвидации обледенения кораблей предлагается реализовать стратегию использования энергоэффективных многоцелевых мобильных модулей, которая разработана в Академии ГПС МЧС России [1].

Имеющиеся наработки в энергетике позволяют усовершенствовать эту технологию и разработать новую технологию получения и транспортирования (передачи на расстояние по трубопроводной системе) НВ с давлением и температурой близкой к критической точке (с давлением 22,1 МПа и температурой 374°C) в малогабаритных, передвижных или контейнерных энергетических установках с тепловой мощностью до 5,0 МВт.

При контейнерном исполнении масса одного контейнера может составлять от 5 до 20 тонн в зависимости от мощности и комплектации.

3. Преимущества использования технологии ВСМФС

Технология получения, передачи и использования воды с температурой до 250°C и давлением не более 10,0 МПа уже отработана и успешно используется в подразделениях МЧС России и пожарных частях Республики Казахстан. Разработка этой технологии началась с 2005 года, данное научное направление явилось новой парадигмой использования и развития аварийно-спасательных технологий, разработанных Академией ГПС МЧС России в интересах МЧС России. В 2007 году в Академии ГПС МЧС России была начата разработка многоцелевого пожарно-спасательного автомобиля (АПМ) с установкой пожаротушения температурно-активированной водой (ТАВ). Ученые Академии разработали и на Мытищенском приборостроительном заводе изготовили пожарно-спасательный автомобиль с установкой пожаротушения температурно-активированной водой АПМ 3-2/40-1,38/100-100 (43118) мод. ПиРоЗ-МПЗ, который с 2008 года

успешно эксплуатируется в подразделениях МЧС России. В 2018 году разработан и изготовлен АПМ 3-2,76/100-100 (43118) мод. МПЗ, который имеет установку получения НВ с тепловой мощностью 3,0 МВт.

Многолетняя эксплуатация АПМ и практика его использования для тушения пожаров и ликвидации ЧС показали, что технология ВСМФС обеспечивает:

- многофункциональность – обеспечение пожаровзрывобезопасности, осаждения дыма, очистки от отложений нефтепродуктов, разрушения монолитного и обводненного льда;

- энергетическую гибкость – использование многотопливной горелки позволяет получать НВ в водогрейном котле при сжигании газа, бензина, дизельного топлива и мазута;

- экологическую безопасность – струи ВСМФС не содержат вредных для окружающей среды веществ, современные технологии сжигания топлива имеют экологические сертификаты;

- стоимость и сроки изготовления, поставки и эксплуатации установки получения НВ – стоимость установки с тепловой мощностью и запасом рукавов и стволов-пик с насадками для разрушения льда составляет около 50 млн. рублей, срок поставки не более 6 месяцев с момента поступления средств на изготовление, стоимость технического обслуживания не более 500 тыс. рублей в год;

- квалификация и количество персонала обеспечивающего работу установки получения НВ, стоимость и сроки подготовки персонала, а также его содержания (для обслуживания установки требуется один оператор, который проходит обучение в количестве 72 часов по программе близкой к программе подготовки оператора котельной).

Таким образом, разработана и практически реализована технология, которая позволяет, не вмешиваясь в конструкцию корабля, использовать автономный, не связанный с энергетической установкой корабля, источник НВ при габаритах и массе установки приемлемых для использования практически на всех кораблях (судах). При этом использование именно автономного источника тепловой энергии для получения НВ является приоритетным, так как позволяет использовать технологию на уже эксплуатируемых кораблях и судах, а также находящихся на стадии проектирования или постройки без внесения принципиальных изменений в конструкцию корабля.

Практически реализованные результаты по дальности (до 1500 м) и высоте (до 350 м) подачи НВ по рукавным линиям позволяют заключить, что при контейнерном исполнении установки получения НВ, аналог которой смонтирован в кузове АПМ, и размещении ее на авианосце или крейсере, а также на танкере-газовозе позволит получать ВСМФС в любой части корабля, так как максимальные размеры самых больших авианосцев и кораблей имеют следующие размеры:

- авианосец «Джеральд Р. Форд» (США) - длина 337 метров, ширина 78, высота 76 м.;

- авианосец «Нимиц» (США) - длина 321 метр, ширина 78 метров;
- тяжелый авианесущий крейсер «Адмирал флота Советского Союза Кузнецов» (РФ) - длина 304 метра, ширина 67 метров;
- тяжелый атомный ракетный крейсер «Петр Великий» (РФ) - длина 251 метр, ширина 28,5 метров;
- танкеры-газовозы типа Q-max – длина 345 метров и ширина 53.8 метров. В высоту корабль достигает 34,7 м.

Анализ приведенных размеров позволяет утверждать, что при использовании предлагаемой технологии НВ может быть подана в любую точку корабля от одной установки, установленной на корме или внутри корабля, так как по имеющимся данным наиболее часто обледенению подвергается носовая часть корабля (судна) (рис. 4).



Рис. 4. Обледенение носовой части судна

4. Эффективность использования технологии ВСМФС для разрушения снежно-ледовых масс

Эффективность использования технологии ВСМФС для разрушения снежно-ледовых масс была успешно реализована при ликвидации катастрофического обледенения Саяно-Шушенской ГЭС зимой 2010 года. В феврале 2010 года АПМ была успешно использована при ликвидации обледенения Саяно-Шушенской ГЭС. До прибытия АПМ борьба с обледенением велась по технологии, которая и сейчас является наиболее распространенной как на наземных объектах, так и на кораблях: вырезание блоков снежно-ледяной массы цепными пилами; скалывание снежно-ледяной массы ломом, лопатой или пневматическим молотком; вырезание и растапливание блоков снежно-ледяной массы горячей водой или паром.

Технология разрушения снежно-ледяной массы ВСМФС принципиально отличается от ранее применявшихся технологий борьбы с обледенением. Сущность технологии заключается в следующем.

В водогрейном котле АПМ вода нагревается до температуры 160-250°C под давлением до 10,0 МПа. На выход из АПМ поступает НВ, которая, при расходе воды до 2 л/с, переносит к месту разрушения обледенения до 1,5-2,0 МВт тепловой энергии. По специальным шлангам или металлической трубе НВ подается к специальным стволам-пикам (рис. 3, 5 и 6), выходя из которых происходит взрывное вскипание НВ и формируется струя ВСМФС.

Задача ствольщиков сводится к отделению снежно-ледяной массы струями ВСМФС от

бетонного (стального) массива или пространственных металлических конструкций и подачи ВСМФС для того, чтобы снежно-ледяной массив не примерз к основе. Это удается за счет того, что ВСМФС не замерзает при температурах до минус 40°C продолжительное время (один час и более), адгезия льда к поверхности обработанной ВСМФС резко уменьшается.

В это же время ствол-пика длиной до 6 метров (рис. 5) прошивает снежно-ледяной массив и струя ВСМФС создает внутри обледенения полость, внутри которой идет интенсивное образование облака ВСМФС. При этом сам снежно-ледяной массив изолирует облако ВСМФС от внешней среды и вся подаваемая энергия 1,5-2,0 МВт разрушает снежно-ледовую массу.

В результате наступает момент, когда давление, температура и фликкер-шум сопровождающий взрывное вскипание НВ приводят к образованию полостей и напряжениям внутри обледенения, которые разрушают снежно-ледяной массив. При таком разрушении обеспечивается целостность обледеневших конструкций корабля.



Рис. 5. Подача струй ВСМФС в снежно-ледяную массу

Принципиально важным оказался эффект разрушения снежно-ледовых масс на мелкие фрагменты, что обеспечивает сохранность конструкций при падении льда.

Эффективность использования струй ВСМФС для разрушения сплошного (монокристаллического) необводненного льда была продемонстрирована организаторам и участникам международного форума «Арктика - территория диалога», проходившего в марте 2017 года в г. Архангельске (рис. 6, 7).



Рис. 6. Работа ствольщика по разрушению монолита льда струями ВСМФС из ствола-пики



Рис. 7. Результат разрушения монолита льда струями ВСМФС из ствола-пики

Заключение

Представленные в статье материалы практического использования технологии ВСМФС позволяют с уверенностью утверждать, что учеными Академии ГПС МЧС России совместно со специалистами АГПС и ГЗ Архангельской области разработана и практически протестирована экологически безопасная технология разрушения снежно-ледовых масс, которая с успехом может быть использована для борьбы с обледенением кораблей.

При практическом использовании АГПМ доказано, что использование ВСМФС для разрушения обледенения может быть реализована тепловая энергия мощностью до 5 МВт, передаваемая к месту разрушения льда недогретой до вскипания водой (НВ), для получения которой используется специальный водогрейный котел.

Имеющиеся наработки в энергетике позволяют разработать технологию получения и транспортирования (передачи на расстояние по трубопроводной системе) НВ с давлением и температурой близкой к критической точке (с давлением 22,1 МПа и температурой 374°C) в малогабаритных, передвижных или контейнерных энергетических установках с тепловой мощностью до 5,0 МВт.

При контейнерном исполнении масса одного контейнера может составлять от 5 до 20 тонн в зависимости от мощности и комплектации.

Практически реализованные результаты по дальности (до 1500 м) и высоте (до 350 м) подачи НВ по рукавным линиям позволяют заключить, что при контейнерном исполнении установки получения НВ (аналог которой смонтирован в кузове АГПМ) и размещении ее на крупных надводных кораблях, а также на судах, типа танкер-газовоз позволит получать ВСМФС в любой части корабля (судна) и, следовательно, эффективно и безопасно разрушать обледенение.

Стоимость установки с тепловой мощностью до 5 МВт и запасом рукавов и стволов-пик с насадками для разрушения льда составляет около 50 млн. рублей, срок поставки не более 6 месяцев с момента поступления средств на изготовление, стоимость технического обслуживания не более 500 тыс. рублей в год.

Для обеспечения работы установки и ее обслуживания требуется один оператор, который проходит обучение в количестве 72 часов по программе близкой к программе подготовки оператора котельной.

Литература

1. Роевко В.В. Стратегия использования энергоэффективных многоцелевых мобильных модулей для обеспечения безопасности нефтегазовых комплексов в Арктике // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 11. С. 80-86.
2. Ищенко А.Д., Роевко В.В., Малыгин И.Г. Пожарная опасность и особенности тушения пожаров энергетических установок и помещений судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 88-94.
3. Ищенко А.Д., Роевко В.В., Малыгин И.Г., Комашинский В.И. Инновации в тушении пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-2 (40). С. 73-80.
4. Ищенко А.Д., Роевко В.В., Малыгин И.Г. Эксперименты тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) водной средой объемным способом // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С. 128-134.
5. Кондаков Е.И., Погорелов А.Ю. Применение тепло-активированной воды для тушения пожаров на морских и речных судах // Системы безопасности. Сборник трудов Ежегодной международной научно-технической конференции. 2018. № 27. С. 184-187.
6. Роевко В.В., Ищенко А.Д., Краснов С.М., Храмов С.П., Соковнин А.И. Объемный способ прекращения открытого горения в помещениях объектов энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 36-42.
7. Роевко В.В., Ищенко А.Д., Краснов С.М., Храмов С.П., Соковнин А.И. Тушение пламени в протяженных замкнутых сооружениях энергообъектов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 3. С. 44-49.
8. Роевко В.В., Ищенко А.Д., Краснов С.М., Храмов С.П., Соковнин А.И. Тушение маслonaполненных кабелей в зигзагообразном коллекторе // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 4. С. 38-42.
9. Роевко В.В., Храмов С.П., Сегаль М.Д., Краснов С.М. Объемный способ пожаротушения кабельных сооружений температурно-активированной водой // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. № 1. С. 40-50.
10. Чистяков Т.И. Влияние геометрических параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 2. С. 12-21.

11. Роенко В.В., Кармес А.П. Технология температурно-активированной воды: Физическая сущность; История разработки; Перспективы развития // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 3. С. 15-20.
12. Кармес А.П., Роенко В.В. Энергоэффективный способ подачи воды для тушения пожаров в труднодоступных местах трасс нефтегазопроводов. В книге: Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности // Сборник тезисов докладов материалов международной научно-практической конференции. 2018. С. 387-391.
13. Соковнин А.И., Роенко В.В., Ищенко А.Д. Осаждение дыма на объектах энергетики температурно-активированной водой // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 1. С. 54-59.
14. Ищенко А.Д., Роенко В.В., Малыгин И.Г., Соковнин А.И. Перспективы и возможности осаждения дыма при пожарах энергетических установок и помещений судов (кораблей) // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1 (43) Т.3. С. 91-97.

References

1. Roenko V.V. (2017). Strategy of using energy efficient multi-purpose mobile modules for ensuring safety of oil and gas complexes in the arctic. Business magazine Neftegaz.RU, 11, 80-86.
2. Ishhenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. (2018). Fire hazards and peculiarities of extinguishing fire power plants and vessels fire. Marine intellectual technology, 1-1(39), 88-94.
3. Ishhenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G., V.I. Komashinsky (2018). Innovations in the extinguishing the fires of energy installations and vessels (ships). Marine intellectual technology, 2-2(40), 73-80.
4. Ishhenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. (2018). Experiments of extinguishing the fires of energy installations and premises of vessels (ships) with water medium volume method. Marine intellectual technology, 1-3(41), 128-134.
5. Kondakov E.I., Pogorelov A.Yu. (2018). Application of heat-activated water for fire extinguishing on marine and river vessels. Annual International Scientific and Technical Conference Security Systems, 27, 184-187.
6. Roenko V.V., Ishhenko A.D., Krasnov S.M., Hramcov S.P., Sokovnin A.I. (2016). Volume way of termination of open burning in the premises of energy facilities. Fires and emergencies: prevention, elimination, 2, 36-42.
7. Roenko V.V., Ishhenko A.D., Krasnov S.M., Hramcov S.P., Sokovnin A.I. (2016). Fire extinguishing in extended closed energy constructions. Fires and emergencies: prevention, elimination, 3, 44-49.
8. Roenko V.V., Ishhenko A.D., Krasnov S.M., Hramcov S.P., Sokovnin A.I. (2016). Quenching oil filled cables in a zigaged manifold. Fires and emergencies: prevention, elimination, 4, 38-42.
9. Roenko V.V., Hramcov S.P., Segal' M. D., Krasnov S.M. (2017). Volume method of fire extinguishing of cable structures with temperature-activated water. Problems of safety and emergency situations, 1, 40-50.
10. Chistjakov T. I. (2017). Influence of geometric parameters of jets of temperature-activated water on complex resistance in extinguishing fires of class E. Fire and emergencies: prevention, elimination, 2, 12-21.
11. Roenko V.V., Karmes A.P. (2017). Technology of temperature-activated water: physical essence, history of development, development prospects. Fires and emergencies: prevention, elimination, 3, 15-20
12. Karmes A.P., Roenko V.V. (2018). Energy-efficient method of water supply for extinguishing fire in hard-accessed places of oil and gas pipes. In the book: Historical experience, contemporary problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire safety. Collection of abstracts of reports of the international scientific-practical conference, pp. 387-391.
13. Sokovnin A.I., Roenko V.V., Ishhenko A.D. (2016). Deposition of smoke on objects of energy temperature-activated water. Fires and emergencies: prevention, elimination, 1, 54-59.
14. Ishhenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G., Sokovnin A.I. (2019). Prospects and possibilities of smoke deposition in case of fires of power plants and vessels (ships) . Marine intellectual technologies, 1(43), 91-97.

УДК 623.82 (UDC 623.82)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОРСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Виктор Леонидович Мартынов

доктор технических наук, профессор кафедры радиосвязи на морском флоте
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Алексей Сергеевич Голосной

аспирант, инженер, лаборатория мониторинга недр
ФГБУ "ВНИИОкеангеология"
190121, Санкт-Петербург, Английский проспект, д.1
e-mail: golosnoy2@yandex.ru

Роман Валентинович Красильников

кандидат технических наук, главный научный сотрудник
АО "Концерн "Морское подводное оружие - Гидроприбор"
194044, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 24
e-mail: info@gidropribor.ru

Николай Васильевич Никитин

д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Аннотация

Направления совершенствования морских робототехнических комплексов обосновывают необходимость создания для этого соответствующей технической инфраструктуры. Сказанное означает, что:

1. комплексы должны быть оснащены современной научной аппаратурой, которая позволит комплексно исследовать и собрать взаимодополняющие данные о донной поверхности, структуре верхних слоев и профиле океанского дна для различных целей, среди которых наиболее важными являются проведение сейсморазведки и сбор доказательной базы на спорной территории арктического континентального шельфа о его принадлежности России;

2. корабли сопровождения и технической поддержки (подводные и надводные) должны обеспечить длительное функционирование комплексов для обеспечения процесса непрерывности при проведении ими исследовательских работ. Это объясняется тем, что точечное зондирование не предоставляет всего спектра необходимых данных для изучения характеристик морского дна (батиметрических, физических, геоморфологических).

В работе путем теоретических расчетов обосновывается преимущество использования лазерных систем подводного видения для реализации беспроводной связи в водной среде.

Полученные в ходе исследования результаты подтверждают обоснованность реализации данной методики. Однако, следует учитывать, при планировании исследовательских мероприятий в море, влияние сезонности на дальность передачи информации в оптическом канале.

Ключевые слова: лазерный канал связи, лазерная система подводного видения, Арктический шельф.

PROSPECTS OF USING LASER TECHNOLOGIES IN MARITIME TECHNOLOGIES FOR THE ARCTIC REGION

Victor L. Martynov,

the professor, Dr.Sci.Tech.,
Admiral Makarov SUMIS

Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation

Alexey S. Golosnoy,

engineer,

FSBI "VNIIOkeangeologia

Angliyskiy pr, St. Petersburg 190121, Russian Federation

Roman V. Krasilnikov

PhD, chief research officer

JSC "Concern "Sea Underwater Weapons - Gidropribor"

B.Sampsonievskii prospect 24, Saint-Petersburg, 194044 Russian Federation

Nikolay V. Nikitin

DScTech, Professor,

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Abstract

Directions for improving marine robotic systems justify the need to create an appropriate technical infrastructure for this. This means that:

1. the complexes must be equipped with modern scientific equipment, which will allow to investigate and collect data on the bottom surface the structure of the upper layers and the profile of the ocean floor for various purposes, among which the most important are conducting seismic exploration and collecting evidence in the disputed territory of the Arctic continental shelf about its belonging to Russia

2. escort ships and technical support must ensure the long-term operation of the complexes to ensure the continuity of the research process. This is because point research does not provide the full range of necessary data for studying the characteristics of the seabed.

In this paper, by theoretical calculations, the advantage of using laser systems for underwater vision for the implementation of wireless communications in the aquatic environment

The findings of the study results confirm the validity of the implementation of this methodology. However, it is necessary to take into account, when planning research activities at sea, the effect of seasonality on the range of information transmission in the optical channel.

Key words: laser communication channel, laser system of underwater vision, Arctic shelf.

Одновременное синхронное исследование донной поверхности континентального шельфа и структуры его вертикального разреза аппаратурой, функционирующей в различных физических полях, устранил неоднозначность в интерпретации полученных данных. Это достигается не только сопоставлением результатов измерений, но и навигационной привязкой ко времени и месту исследовательских работ, а также непрерывной телевизионной регистрацией процесса сбора данных.

Сказанное означает, что для оснащения морских робототехнических комплексов (МРТК) техническими средствами сбора данных о шельфе следует применять:

- гидроакустические системы, в том числе с применением методов нелинейной акустики, реализуемых с помощью параметрических антенн;
- телевизионно-оптические средства для визуализации района сбора данных;
- навигационные системы;
- лазерные телевизионные системы, обеспечивающие функционирование канала связи между подводными аппаратами и кораблями обеспечения.

В сборе доказательной базы о спорной территории Арктического шельфа важная роль принадлежит лазерным системам подводного видения (ЛСПВ). Возможности ЛСПВ базируются на таких свойствах формируемого лазерного пучка, как его направленность, когерентность, малая расходимость (даже в водной среде) и сильная концентрация световой энергии в пространстве. Лазерный луч является самым ёмким носителем информации и в этой роли – принципиально новым средством её обработки и передачи в воде. Плотность энергии лазерных излучателей обеспечивает возможность передачи и приёма в гидросфере данных по лазерному лучу на расстояния, не достижимые современными подводными телевизионными системами. Такими данными могут быть видеосюжеты, сигналы управления, координаты взаимодействующих кораблей, гидрооптические и гидрофизические параметры водной среды, измеренные датчиками МРТК, и так далее. ЛСПВ способны осуществить бесконтактное информационное взаимодействие

между двумя и более разнесёнными в пространстве их носителями, формируя с помощью лазерного пучка канал передачи информации, который можно назвать беспроводным оптическим каналом связи.

Рассмотрим такой канал связи между морскими объектами, в котором данные в водной среде передаются в цифровом виде по лазерному лучу. С внедрением передачи цифровых сигналов по лазерному лучу отпадает необходимость трансляции с МРТК по кабелю аналогового видеосигнала, который из-за слабой помехозащищённости подвержен сильным искажениям.

Применение в оптическом канале цифровой (импульсной) передачи видеосигнала обусловлено рядом достоинств по сравнению с его передачей в аналоговой (непрерывной) форме:

- во-первых, цифровые методы существенно снижают искажения от помех при формировании и передаче ТВ сигнала;
- во-вторых, большим преимуществом цифровых методов передачи информации по сравнению с аналоговыми является возможность регенерации (восстановления) цифровой последовательности, существенно искаженной ослаблением при передаче по такому каналу связи, как вода;
- в-третьих, важным достоинством передачи информации в цифровой форме является ее универсальность для любых видов передаваемых сообщений (ТВ изображения, команды и так далее);
- в-четвертых, цифровые системы по сравнению с аналоговыми обладают более высокой надежностью связи, так как не подвержены такому субъективному фактору для оператора, как помеха обратного рассеяния;
- в-пятых, высокие качественные показатели работы цифровых систем, таких, например, как достоверность и быстродействие.

Априори можно допустить построение линии лазерной связи для различных сред (вода, атмосфера) однотипно, так как представляет собой цифровую систему передачи данных. Передавать информацию с помощью лазеров можно через любую среду, являющуюся прозрачной для

рабочего диапазона выбранного излучателя. Водная среда прозрачна для видимого диапазона, и, следовательно, пригодна для передачи информации с помощью оптических беспроводных методов. Применение лазерных систем обеспечивает большую пропускную способность, составляющую порядка 10^7 Мбит/с, для телевизионного сигнала со стандартной полифонией в 256 градаций яркости. Такая скорость передачи информации с обеспечивается с учётом того, что несущая частота (f_H) оптического диапазона длин волн может достигать значения 10^8 МГц.

Расчёт скорости передачи информации производился по формулам [2]:

$$c = f_{\delta} \cdot k \quad (1)$$

где:

c – скорость передачи цифровой информации по каналу связи (Мбит/с);

f_{δ} – частота дискретизации;

k – число двоичных символов в кодовой комбинации одного отсчёта.

Для средней полифонии (256 градаций яркости) число двоичных символов в кодовой комбинации одного отсчёта составляет: $k = 8$

Частоту дискретизации f_{δ} выражают через верхнюю (максимальную) граничную частоту $f_{зр}$ модулирующего (передаваемого по каналу связи) телевизионного сигнала по формуле:

$$f_{\delta} = 2 \cdot f_{зр} \quad (2)$$

где:

$f_{зр}$ – максимальная частота спектра исходного,

то есть модулирующего телевизионного сигнала.

Верхняя граничная частота телевизионного сигнала равна: $f_{зр} = 6,5$ МГц

Тогда: $f_{\delta} = 13$ МГц

Скорость передачи с цифровой информации по каналу связи составит: $c = 104$ Мбит/с

Если учесть, что кроме сигнала яркости должна быть передана информация о цвете, то общий цифровой поток удваивается и становится равным 208 Мбит/с.

Таковой должна быть пропускная способность канала связи для трансляции телевизионного сигнала (скорость передачи видеоинформации с полифонией в 256 градаций яркости по гидрооптическому каналу): $c = 208$ Мбит/с

Пропускная способность передачи видеоинформации по лазерному лучу значительно выше. Несущая частота f_H лазерного излучения:

$$f_H = 10^8 \text{ МГц}$$

Отсюда следует, что верхняя граничная частота $f_{зр}$ сигнала, модулирующего лазерное излучение, будет на 1...2 порядка ниже и составит:

$$f_{зр} = 10^6 \text{ МГц}$$

Частота дискретизации f_{δ} в соответствии с теоремой Котельникова [2] удваивается и будет равна: $f_{\delta} = 2 \cdot 10^6$ МГц

Скорость передачи видеоинформации с полифонией в 256 градаций яркости, которую обеспечивает лазерный канал, составляет:

$$c = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Мбит/с}$$

Она на пять порядков выше требуемой. Таким образом, пропускная способность лазерного канала связи обеспечивает передачу видеоинформации со средней полифонией без каких бы то ни было ограничений.

Большая пропускная способность свидетельствует о высокой информационной ёмкости гидрооптического канала. В нём реализуется передача телевизионного сигнала. Это означает, что теоретически не существует ограничений для реализации в водной среде беспроводного гидрооптического канала передачи видеосюжетов.

Дискуссионным остаётся лишь вопрос о дальности действия такого канала, которая будет существенно ограничена ослаблением лазерного пучка толщей воды.

Рассмотрим структурную схему, которая обеспечит передачу информации по выбранному каналу связи с обеспечивающего судна на подводный робот – МРТК - для создания виртуального навигационного ориентира.

Схема представлена на рисунке 1:

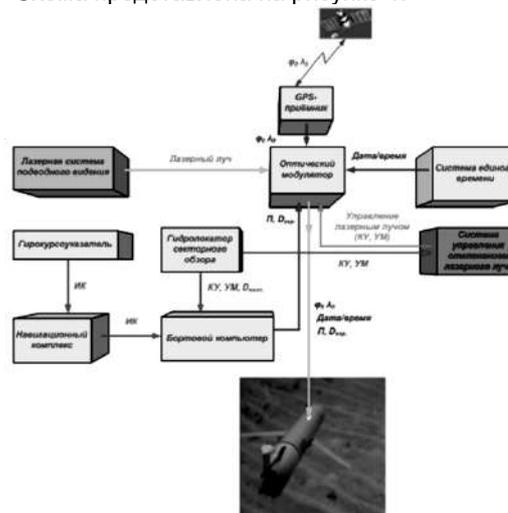


Рис. 1 - Структурная схема передачи информации по гидрооптическому каналу связи

Из схемы следует, что лазерное излучение модулируется данными, обеспечивающими точное позиционирование подводного робота в толще воды. Необходимо отметить, что информация «Дата/время», которая в числе прочих замешивается в световой пучок, обеспечивает синхронизацию, то есть привязку по времени, всех информационных процессов на обеспечивающем судне и МРТК.

Система управления отклонением лазерного луча обеспечивает его наведение на подводный робот по данным, получаемым от гидролокатора секторного обзора.

Одним из самых важных аспектов реализации тактического взаимодействия между кораблём обеспечения (КО) и МРТК является знание дальности передачи информации по лазерному лучу в гидросфере. Её расчет выполняется по формуле из [3]:

$$D = -\frac{2,3}{\varepsilon} \cdot \lg \left[SRN \cdot \frac{P}{P_{\text{л}}} \right] \quad (3)$$

где:

$P_{\text{л}}$ – мощность лазерного излучателя;

P – мощность шумов оптического приемника (фотодетектора);

SRN – заданная величина отношения «сигнал/шум»;

ε – показатель ослабления водной среды.

Для определения величины «сигнал/помеха» (SRN) требуется выразить графически его зависимость от вероятности ошибки на бит (BER) при передаче цифровой информации по гидрооптическому каналу связи. В системах цифровой оптической коммуникации величина BER выражается формулой, использующей функцию ошибок $erf(x)$.

Вероятность ошибки на бит BER определяется выражением (4) из [4]:

$$BER = \frac{1 - erf(x)}{2} \quad (4)$$

где:

BER – частота ошибки на бит при передаче цифрового видео по беспроводному оптическому каналу связи;

$erf(x)$ – функция ошибок случайной величины x .

Для нормального закона распределения случайная величина x выражается математической зависимостью (5):

$$x = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot SRN \quad (5)$$

SRN – отношение «сигнал/помеха».

Зависимость отношения «сигнал/помеха» от вероятности ошибки на бит характеризуется на рисунке 2.

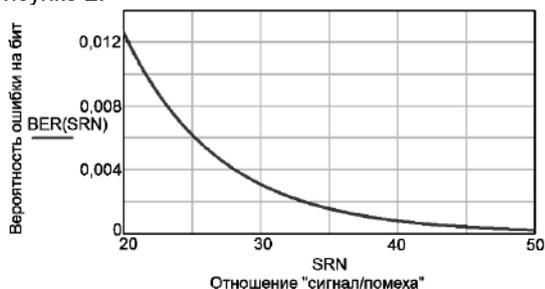


Рис. 2 - Зависимость отношения «сигнал/помеха» от вероятности ошибки на бит

Вероятность безискаженной передачи цифрового видео по беспроводному оптическому каналу связи определяется выражением:

$$1 - BER = 1 - \frac{1 - erf(x)}{2} \quad (6)$$

Зависимость отношения «сигнал/помеха» от вероятности безискаженной передачи характеризуется на рисунке 3.

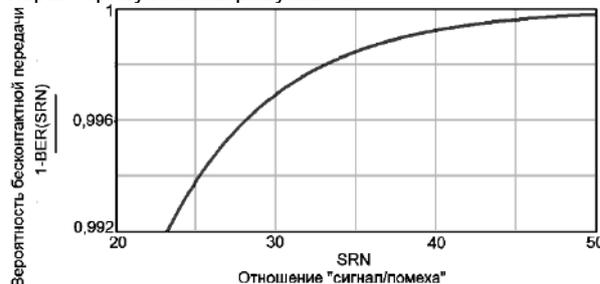


Рис. 3 - Зависимость отношения «сигнал/помеха» от вероятности безискаженной передачи

Из рисунка 3 следует, что для вероятности безискаженной передачи, равной 0,997, отношение «сигнал/помеха» составляет:

$$SRN = 30$$

Зависимость дальности ЛСПВ от мощности шумов фотоприёмника, полученная по формуле (4) для лазерного излучателя мощностью, равной $P_{\text{л}} = 10 \text{ Вт}$, и показателя ослабления водной среды $\varepsilon = 0,125 \text{ м}^{-1}$ ($z_0 = 40 \text{ м}$), представлена на графике № 3 рисунка 5.

Как следует из графика, дальность распространения лазерного излучения в водной среде составляет более 100 метров. Для определения потенциальных возможностей лазерных излучателей требуется проведение натурных испытаний в реальных условиях. Испытаниям должно предшествовать проведение научных исследований, направленных на определение мощности шумов фотодетектора, облучаемого лазерным излучателем. Это обеспечит чистоту эксперимента.

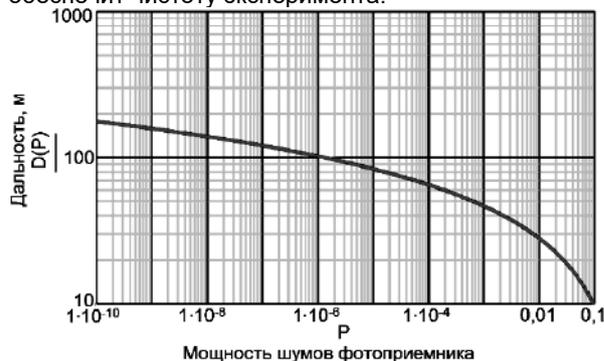


Рис. 4 - Зависимость дальности ЛСПВ от мощности шумов фотоприёмника

Аналогичная зависимость для значений $P_{\text{л}} = 10 \text{ Вт}$ и показателя ослабления водной среды $\varepsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$ ($z_0 = 25 \text{ м}$) представлена на рисунке 5:

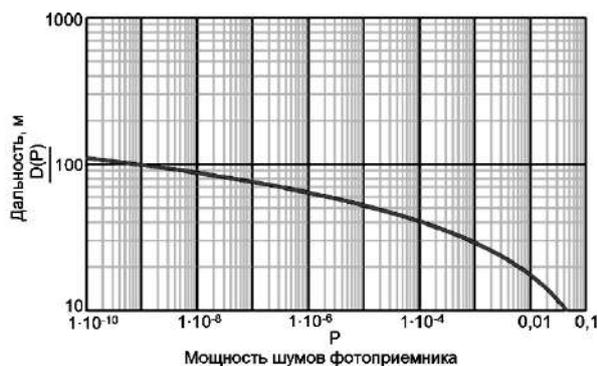


Рис. 5 - Зависимость дальности ЛСПВ от мощности шумов фотоприёмника (для $P_n = 10 \text{ Вт}$ и $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$)

И, наконец, на рисунке 6 приведена кривая изменения дальности ЛСПВ для $P_n = 10 \text{ Вт}$ в

водной среде с показателем ослабления, равным $\epsilon = 0,333 \text{ м}^{-1}$ ($z_б = 15 \text{ м}$):

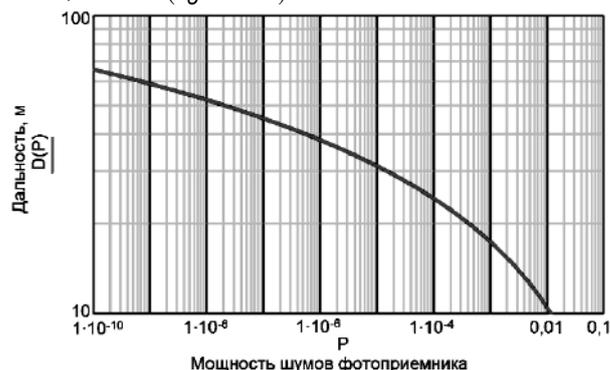


Рис. 6 - Кривая изменения дальности ЛСПВ для $P_n = 10 \text{ Вт}$ ($\epsilon = 0,333 \text{ м}^{-1}$)

Результаты, приведённые на рисунках 4-6 сведены в таблицу № 1.

Таблица № 1

Зависимость дальности действия ЛСПВ от показателя ослабления водной среды (средняя мощность лазерного излучения $P_n = 10 \text{ Вт}$)

Показатель ослабления водной среды ϵ [м ⁻¹]	Мощность шумов фотодетектора P [Вт]							
	Дальность распространения лазерного излучения в воде D [м]							
	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³
0,333 ($z_б = 15 \text{ м}$)	65,8	58,9	52,0	45,1	38,1	31,2	24,3	17,4
0,2 ($z_б = 25 \text{ м}$)	109,5	98,1	86,5	75,0	63,5	52,0	40,5	29,0
0,125 ($z_б = 40 \text{ м}$)	175,2	156,8	138,4	120,0	101,6	83,2	64,8	46,4

Исследование данных таблицы № 1 показывает, что на дальность распространения лазерного луча под водой в значительной степени влияет показатель ослабления ϵ .

Например, для водной среды с $\epsilon = 0,125 \text{ м}^{-1}$ ($z_б = 40 \text{ м}$) дальность пучка в 2,66 раза больше, чем для района с $\epsilon = 0,333 \text{ м}^{-1}$ ($z_б = 15 \text{ м}$).

Для водной среды с $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$ ($z_б = 25 \text{ м}$) дальность распространения лазерного излучения в 1,6 раза больше, чем для акватории с $\epsilon = 0,333 \text{ м}^{-1}$ ($z_б = 15 \text{ м}$).

Для подтверждения абсолютных результатов таблицы № 1 целесообразно провести исследование дальности распространения лазерного излучения в гидросфере по критерию уменьшения его интенсивности с увеличением расстояния.

Суммарное снижение интенсивности света из-за геометрической расходимости пучка и его ослабления в водной среде определяется выражением (7):

$$I = \frac{I_0 \cdot R_0^2 \cdot \exp[-(\sigma + \chi) \cdot X]}{\left[R_0 + \left(L_1 + \frac{L_2}{n_S} + \frac{X}{n_V} \right) \cdot \theta_0 \right]^2} \quad (7)$$

или в нормированном виде:

$$\bar{I} = \frac{I}{I_0} = \frac{R_0^2 \cdot \exp[-(\sigma + \chi) \cdot X]}{\left[R_0 + \left(L_1 + \frac{L_2}{n_S} + \frac{X}{n_V} \right) \cdot \theta_0 \right]^2} \quad (8)$$

Здесь:

n_S – показатель преломления защитного стекла (выходное окно);

n_V – показатель преломления воды;

L_1 – расстояние от излучателя до выходного окна;

L_2 – толщина выходного окна с преломлением n_S ;

θ_0 – начальная расходимость пучка (на сторону);

X – протяженность трассы в воде с преломлением n_V ;

θ - угол расхождения в плоскости наблюдения (на любом фиксированном расстоянии X).

Зависимости потерь лазерного пучка в воде от дальности приведена на рисунке 7:

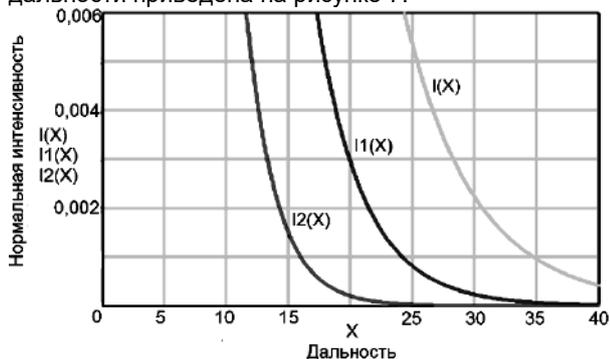


Рис. 7 - Зависимости потерь лазерного пучка в воде от дальности

где: $I(x)$ – нормированная интенсивность при $\varepsilon = 0,125 \text{ м}^{-1}$ ($z_6 = 40 \text{ м}$);

$I_1(x)$ – нормированная интенсивность при $\varepsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$ ($z_6 = 25 \text{ м}$);

$I_2(x)$ – нормированная интенсивность при $\varepsilon = 0,333 \text{ м}^{-1}$ ($z_6 = 15 \text{ м}$).

На графике № 6 невозможно определить степень уменьшения интенсивности лазерного пучка до величины, определяющей поражение сигнала на фотодетекторе помехой. Для этого требуется переход к логарифмическому масштабу. В логарифмическом масштабе зависимость нормированной интенсивности лазерного луча от дальности в воде представлена на рисунке 8:

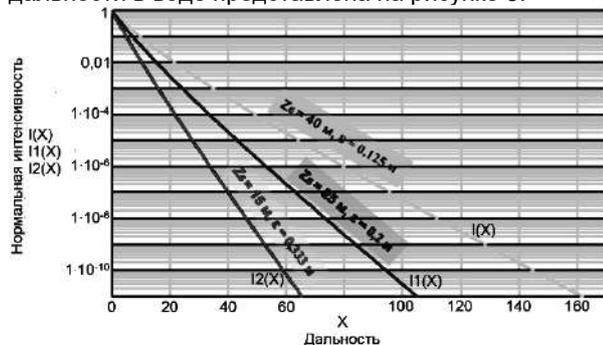


Рис. 8 - Зависимости потерь лазерного пучка в воде от дальности в логарифмическом масштабе

Порог снижения нормированной интенсивности до уровня 10⁻¹¹ определяется по формуле расчёта минимальной мощности светового потока фотодетектора, требуемой для генерации фототока:

$$NEP = \sqrt{(P_{sol}^2 + P_{темн.}^2 + P_c^2)} \quad (9)$$

где:

NEP – минимальная мощность светового потока фотодетектора для генерации фототока;

P_{sol}^2 – шумы, вызванные падением света на фотодетектор;

$P_{темн.}^2$ – шумы, вызванные темновым током;

P_c^2 – мощность светового потока, падающего на фотодетектор.

В результате расчётов получено:

$$P_{sol}^2 = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт};$$

$$P_{темн.}^2 = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт};$$

$$P_c^2 = 9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$$

$$NEP = 3,63 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$$

Расчёты показывают, что световой поток лазерного излучателя мощностью 10 Вт, уменьшаясь до величины $3,63 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$, ослабляется примерно в 10^{12} раз. Для большей достоверности в графике № 7 взят уровень нормированной интенсивности на один порядок выше, что составляет величину:

$$\frac{I_{\partial}}{I_{изл.}} = 10^{-11} \quad (10)$$

где:

$I_{изл.}$ – интенсивность излучённого светового потока;

I_{∂} – интенсивность действующая, то есть интенсивность светового потока в точке между излучателем и приёмником.

Величины дальностей лазерного излучения на графике № 7 подтвердили правильность расчётов, представленных в таблице № 1.

Полученные результаты подтверждают обоснованность реализации беспроводной связи в водной среде по оптическому каналу. Однако, следует помнить, что при планировании исследовательских мероприятий в море рекомендуется учитывать влияние сезонности на дальность передачи информации в оптическом канале.

Таким образом, с внедрением оптического канала для северных широт обеспечивается трансляция по лазерному лучу цветного видео на дальностях, которые на порядок превышают дальности эксплуатируемых телевизионных средств подводных аппаратов.

ВЫВОДЫ:

Итак, с учетом экономических интересов нашего государства в северных морских акваториях реализация лазерных технологий обеспечит приоритет РФ в освоении данного региона и сбор доказательной базы принадлежности Российской Федерации спорных территорий Арктического шельфа[5].

Литература

1. А.П.Евтютов и др. Справочник по гидроакустике. Л., Судостроение, 1988 год.
2. В.Е.Джакония. Телевидение. Изд. «Радио и связь», Москва, 1986 год.
3. Ю.М.Климов. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. «Советское радио», Москва, 1978.
4. М.Кацман. Лазерные системы связи. НГТУ, Новосибирск, 2005.
5. Мартынов В.Л. Автономные обитаемые подводные аппараты в борьбе с морским терроризмом. Научно-технический журнал «Вопросы оборонной техники». Серия 16, выпуск 1-2. Москва, 2011.

References

1. Evtyutov A.P. Spravochnik po gidroakustike [Hydroacoustics manual] Leningrad, Sudostroenie, 1988.
2. Dzhakoniya V.E. Televidenie. [A television] Moscow, Radio i svyaz', 1986.
3. Klimkov Yu.M. Osnovy rascheta optiko-elektronnykh priborov s lazerami. [Fundamentals of the calculation of optical-electronic devices with lasers] Moscow, Sovetskoe radio, 1978.
4. Katsman M. Lazernye sistemy svyazi. [Laser communication systems] Novosibirsk, NGTU, 2005.
5. Martynov V.L. (2011) Avtonomnye neobitaemye podvodnyye apparaty v bor'be s morskim terrorizmom. Voprosy obronnoy tekhniki, 2, 33-39.

УДК 623.82 (UDC 623.82)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ ПОДВОДНЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

Виктор Леонидович Мартынов

доктор технических наук, профессор кафедры радиосвязи на морском флоте
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Алексей Сергеевич Голосной

аспирант, инженер, лаборатория мониторинга недр
ФГБУ "ВНИИОкеангеология"
190121, Санкт-Петербург, Английский проспект, д.1
e-mail: golosnoy2@yandex.ru

Николай Михайлович Божук

кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой радиосвязи на морском флоте
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: BozhukNM@gumrf.ru

Николай Васильевич Никитин

д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Аннотация

Неблагоприятное влияние водной среды на качество видеосюжетов проявляется не только в ослаблении светового потока, но и в образовании дымки, вуалирующей изображение. В литературе по гидрооптике вуалирующую дымку чаще называют помехой обратного рассеяния. Эту помеху формирует обратное объемное рассеяние светового излучения, идущего от наблюдаемого объекта в сторону наблюдателя, а также излучение, пришедшее со стороны.

Работа основана на анализе различных факторов, влияющих на уменьшение яркости помехи обратного рассеяния. На основе проведенных теоретических расчетов авторами определены основные пути снижения помехи обратного рассеяния:

- снижение углов засветки осветителей прожекторного типа;
- применение лазерных осветителей.

Научное решение этой задачи, ее реализация в совокупности с другими мерами обеспечат рост дальности видимости телевизионных средств подводных аппаратов. Это увеличит расстояние подводного аппарата до грунта и, как следствие, возрастет эффективность эксплуатации поисковой системы.

Ключевые слова: помеха обратного рассеяния, подводное видение, лазерное сканирование,

STUDY OF THE IMPACT OF BACKSCATTERING INTERFERENCE FOR VISIBILITY OF UNDERWATER TELEVISION SYSTEMS

Victor L. Martynov

the professor, Dr.Sci.Tech.

Admiral Makarov SUMIS

Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation

Alexey S. Golosnoy

engineer,

FSBI "VNIIOkeangeologia

Angliyskiy pr, St. Petersburg 190121, Russian Federation

Nikolai M. Bozuk

docent, Cand.Sci.Tech.

Admiral Makarov SUMIS

Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation

Nikolay V. Nikitin

DScTech, Professor

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: morintex_spb@mail.ru

Abstract

The adverse effect of the aquatic environment on the quality of underwater vision is manifested not only in the weakening of the luminous flux, but also in the formation of a backscatter interference. This

interference is formed by the backward volumetric scattering of light coming from the observed object towards the observer, as well as radiation coming from the side.

The work is based on the analysis of various factors affecting the decrease in the brightness of the backscatter interference. On the basis of the theoretical calculations carried out, the authors determined the main ways to reduce the backscatter interference:

- reduction of the angles of illumination of floodlights of the projector type;
- use of laser illuminators.

The scientific solution of this problem, its implementation in conjunction with other measures will ensure an increase in the visibility range of television equipment of underwater vehicles. This will increase the distance of the underwater vehicle to the ground and, as a result, the efficiency of the search engine will increase.

Key words: backscatter interference, underwater vision, laser scanning/

Введение

Помеха обратного рассеяния (ПОР) приводит к возникновению своеобразной световой пелены, значительно ухудшая условия наблюдения под водой. Это явление приведено на рисунке 1. Яркость вуалирующей дымки настолько сильна, что делает объекты практически невидимыми на экранах мониторов.

Таким образом, дальность видимости под водой зависит как от показателя её ослабления ϵ , так и от яркости ПОР. Проанализируем это расчетами и с помощью графических построений.



Рис. 1 - Помеха обратного рассеяния при подводном наблюдении объектов

Вуалирующая дымка определяется объемом водной среды, находящейся в поле зрения телекамеры и одновременно освещаемой светильниками. Вне зависимости от характера происхождения, ПОР играет роль внешней помехи. На рисунке 2 видно, как она уменьшает дальность видимости под водой.



Рис. 2 - Вуалирующая дымка не позволяет рассмотреть зону за рубкой подводной лодки

Фото сделано на одном из подводных аппаратов (ПА) при обследовании затонувшей подводной лодки «Комсомолец». Белые точки в левой части кадра - это пелена, то есть оптические неоднородности, отражающие свет прожекторов и создающие вуалирующую дымку. Очевидно, что если водная среда содержит взвеси и освещена искусственным светом, то эффект его рассеяния вызовет на некотором расстоянии D образование ПОР, яркость которой можно обозначить как $B_{\delta}(D)$.

Эта помеха приводит к снижению видимого контраста, то есть контраста объекта, наблюдаемого на расстоянии D от телевизионной камеры. При рассмотрении сюжетов с того же расстояния D видимые, то есть наблюдаемые, яркости как попавших в объектив телекамеры предметов, так и фона будут в T раз меньше истинных. Здесь T – коэффициент пропускания толщи воды, через которую рассматривается объект и фон.

Для дальнейших рассуждений обозначим:

$V_{об.н}$ – наблюдаемая (видимая) яркость объекта;

$V_{ф.н}$ – наблюдаемая яркость фона;

$K_{об.н}$ - наблюдаемый контраст объекта с фоном на расстоянии D от объекта.

С учетом введенных обозначений наблюдаемые яркости объекта и фона выражаются уравнениями:

$$V_{об.н} = V_{об} \cdot \exp(-\bar{\epsilon} \cdot D) + B_{\delta}(D) \quad (1)$$

$$V_{ф.н} = V_{ф} \cdot \exp(\bar{\epsilon} \cdot D) + B_{\delta}(D) \quad (2)$$

где:

$V_{об}$ – истинная яркость объекта (измеренная в плоскости объекта);

$V_{ф}$ – истинная яркость фона;

$B_{\delta}(D)$ – истинная яркость вуалирующей дымки в пределах слоя воды D ;

$\bar{\epsilon}$ - среднее значение показателя ослабления светового потока в водной среде в пределах слоя D ;

С учётом введённых обозначений значение наблюдаемого контраста объекта $K_{об.н}$ определяется выражением:

$$K_{об.н} = \frac{(B_{об} - B_{ф}) \cdot \exp(-\bar{\varepsilon} \cdot D)}{(B_{об} - B_{ф}) \cdot \exp(-\bar{\varepsilon} \cdot D) + 2 \cdot B_{\delta}(D)} = \frac{K_{об}}{1 + \frac{2 \cdot B_{\delta}(D) \exp(-\bar{\varepsilon} \cdot D)}{B_{об} + B_{ф}}} \quad (3)$$

Когда при зрительном восприятии наблюдаемый контраст $K_{об.н}$ становится равным пороговому контрасту $K_{порог}$, воспринимаемому глазом оператора, то расстояние D при равенстве порогового и наблюдаемого контрастов объекта, то есть $K_{об.н} = K_{порог}$, является дальностью видимости объекта D [1]. Тогда с учётом выражения (3) пороговый контраст глаза оператора можно представить уравнением [1]:

$$K_{порог} = \frac{K_{об}}{1 + \frac{2 \cdot B_{\delta}(D) \cdot \exp[\bar{\varepsilon}(D) \cdot D]}{B_{об} + B_{ф}}} \quad (4)$$

Где:

$\bar{\varepsilon}(D)$ - среднее значение показателя ослабления на расстоянии, равном дальности видимости.

Если в формуле (3) выражение « $2 \cdot B_{\delta}(D) \cdot \exp(-\bar{\varepsilon} \cdot D)$ » обозначить символом μ , то (3) примет вид:

$$K_{об.н} = \frac{K_{об}}{1 + \frac{\mu}{B_{об} + B_{ф}}} \quad (5)$$

где:

$K_{об}$ – действительный, или истинный контраст, определяемый выражением (3);

μ - оптическая мутность слоя [1].

Приведённые рассуждения показывают, что чем больше вуалирующая яркость $B_{\delta}(D)$, тем выше оптическая мутность слоя, а соответственно, меньше видимый контраст наблюдаемого объекта, а значит, хуже видимость.

Более наглядный способ доказательства основывается на том, что наблюдаемый контраст $K_{об.н}$ выражает диапазон яркостей и численно равен:

$$K_{об.н} = \frac{B_{max}}{B_{min}} \quad (6)$$

где:

B_{max}, B_{min} – экстремальные значения яркости – отношение максимальной яркости в поле изображения к минимальной.

Видимый контраст определяется не только характеристиками телевизионного канала, но и условиями рассматривания изображения (ПОР в рассеивающей среде; прозрачность водной среды) [2].

Контраст ПОР $K_{ПОР}$ при дополнительной внешней засветке $B_{\delta}(D)$ определяется из выражения (7), приведённого в [3]:

$$K_{ПОР} = \frac{B_{max} + B_{ПОР}}{B_{min} + B_{ПОР}} = \frac{\frac{B_{max} \cdot (B_{max} + B_{ПОР})}{B_{min} \cdot (B_{min} + B_{ПОР})}}{\frac{B_{max}}{B_{min}}} = \frac{B_{max}}{B_{min}} \cdot \frac{1 + \frac{B_{ПОР}}{B_{max}}}{1 + \frac{B_{ПОР}}{B_{min}}} \quad (7)$$

Так как $B_{max} \gg B_{min}$, то:

$$\frac{B_{ПОР}}{B_{max}} \ll \frac{B_{ПОР}}{B_{min}}$$

Откуда следует, что:

$$1 + \frac{B_{ПОР}}{B_{max}} < 1 + \frac{B_{ПОР}}{B_{min}}$$

Следовательно:

$$K_{ПОР} < K_{из.}$$

то есть наличие ПОР снижает контраст изображения, а соответственно, и дальность видимости, что следует из рисунка 2. Здесь расстояние от телекамеры ПА, проводившей съёмку, до ограждения рубки подводного аппарата (ПА) «Комсомолец» - не более шести метров, но рассмотреть пространство по левому борту за рубкой не представляется возможным из-за мешающего воздействия вуалирующей дымки (ПОР). Сложно говорить об эффективности подводного поиска, если визуальный просмотр пространства обеспечивается телевизионным каналом с низким качеством воспроизведения.

Для составления расчетной методики определения яркости вуалирующей дымки $B_{\delta}(D)$ с учетом суммарного многократного рассеяния в [1] представлено выражение в виде:

$$B_{\delta}(D) = E(0) \cdot \Lambda \cdot \varepsilon \cdot d_{изл.} \cdot b \quad (8)$$

где:

$E(0)$ – освещенность, создаваемая источником света на входе в водную среду;

$\varepsilon \cdot d_{изл.}$ – оптический диаметр излучателя;

Λ - вероятность выживания фотона;

b – определяется выражением:

$$b = \frac{\chi(\theta) \cdot 10^{\frac{\varepsilon \cdot D}{2}}}{4 \cdot \pi \cdot \sin \theta} \quad (9)$$

Величина $E(0)$ определяется, графиком освещенности толщи воды $E(D)$ между осветителем, входящим в состав подводной системы видения, и освещаемым объектом наблюдения [4, с.196]. Построение графика выполняется по формуле (10):

$$E(D) = \frac{0,5 \cdot I \cdot \tau_{\text{илл}} \cdot e^{-K_{\delta} \cdot \varepsilon \cdot D}}{D^2} \quad (10)$$

- где:
- $E(D)$ – освещенность толщи воды между светильником и объектом наблюдения;
 - I – сила света светильника (осветителя);
 - $\tau_{\text{илл}}$ - коэффициент потерь в двух иллюминаторах (светильник и телекамера);
 - K_{δ} – коэффициент достоверности;
 - D – текущее расстояние, на которое распространяется свет;
 - $I = 12000 \text{ кд}$ – сила света прожекторного осветителя «Коралл»;
 - $\tau_{\text{илл}} = 0,5$ – коэффициент, характеризующий потери света при прохождении защитного стекла иллюминатора;
 - $\varepsilon = 0,308 \text{ м-1}$;
 - $K_{\delta} = 0,5$ – значение коэффициента достоверности. Получено статистическим путем;
 - $d_{\text{изл}} = 0,05 \text{ м}$ – диаметр защитного стекла осветителя;
 - $\theta = 80^{\circ}$ – угол засветки осветителя.

График освещенности толщи воды $E(D)$ между осветителем и объектом наблюдения представлен на рисунке 3 за № 1. Для удобства построения ось ординат выполнена в логарифмическом масштабе.

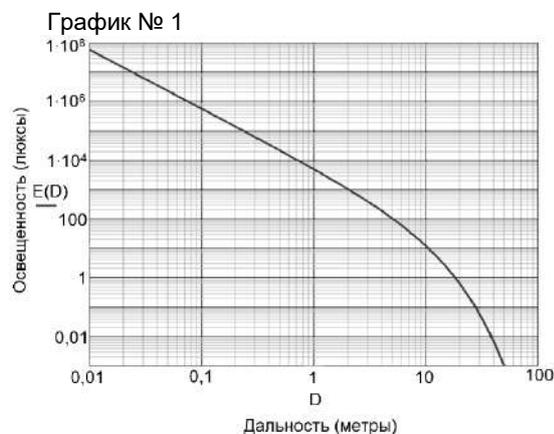


Рис. 3 – График зависимости освещенности толщи воды от дальности

В соответствии с графиком № 1 величина освещенности, создаваемой на расстоянии 1 см от источника света в воде, составляет $E(0,01) = 5,751 \cdot 10^7 \text{ лк}$

Итак, математическая модель для расчета яркости ПОР в водной среде, имеет вид:

$$B_{\delta}(D) = E(0) \cdot \Lambda \cdot \varepsilon \cdot d_{\text{изл}} \cdot \frac{\chi(\theta) \cdot 10^{\frac{\varepsilon \cdot D}{\theta}} \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2}}{4 \cdot \pi \cdot \sin \theta} \quad (11)$$

График зависимости яркости ПОР $B_{\delta}(D)$ от дальности, построенный в соответствии с выражением (11), представлен на рисунке 4.

Результаты графического построения показывают, что максимальное влияние вуалирующая дымка, формируемая отраженным светом прожекторных осветителей с широким углом засветки, оказывает в непосредственной близости от осветителя. Однако, уже через два метра величина яркости ПОР снижается на порядок. На дальности, равной десяти метрам от осветителя, яркость вуалирующей дымки падает на три порядка.

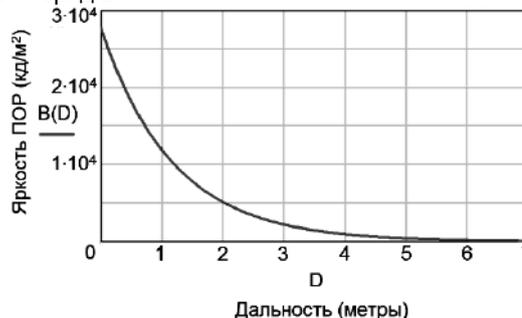


Рис. 4 – График зависимости яркости ПОР от дальности. $\theta = 80^{\circ}$

Проанализируем далее, как изменится негативное влияние ПОР с уменьшением угла засветки осветителей. Расчеты проведем для светильника с углом засветки $\theta = 40^{\circ}$. Результаты выполненных расчетов представлены на рисунке 5:

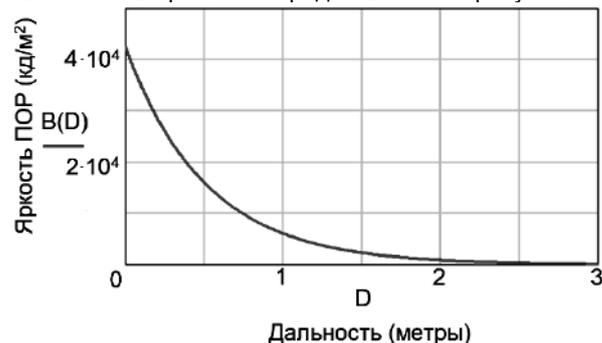


Рис. 5 – График зависимости яркости ПОР от дальности. $\theta = 40^{\circ}$

Как следует из графика, с уменьшением угла засветки светильников при возрастании дистанции наблюдения отчетливо просматривается тенденция к снижению яркости вуалирующей дымки.

Необходимо, также, отметить еще одно отличие двух графиков, выражающееся в том, что величина яркости ПОР перед осветителем при $\theta = 40^{\circ}$ несколько увеличится по сравнению с величиной $\theta = 80^{\circ}$. Это объясняется возрастанием плотности светового потока.

Если угол засветки уменьшить еще больше, например, до значения $\theta = 10^{\circ}$, то уменьшение яркости ПОР будет просматриваться еще более отчетливо. Результаты расчетов $B_{\delta}(D)$ представлены на рисунке № 6.

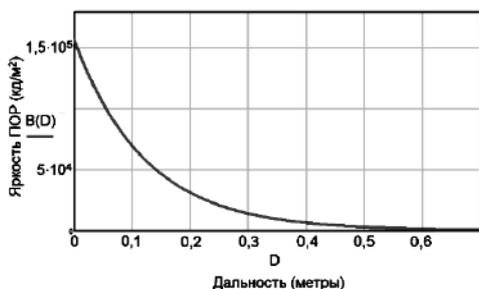


Рис. 6 – График зависимости яркости ПОР от дальности. $\theta = 10^\circ$
 Результаты измерений, выполненных с дискретностью 1 метр, представлены в таблице №1.

Таблица № 1

ЯРКОСТЬ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (ПОР)

Дальность (м)	Яркость ПОР (кд/м ²)		
	Угол засветки осветителя $\theta = 80^\circ$	Угол засветки осветителя $\theta = 40^\circ$	Угол засветки осветителя $\theta = 10^\circ$
0	$2,774 \cdot 10^4$	$4,250 \cdot 10^4$	$1,573 \cdot 10^5$
1	$1,191 \cdot 10^4$	$6,056 \cdot 10^3$	$4,746 \cdot 10$
2	$5,117 \cdot 10^3$	$8,629 \cdot 10^2$	$0,140 \cdot 10^{-1}$
3	$2,198 \cdot 10^3$	$1,230 \cdot 10^2$	$4,320 \cdot 10^{-6}$
4	$9,438 \cdot 10^2$	$1,752 \cdot 10$	$1,303 \cdot 10^{-9}$
5	$4,053 \cdot 10^2$	$0,249 \cdot 10$	$3,931 \cdot 10^{-13}$
6	$1,741 \cdot 10^2$	$3,560 \cdot 10^{-1}$	0
7	$7,476 \cdot 10$	$0,510 \cdot 10^{-1}$	0
8	$3,211 \cdot 10$	$0,722 \cdot 10^{-2}$	0
9	$1,379 \cdot 10$	$0,103 \cdot 10^{-2}$	0
10	$0,592 \cdot 10$	$0,147 \cdot 10^{-3}$	0

Из таблицы следует, что уменьшение угла засветки с 80° до 10° уже на расстоянии 1 метр приводит к снижению яркости ПОР на три порядка. С расстояния 3 метра негативное влияние вуалирующей дымки на телевизионное изображение можно практически не учитывать. Сказанное объясняется тем, что в образовании ПОР, снижающей контраст изображения, участвует

весь объем воды, освещенной источником света в пределах конуса зрения.

Поэтому, одним из путей снижения мешающего воздействия обратного рассеяния света может быть уменьшение освещенного конуса зрения в объеме воды, что возможно достигнуть сужением угла засветки осветителя - рисунок 7):

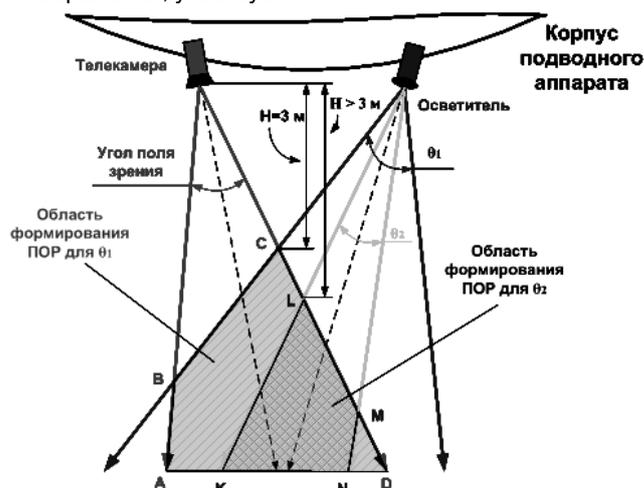


Рис. 7 - Уменьшение влияния вуалирующей дымки достигнуто за счет снижения угла засветки осветителя.
 H – расстояние от телекамеры до границы начала образования ПОР для выбранного угла засветки; θ_1, θ_2 – углы засветки осветителя.

На рисунке 7 построена лучевая картина, не учитывающая процесс рассеяния света за

пределами двух граничных лучей, разделяющих зоны засветки осветителя при различных θ .

Поэтому графическое представление процесса на рисунке 7 надо воспринимать с определенным допущением.

Изложенное справедливо и для разнесения осветителя и телекамеры на ПА, однако, из-за малых размеров ПА эффективность метода невысока.

Заключение

Расчетные материалы определяют пути снижения ПОР:

первый из них - снижение углов засветки осветителей. Метод практичен, так как позволяет реализовать его индивидуально для любых ПА с учетом их реальных размеров. Учитывая то, что расчеты проводились для светильников типа «Коралл», применяемых при проведении поисковых мероприятий на ПА, их результаты могут быть рекомендованы для внедрения в проектных специализированных конструкторских бюро.

второй путь - подавление влияния обратного рассеяния обеспечивается применением на ПА лазерных осветителей. (ЛО). Достижения квантовой электроники позволяют применить такие способы, как:

а) способ стробирования излучения с отсечкой помехи обратного рассеяния;

б) способ поляризационной дискриминации;

в) способ сканирования по строке поля засветки ЛО и совмещенного с ним поля зрения телекамеры. Способ получил название «бегущий луч».

С точки зрения авторов, наиболее практичным является способ поляризационной дискриминации, как экономичный, недорогой и доступный в реализации.

Таким образом, исследование влияния вуализирующей дымки на дальность видимости в воде показало, что задача борьбы с ПОР выполнима, ее решение носит комплексный характер, требующий реализации ряда мер.

С учетом сказанного, необходимо провести исследование по возможному ограничению $B_{\delta}(D)$ за счет уменьшения поля зрения телекамеры. Научное решение этой задачи, ее реализация в совокупности с другими мерами обеспечат рост дальности видимости телевизионных средств ПА. Это увеличит расстояние ГА до грунта и, как следствие, эффективность эксплуатации ИПС возрастет.

Литература

1. О.А.Соколов. Видимость под водой. – Л.: Гидрометеиздат, 1974 – 221с.
2. Г.Н.Грязин. Системы прикладного телевидения. – СПб.: Политехника, 2000 – 159с.
3. В.Л.Мартынов. О влиянии разрешающей способности на контраст изображения// Вопросы оборонной техники. 2007. Сер.16. Вып. 9-10.
4. В.Л.Мартынов. Расчет дальности видения подводных телевизионных систем// Научно-технический журнал «Вопросы оборонной техники». 2007. Сер.16. Вып. 11-12.

References

1. Sokolov O.A. Vidimost' pod vodoy [Underwater visibility]. Leningrad, Gidrometeizdat, 1974. 221p.
2. Gryazin G.N. Sistemy prikladnogo televideniya. [Applied television systems]. Saint-Petersburg, Politekhnik, 2000. 159 p.
3. Martynov V.L. (2007). O vliyaniy razreshayushchey sposobnosti na kontrast izobrazheniya. Voprosy oboronnoy tekhniki, 9, 45-50.
4. Martynov V.L. (2007) Raschet dal'nosti videniya podvodnykh televizionnykh system. Voprosy oboronnoy tekhniki, 11, 37-43.

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.891; 658.588; 658.51; 658.562

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**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

профессор кафедры Корабельных систем управления
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Илья Владимирович Степанов

кандидат технических наук, доцент, начальник отдела информационных технологий
и разработки СМИС ООО «Научно-технический центр «Технологии и безопасности»,
197198, Санкт-Петербург, ул. Зверинская 22, лит. А
телефон +7 (981) 765-43-00, e-mail: ilstep@mail.ru

Сергей Николаевич Турусов

доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Всероссийский научно-исследовательский
проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения»
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 2
телефон +7 (921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru

Николай Васильевич Никитин

д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Аннотация

В работе исследуется возможность применения инструментов анализа рисков в системах поддержки принятия решений на примере трех инструментов: исследование опасности и работоспособности (HAZOP), анализ видов и последствий отказов (FMEA), анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie).

Ключевым элементом системы поддержки принятия решения являются решающие правила, для создания которых используются производственные модели различных типов. На примере рассмотрена технология построения производственных правил с использованием результатов исследования рисков, полученных с помощью таких инструментов как HAZOP, FMEA, «Галстук-Бабочка». Показано, что совместное использование инструментов анализа риска может дать синергетический эффект и позволяет повысить результативность систем, решающих задачи обеспечения безопасности, предупреждения и локализации аварийных ситуаций.

Предложенный в работе подход создает условия для разработки прикладных систем поддержки принятия решений, которые реализуют управление на основе рисков, что позволяет практически реализовать концепции риск-ориентированного управления в различных областях: в надзорной деятельности, в сфере транспортной, промышленной и экологической безопасности.

Ключевые слова система поддержки принятия решений, решающее правило, принятие решений, анализ риска, метод HAZOP, метод FMEA, метод «Галстук-Бабочка».

USING RISK ANALYSIS TOOLS TO CREATE DECISION RULES FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS**Dmitry A. Skorokhodov**

Dr.Sci.Tech, Professor of

the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 12 line, 13 tel. : 8 (812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

Professor of the Ship Management Systems Department

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin),
197376, Russia, St. Petersburg, Professora Popova street, 5
tel. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Ilya V. Stepanov

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies and SMIS Development LLC "Scientific and Technical Center "Technology and Security", 197198, St. Petersburg, st.

Zverinskaya 22, lit. A
+7 (981) 765-43-00, e-mail: eglushko2006@mail.ru

Sergey N. Turusov

Dr.Sci.Tech, Professor, General Director of All-Russian Research, Design and Technological Institute of Electrical Engineering, 196105, St. Petersburg, st. Blagodatnaya, 2
tel.: +7 (921) 752-65-44, e-mail: serniktur@yandex.ru

Nikolay V. Nikitin

DScTech, Professor,
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Abstract

The paper explores the possibility of using risk analysis tools in decision support systems applying three tools as an example: hazard and operability research (HAZOP), failure modes and effects analysis (FMEA), "Bow tie" analysis (Bow-Tie).

The key element of the decision support system is decision rules, for creation of which production models of various types are used. The technology of building production rules is reviewed as an example using the results of risk research obtained using such tools as HAZOP, FMEA, "Bow-Tie". It is shown that sharing risk analysis tools can give a synergistic effect and can improve the performance of systems that solve the problems of ensuring safety, warning and localization of emergency situations.

The proposed approach creates the conditions for developing application-based decision support systems that implement risk-based management, which makes it possible to practically implement the concept of risk-oriented management in various areas: in supervisory activities, in transport, industrial and environmental safety.

Key words decision support system, decision rule, decision making, risk analysis, HAZOP method, FMEA method, "Bow-Tie" method.

Введение

Принятие решений по предупреждению и локализации аварийных ситуаций, обеспечению безопасности в общем случае является неординарной и сложной задачей. Это обусловлено, во-первых, высокой неопределенностью, обусловленной неполной априорной информацией об объекте принятия решения (ОПР) и протекающих в нем процессах, а, во-вторых, жесткими ресурсными ограничениями, обусловленными рисками того, что временных, человеческих, информационных или материальных ресурсов, необходимых для обеспечения безопасности, не хватит для выработки и реализации управляющих решений. Например, к ресурсным ограничениям относятся: время реагирования, запасы энергии (электрическая мощность, воздух, пар и т.п.), запасы материальных средств (средства пожаротушения, средства защиты, инструменты и т.п.).

Таким образом, процесс принятия решений по обеспечению безопасности является высоко рискованной процедурой. Одним из инструментов снижения неопределенностей и рисков принятия решений является автоматизация процесса принятия решений, которая реализуется в форме создания систем поддержки принятия решений (СППР). Несмотря на большое число исследований в области создания СППР, процесс создания моделей и алгоритмов принятия решений остается наиболее слабым местом таких систем. Особенно ярко это проявляется в случаях, когда множество состояний ОПР не является заранее известным конечным множеством, а сам процесс принятия решений обладает неопределенностью.

В этой ситуации применение традиционных алгоритмов поиска решений создает опасность

возникновения ошибок первого и второго рода, а также выбора некорректных или неадекватных состояний ОПР.

1. Оценка возможности применения инструментов анализа риска в СППР

В отечественной практике решения задач обеспечения промышленной и пожарной безопасности уже достаточно длительное время используются различные методы исследования рисков, а также их комбинации. Опыт применения различных инструментов анализа рисков нашел свое отражение в международном стандарте ISO 31010 и его Российском аналоге ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 [1], которые представляют собой справочник по основным инструментам исследования рисков.

Изучение опыта практического использования инструментов исследования рисков позволяет утверждать, что некоторые из них могут служить основой для создания СППР, решающих задачи предупреждения и локализации аварийных ситуаций, обеспечения безопасности.

В частности, особое внимание следует обратить на следующие инструменты:

- 1) Исследование опасности и работоспособности (HAZOP) [1, 2];
- 2) Анализ видов и последствий отказов (FMEA) [1, 3, 4];
- 3) Анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie) [1].

При этом, необходимо отметить, что непосредственно сами вышеуказанные инструменты для создания СППР не пригодны. Это связано с тем, что поиск возможных решений и получение, как качественных, так и количественных оценок риска выполняется командой квалифицированных экспертов, а основным методом поиска решений является «мозговой штурм», который практически не дает возможности формализации процесса выработки решений.

Таким образом, применение собственно вышеперечисленных методов исследования риска в интересах создания СППР является мало эффективным, что обусловлено слабой возможностью алгоритмизации и автоматизации процессов поиска решений.

Несмотря на различия в объектах анализа и технологии исследования рисков, все вышеназванные методы исследования риска имеют ряд общих ключевых этапов, к которым относятся:

- 1) Идентификация опасности.
- 2) Определение опасных событий.
- 3) Поиск и описание причин опасных событий.
- 4) Описание сценариев развития опасности и возможных последствий возникновения опасных событий.
- 5) Оценка критичности последствий и уровня риска.

6) Разработка рекомендаций (мер защиты или барьеров безопасности) по снижению риска за счет снижения вероятности реализации причин опасного события и/или снижение тяжести ущерба от реализации опасного события.

Здесь и далее под *опасностью* понимается источник потенциального вреда, а под *опасным событием*, такое событие, которое может причинить вред.

Обобщенный подход к исследованию рисков можно проиллюстрировать с помощью диаграммы «Галстук-Бабочка» [1], приведенной на рис. 1. На диаграмме цифрами указаны вышеперечисленные обобщенные этапы анализа риска.



Рис. 1. Диаграмма «Галстук-Бабочка»

Важной особенностью всех перечисленных инструментов анализа риска является то, что результаты, полученные при исследовании рисков, как правило обладают совокупностью свойств, которые делают их пригодными для применения в СППР:

1) Результаты исследования рисков, как правило, хорошо структурированы и представлены в форме унифицированных таблиц, диаграмм, которые хорошо подходят для автоматизированной обработки.

2) Результаты идентификации опасностей и опасных событий, описание причин опасных событий, как правило, четко формализованы и могут служить критериями, используемыми для идентификации событий и состояний в СППР;

3) Причинно-следственные связи, описывающие возможные сценарии развития

формирования и реализации опасности могут быть с минимальными затратами преобразованы в семантические сети, которые затем могут применяться в СППР для решения задач оценки состояния, прогнозирования и поиска решений по обеспечению безопасности.

С учетом сказанного, а также с учетом достоинств и недостатков вышеназванных инструментов исследования риска, в дальнейшем рассмотрим только те методы, которые представляют наибольший интерес для использования их при принятии решений по обеспечению безопасности: HAZOP, HАССР, FMEA и «Галстук-бабочка».

2. Основные этапы принятия решений по обеспечению безопасности

В общем случае процедуру принятия решений можно представить в виде совокупности ряда последовательно выполняемых этапов, каждый из которых обеспечивает решение части задач, позволяющих найти управляющие решения [5-7]:

- сбор и первичная обработка данных;
- оценка текущего состояния объекта принятия решений (ОПР);
- классификация и распознавание ситуаций;
- поиск решений (формирование множества допустимых решений);
- оптимизация множества допустимых решений по установленным критериям;
- преобразование решений в набор управляющих воздействий и принятие окончательного заключения о допустимости и оптимальности найденного решения;
- контроль исполнения решений.

Для описания процесса принятия решений может быть использована комбинированная модель принятия решений [5, 7], ключевым элементом которой является совокупность решающих правил (SR), обеспечивающих формирование множества допустимых управляющих решений.

Решающее правило SR выполняет классификацию и распознавание ситуаций в ОПР, а также формирует множество решений, допустимых для текущей ситуации, реализация которых позволяет перевести ОПР в состояние, соответствующее установленным целевым функциям [6].

Опыт проектирования систем информационной поддержки [5, 6] показывает, что в большинстве случаев в основе решающих правил лежат продукционные правила вида:

$$i = \langle Q; P, A \rightarrow B; N \rangle, \quad (1)$$

где i – имя продукции, Q – описание класса ситуаций, P – условие активизации продукции, $A \rightarrow B$ – ядро продукции, N – постусловие продукционного правила.

В зависимости от особенностей процесса принятия решений могут использоваться следующие типы продукционных правил [5]:

- 1) Правила, описывающие решение задачи принятия в форме алгоритма решения задачи.
- 2) Правила, описывающие поиск логического вывода заключений в форме правил порождения алгоритмов или логических выводов.

Таким образом, пригодным для применения при создании СППР по обеспечению безопасности являются те методы, которые позволят получить структурированное описание процесса возникновения и реализации опасности, а также сформировать производственные правила, которые могут быть применены для решения задач поиска решений по обеспечению безопасности.

3. Применение результатов анализа рисков при принятии решений по обеспечению безопасности

Рассмотрим возможности и границы применения методов HAZOP, FMEA и «Галстук-бабочка» в интересах создания решающих правил для СППР.

3.1 Метод HAZOP

Инструмент HAZOP [1, 2] позволяет сформировать семантические описания следующего вида: «Отклонение – Причина – Барьеры (меры защиты, рекомендации) – Опасное событие (последствия для безопасности, окружающей среды или эксплуатации) – Риск опасного события».

В случае, если при формулировании описания были четко определены критерии для каждого фрейма, то такая цепочка может основой для создания производственного правила второго типа, которое позволит:

- выработать рекомендации по предупреждению возникновения потенциально опасных событий;
- угрозу эскалации рисков возникновения опасных событий в случае отказа барьеров защиты.

В качестве демонстрации технологии формирования решающего правила с использованием метода HAZOP рассмотрим принципиальную технологическую схему блока сырьевых насосов, приведенную на рис. 2.

Сырьевые насосы P-1002/1 и P-1002/2 перекачивают бензиновую фракцию (б.ф.). Расход сырья на выходе блока регулируется клапан FV-1006 через прибор FRCA-1006. На выходе блока предусмотрена электрораздвижка UV-1003.

Рассмотрим одно из потенциальных отклонений в блоке сырьевых насосов: нет потока (отсутствует расход) сырья на выходе блока. Указанное отклонение рассматривается при условии того, что в работе находится хотя бы один насос из двух.

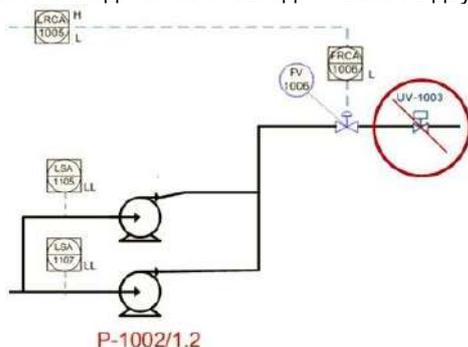


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема блока сырьевых насосов

На рис. 3 приведены результаты исследования HAZOP (группа «Фрейм»), взятые из соответствующих таблиц исследования [2], и сформулированное на основании данных HAZOP, производственное (решающее) правило.

Фрейм			
Отклонение (Q)	Причина	Барьеры	Последствие
Отсутствует расход сырья на выходе блока (Поток-Отсутствие)	Закрытие UV-1003	Сигнализация положения UV-1003	Работа насоса P-1002 на упор → Разгерметизация насоса P-1002 → Выброс бензиновой фракции в объем насосной
	Отказ FV-1006 в закрытом положении	Сигнализация расхода FRCA-1006	
Производственное правило			
Условие (P)	Состояние (A)	Угроза (B)	Решение (N)
Расход по прибору FRCA-1006 равен 0	Работа насоса на упор	Разгерметизация насоса с выбросом бензиновой фракции в объем насосной	1) Остановить насос P-1002. 2) Проверить состояние UV-1003 и FV-1006

Рис. 3. Построение решающего правила на основании результатов HAZOP

Буквами Q, P, A, B и N на рисунке 3 обозначены соответствующие компоненты решающего правила (1).

Основным ограничением метода является то, что он ориентирован только на исследование цепочки «Причина – Опасное событие», но не рассматривает цепочку «Опасное событие – Последствие». То есть метод HAZOP рассматривает только левую часть диаграммы «Галстук-Бабочка», представленной на рис. 1. Таким образом, результаты метода могут быть использованы только для решения частной задачи – предупреждения возникновения опасных событий, но не позволяют самостоятельно решить задачу обеспечения безопасности в целом.

3.2 Метод «Галстук-Бабочка»

Инструмент «Галстук-Бабочка» [1] ориентирован на упрощенное графическое представление причинно-следственных связей возникновения и реализации опасностей, и делает основной акцент на исследовании мер защиты (барьеров), позволяющих снизить вероятность реализации опасного события (предупреждающие барьеры), а также снизить ущерб от опасного события если оно уже произошло (барьеры локализации).

Метод позволяет сформировать семантические описания следующего вида: «Опасность – Причина – Барьеры предупреждения – Опасное событие – Барьеры локализации – Последствие – Риск». Это означает, что метод «Галстук-Бабочка» реализует полную задачу принятия решений в части безопасности, учитывая, как причины, так и возможные последствия возникновения опасного события.

Для сравнения с методом HAZOP, на рис. 4 приведен результат исследования риска блока сырьевых насосов (см. рис. 2) с использованием инструмента «Галстук-Бабочка». Цифрами обозначены барьеры защиты:

- а) предупреждающие барьеры: **1** – Сигнализация положения отсекавателя UV-1003, **2** – Сигнализация падения расхода по прибору FRCA-1006, **3** – планово-предупредительные осмотры (ППО) и ремонты (ППР);

- б) барьеры локализации: **4** – Система обнаружения загазованности в помещении насосной, **5** – Система пенного пожаротушения в насосной.

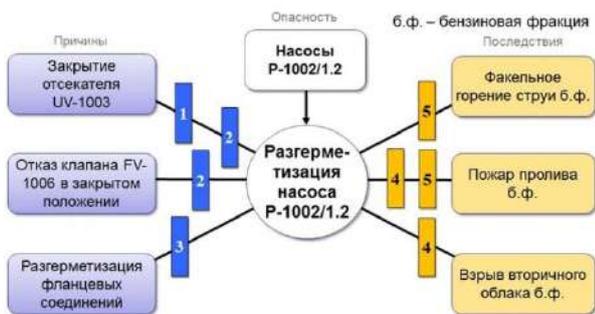


Рис. 4. Диаграмма «Галстук-Бабочка» для опасного события «Разгерметизация насоса»

В СППР диаграмма «Галстук-Бабочка» кроме описания причинно-следственных связей может быть использована также для визуального отображения:

- событий, отказов и отклонений, в том числе событий, связанных с проявлением причин опасных событий, срабатыванием барьеров защиты и нарушением их работоспособности;
- фактов возникновения опасных событий, последствий;
- уровня опасности (риска).

Метод «Галстук-Бабочка» позволяет расширять диаграмму, вводя в нее дополнительно факторы эскалации (усиления) риска, а также меры контроля, позволяющие учесть и компенсировать возникновение факторов эскалации.

Например, для барьера 1 на рис. 4 фактором эскалации может являться отказ барьера, в результате которого, возникнет неопределенность в оценке текущего состояния положения обтекателя UV-1003 (открыт/закрыт), что может способствовать возникновению соответствующих угроз (см. рис. 5).

	Условие (P)	Состояние (A)	Угроза (B)	Решение (N)
1	Срабатывание сигнализации о закрытии отсекателя UV-1003 при разгерметизации насоса P-1002	Работа насоса на упор	Разгерметизация насоса с выбросом бензиновой фракции в объем насосной	Остановить насос P-1002, открыть отсекатель
1	Отказ (отсутствие данных) сигнализатора положения отсекателя UV-1003	Отсутствие данных о положении отсекателя UV-1003	1) Возможность неконтролируемого закрытия отсекателя UV-1003 2) Возможность работы насоса P-1002 на упор	1) Контроль наличия риска в трубопроводе за насосом по прибору FRCAL-1006 2) Восстановление работоспособности сигнализатора положения отсекателя UV-1003
4	Срабатывание системы обнаружения загазованности (СОЗ) в насосной по уровню 20% НКПР	Наличие загазованности в насосной, разгерметизация оборудования	Опасность формирования в насосной облаке бензиновой фракции с последующим взрывом, взрывом или пожаром	1) Остановка насосного оборудования 2) Вызовение систем противопожарной защиты насосной 3) Поиск причин наличия загазованности
4	Отказ (отсутствие данных) системы обнаружения загазованности (СОЗ)	Отсутствие данных о загазованности в насосной	Возможность неконтролируемой разгерметизации оборудования с выбросом в объем насосной бензиновой фракции	1) Ввод в насосную в СЕЗ 2) Ручной контроль загазованности в насосной 3) Проверка и восстановление работоспособности сигнализатора загазованности

Рис. 5. Построение решающего правила на основании результатов исследования методом «Галстук-Бабочка»

На рис. 5 приведены четыре решающих правила. Из них, первые два относятся к барьеру 1, который решает задачи предупреждения возникновения опасного события «Разгерметизация насоса...», и описывают два потенциальных состояния сигнализатора положения:

- срабатывание сигнализации о закрытии отсекателя, что является нормальным срабатыванием барьера защиты и сигнализирует

лицу, принимающему решения (ЛПР) о переходе ОПР в потенциально опасное состояние с угрозой возникновения опасного события;

- отказ сигнализатора или отсутствие актуальных данных о его состоянии в АСУ ТП, что является признаком нарушения работоспособности барьера.

Вторые два решающих правила относятся к барьеру 4, который решает задачи минимизации последствий уже возникшего опасного события «Разгерметизация насоса...»:

- срабатывание системы обнаружения загазованности (СОЗ), является нормальным срабатыванием барьера защиты и требует немедленного вмешательства ЛПР, для минимизации возможных последствий опасного события;
- отказ СОЗ или наличие неадекватных данных (например, значение загазованности меньше нуля), является признаком нарушения работоспособности барьера защиты и является фактором эскалации опасного события и увеличения риска.

Буквами P, A, B и N на рис. 5 обозначены компоненты решающего правила (1). Таким образом, результаты исследования рисков методом «Галстук-Бабочка» в форме диаграмм и таблиц являются хорошей основой для формирования решающих правил, а также визуализации событий, происходящих в ОПР, что позволяет построить удобную для ЛПР и эффективную с точки зрения представления информации СППР.

3.3 Метод FMEA

Инструмент FMEA [3] направлен на выявление наиболее критичных операций (потенциальных ошибок) в технологическом процессе и ориентирован на выявление операционных отказов, обусловленных недостатками конструкции изделия и технологического процесса производства.

Особенностью метода FMEA по сравнению с HAZOP является то, что FMEA используется для идентификации возможных способов отказа компонентов, систем или процессов, которые могут привести к невыполнению их основной функции. При этом ключевое отличие от HAZOP заключается в том, что для рассматриваемого объекта идентифицируются все возможные виды отказов, а затем начинается исследование причин их возникновения.

Метод позволяет сформировать семантические описания следующего вида: «Опасность – Операция (процесс) – Вид потенциального отказа – Последствие отказа (опасное событие) – Причина – Барьеры по предотвращению (для каждой причины) – Барьеры по обнаружению (для каждой причины) – Барьеры локализации – Риск».

При этом, в процессе создания детализированного описания ОПР, для каждой технологической операции анализируются конструктивные особенности процесс, его технология, причины возникновения изменчивости, влияющие на достижение ожидаемых результатов каждой операции. В результате такого анализа

формируются семантические цепочки следующего вида: «Операция (процесс) → Метрологическая характеристика → Отклонение метрологической характеристики → Отклонение (несоответствие) операции (процесса) → Опасность (отказ, риск)».

По итогам проведенного анализа оценивается результативность и качество процессов, определяются контрольные признаки или несоответствия, которые приводят к ухудшению качества или создают возможность возникновения опасного события и негативных последствий.

На основании разработанных рекомендаций FMEA [3, 8] разрабатывается план управления [8], который представляет собой краткое формализованное описание технологии формирования показателя качества и безопасности ОПР. План управления включает в себя:

- измеряемые характеристики и установленные к ним требования;
- методы измерений, частота и объем выборки данных;
- метод управления, определяющий организацию контроля и управления ОПР для достижения требуемых характеристик;
- план реагирования [8], определяющий порядок действий, выполняемых при обнаружении отказов и несоответствий.

Планы управления и реагирования представляют собой хорошо структурированные документы, которые могут быть эффективно использованы для создания решающих правил. При этом, общая технология создания решающих правил аналогична описанной в разделах 3.1 и 3.2.

Необходимо отметить следующие специфические особенности метода FMEA:

- 1) Метод не ставит фокус на понятии опасного события, а ориентирован на выявление последствий различных отказов. При этом, формулировка последствий является расплывчатой, в качестве последствий могут выступать как «Опасные события», так и «Последствия» (см. рисунок 1).

В целом метод FMEA, также, как и HAZOP, в основном ориентирован на анализ левой части диаграммы «Галстук-Бабочка» (см. рисунок 1 и 4) от причин до возникновения опасного для ОПР события.

2) Важной особенностью метода является то, что он делает акцент на поиск возможностей обнаружения потенциальных отказов, что создает возможность создания дополнительных предупреждающих барьеров и создает условия для снижения вероятности возникновения как причин, так и последствий отказов.

Заключение

Кроме рассмотренных выше инструментов при создании решающих правил давно и эффективно используются различные виды деревьев, например, дерево неисправностей (FTA) и событий (ETA) [1], а также комбинированные составные деревья [6].

Применение инструментов HAZOP, FMEA и «Галстук-бабочка» в интересах создания решающих правил для СППР позволяет:

- повысить эффективность процесса разработки СППР;
- получить наиболее точное и достоверное описание процесса принятия решений по обеспечению безопасности;
- получить синергетический эффект за счет совместного применения результатов исследования рисков различными методами и использования достоинств каждого из применяемых инструментов.

Предложенный в работе подход создает условия для разработки прикладных СППР, реализующих управление на основе рисков, и позволяет практически реализовать концепции риск-ориентированного управления в различных областях деятельности, в том числе, в надзорной деятельности, а также в сфере транспортной, промышленной и экологической безопасности.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска.
2. ГОСТ Р 51901.11-2005. Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство.
3. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
4. ГОСТ Р 51814.2-2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов.
5. Латынцева С. В., Степанов И. В., Турусов С. Н. Принятие решений по предупреждению и ликвидации аварий в условиях неопределенности //Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XVIII Всерос. научно-практической конф. РАРАН /ВМА, 1-4 апреля 2015 г. –М.: ФГБУ «РАРАН», 2015. Т. 2. С. 441-451.
6. Турусов С.Н., Степанов И.В., Скороходов Д.А. Системы управления готовностью технических средств морских подвижных объектов /под общей ред. д-ра. техн. наук., проф. С.Н.Турусова. –СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019.
7. Степанов И.В., Турусов С.Н., Шапошников С.О. Методы принятия решений в системах информационной поддержки управления эксплуатацией технических средств корабля //Тр. II Междунар. конф. и выставки по морским информационным технологиям (МОРИНТЕХ-97), г. Санкт-Петербург, 10-13 сент. 1997 г. -СПб., 1997. -Т. 3. -С. 53-57.
8. ГОСТ Р 51814.6-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов.

References

1. GOST R ISO/M·EK 31010-2011. Menedzhment riska. Metody otsenki riska.
2. GOST R 51901.11-2005. Menedzhment riska. Issledovaniye opasnosti i rabotosposobnosti. Prikladnoye rukovodstvo.
3. GOST R 51901.12-2007. Menedzhment riska. Metod analiza vidov i posledstviy otkazov.
4. GOST R 51814.2-2001 Sistemy kachestva v avtomobilestroyenii. Metod analiza vidov i posledstviy potentsial'nykh defektov.
5. Latyntseva S. V., Stepanov I. V., Turusov S. N. Prinyatiye resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii avariy v usloviyakh neopredelennosti; Aktual'nyye problemy zashchity i bezopasnosti (Trudy XVIII Vseros. nauchno-prakticheskoy konf. RARAN; VMA, 1-4 aprelya 2015 g.) M.: FGBU «RARAN», 2015. T. 2. S. 441-451.
6. Turusov S.N., Stepanov I.V., Skorokhodov D.A. Sistemy upravleniya gotovnost'yu tekhnicheskikh sredstv morskikh podvizhnykh ob"yektov; pod obshchey red. d-ra. tekhn. nauk., prof. S.N.Turusova; SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, 2019.
7. Stepanov I.V., Turusov S.N., SHaposhnikov S.O. Metody prinyatiya resheniy v sistemakh informatsionnoy podderzhki upravleniya ekspluatatsiyey tekhnicheskikh sredstv korablya (Tr. II Mezhdunar. konf. i vystavki po morskim informatsionnym tekhnologiyam (MORINTEKH-97), Sankt-Peterburg, 10-13 sent. 1997 g.); SPb., 1997. - T. 3. -S. 53-57.
8. GOST R 51814.6-2005 Sistemy menedzhmenta kachestva v avtomobilestroyenii. Menedzhment kachestva pri planirovanii, razrabotke i podgotovke proizvodstva avtomobil'nykh komponentov.

УДК 519.25, 004.93+ 621.397.13.037.372

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ СУДОВ

Шакиб Субхиевич Фахми

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

профессор кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53
Тел.: +7(812) 234-36-75
e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68
e-mail: shatillen@mail.ru

Святослав Александрович Селиверстов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

Кафедра компьютерных систем и программных технологий, Институт компьютерных наук и технологий
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21
Тел.: +7 (812) 297-16-28
e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Язид Абдулхамид Хасан

аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53
Тел.: +7(812) 234-36-75, e-mail: midocom@mail.ru

Наср Тарек Мохаммед Абдулджаббар

аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49
Тел.: +7 (812) 232-97-04, e-mail: tarek01021988@mail.ru

Александр Васильевич Иванов

доктор технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных транспортных систем
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68
e-mail: iptranspb@gmail.com

Аннотация

Составными модулями известных видеокодеров являются спектральное преобразование, компенсация движения и энтропийное кодирование, при этом модуль преобразования осуществляет удаление избыточности, которая существует в пространственной области видеопоследовательности. Дискретное косинусное преобразование является де-факто методом преобразования в существующих стандартах кодирования изображений и видео, таких как JPEG и MPEGx. Несмотря на то, что косинусное преобразование обладает очень хорошими свойствами энергосбережения и декорреляции, наличие артефактов считается его основным недостатком. Другим распространенным кодером является вейвлет, где изображение подвергается последовательному вейвлет преобразованию по строкам и по столбцам. В результате левая верхняя четверть результата является низкочастотной компонентой, а правая верхняя высокочастотной по горизонтали, левая нижняя высокочастотной по вертикали, а правая нижняя высокочастотной по диагонали. Недостатком вейвлет преобразования является высокая вычислительная сложность. Для преодоления указанных проблем в статье предлагается гибридный метод кодирования изображений морских судов путем включения косинусного преобразования в качестве метода преобразования для межкадровых и комбинации вейвлет-фильтров для внутрикадровых видеопоследовательностей. Предлагаемый метод использует преимущества обоих подходов, что эффективно уменьшает ложные контуры и блокирует артикуляции. В данной работе гибридные алгоритмы оцениваются для различных изображений

путем сравнения в терминах среднеквадратичной ошибки, отношения пикового сигнала к шуму, дисперсии, индекса структурного подобия и среднего индекса структурного подобия.

Ключевые слова: Изображения морских судов, косинусное преобразование, вейвлет, гибридный метод сжатия, декорреляция.

HYBRID CONVERSION METHOD OF SEA-GOING SHIP IMAGES

Shakib S. Fahmi

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Senior Research Scientist
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel.: +7 (921) 321-95-68

Professor, Department of Computer Aided Design
of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)
197376, St. Petersburg, St. Professora Popova, house 5, building I, room 11-53
tel.: +7 (921) 234-36-75
e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalya V. Shatalova

PhD in Engineering Science, Senior Research Scientist
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel.: +7 (921) 321-95-68
e-mail: shatillen@mail.ru

Svyatoslav A. Seliverstov

PhD in Engineering Science, Senior Researcher
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel.: +7 (921) 321-95-68

Department of Computer Systems and Software Technologies, Institute of Computer Science and Technology
St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great,
194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 21;
tel.: +7 (921) 297-16-28
e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Yazid Abdulhamid Hassan

Postgraduate Student, Department of Computer Aided Design
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)
197376, St. Petersburg, St. Professora Popova, house 5, building I, room 11-53
tel.: +7 (812) 234-36-75, e-mail: Midocom@mail.ru

Nasr Tarek Mohammed Abduljabbar

Postgraduate Student, St. Petersburg National Research University of Information
Technology, Mechanics and Optics (ITMO)
197101, St. Petersburg, Kronverksky pr, 49
tel.: +7 (812) 232-97-04, e-mail: tarek01021988@mail.ru

Alexander V. Ivanov

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Laboratory of Intelligent Transport Systems
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel.: +7 (921) 321-95-68
e-mail: iptranspb@gmail.com

Abstract

The constituent modules of known video coders are spectral transform, motion compensation, and entropy coding, at that, the transform module removes the redundancy that exists in the spatial domain of the video sequence. Discrete cosine transform is the de facto conversion method in existing image and video coding standards, such as JPEG and MPEGx. Despite the fact that the cosine transform has very good energy saving and decorrelation properties, the presence of artifacts is considered to be its main drawback. Another common coder is wavelet, where the image is subjected to sequential wavelet transformation in rows and columns. As a result, the left upper quarter of the result is a low-frequency component, and the right upper is high-frequency component horizontally, the left lower one is high-frequency vertically, and the right lower one is high-frequency diagonally. The disadvantage of the wavelet transform is high computational complexity. To overcome these problems, the article proposes a hybrid method of encoding images of sea-going ships by including the cosine transform as a transform method for interframes and a combination of wavelet filters for intraframe video sequences. The proposed method takes advantage of both approaches, which effectively reduces false contours and blocks articulations. In this paper, hybrid algorithms are estimated for different images by comparing in terms of the root-mean-square error, peak signal-to-noise ratio, dispersion, structural similarity index, and average structural similarity index.

Key words: Images of sea-going ships, cosine transform, wavelet, hybrid compression method, decorrelation.

Введение

Проектирование интеллектуальных видеосистем наблюдения с целью передачи визуальных данных без шума и помех в реальном времени, безусловно, является необходимым и востребованным для решения проблем оперативного принятия решений в задачах обеспечения безопасности морских акваторий [1]. Однако основным препятствием для передачи видеоинформации в системах видеонаблюдения является ограниченная пропускная способность канала связи [2,3]. Недостаточная ширина канала ограничивает объем передаваемой информации, тем самым возрастает актуальность сжатия визуальных данных при сохранении качества.

Сжатие визуальных данных относится к процессу, в котором видеоинформация сжимается до требуемого размера, при сохранении качества на этапе восстановления результирующих изображений. Актуальность задачи сжатия обусловлена потребностью в экономии ресурсов путем сокращения объема памяти, предназначенной для хранения и затем передачи видеоинформации с учетом пропускной способности каналов связи.

Развитие цифровых камер привели к совершенствованию технологии захвата, хранения и обработки изображений. Однако процесс обмена или передачи этих изображений был основным препятствием при создании высокопроизводительных систем передачи видеоинформации в реальном времени. Кроме того, сохранение исходных видеоданных (сжатых изображений) для дальнейшей обработки сталкивается с такими проблемами, как размер оперативной памяти и эффективной среды обмена видеоданными с другими устройствами [4].

Известные стандарты такие, как JPEG, MPEG, H.264/AVC, H.265, JPEG2000 и др., основанные на учете корреляции видеоинформации и обеспечивающие большую гибкость в управлении битовой скоростью передачи с учетом заданных искажений и ограничений на вычислительную сложность в мультимедийных приложениях с сохранением приемлемого качества изображения. Для решения этих задач применяются различные способы спектрального преобразования изображения, основанные на учете статистических свойств сигнала.

Таким образом, сжатие изображения представляет собой наиболее актуальную задачу, при решении которой осуществляется уменьшение количества битов на пиксель, или другими словами минимизируется битовая скорость передачи видеоинформации по каналу связи [5]. Успешное сжатие и устранение избыточности изображения возможно только при наличии корреляции между пикселями изображения. А процесс кодирования источника изображений заключается в применении оптимальных кодовых слов и учете психовизуального человеческого зрения.

Существующие методы сжатия изображений и видео в основном базируются на применении известных стандартах спектрального Фурье преобразования и дискретного Вейвлет преобразования [6].

Важно отметить, что ухудшение качества восстановленных изображений вполне естественно из-за операций оцифровки и квантования исходного изображения, следовательно, несмотря на широкое развитие методов и технологий шумоподавления, сохранение текстуры, краев и мелких деталей остается открытой проблемой и требует тщательного исследования.

В данной работе предлагается гибридный метод и алгоритмы, основанные на сочетании двух выше указанных распространённых стандартов сжатия: дискретного косинусного и вейвлет преобразований. Приводится описание метода и выполняется тестирование программ для моделирования алгоритмов и оценки информационных показателей качества видеосистем наблюдения: среднеквадратичной ошибки (MSE), отношения пикового сигнала к шуму (PSNR), коэффициент дисперсии (CV), индекса структурного подобия (SSIM) и среднего индекса структурного подобия (MSSIM) [7].

В качестве исходных данных были взяты изображения из, предложенной в работе [1], компактной представительной выборки морских сюжетов.

1. Методы преобразования видеоинформации

В области сжатия сигнала "система сжатия" представляет собой преобразователь сигнала изображения в сжатый битовый поток на этапе кодирования (кодер) и восстанавливает сигнал из битового потока на этапе декодирования (декодер). Система сжатия изображений состоит из двух кодеков: кодер источника и кодер канала. Эффективность такой системы оценивается с точки зрения ошибки восстановления и скорости передачи видеоданных.

Существуют множество работ по преобразованию видеоинформации, где основной акцент дается на квантование и его влияние на ошибку восстановления [8,9]. Однако эти исследования представляют свои результаты в виде оценки MSE или коэффициента сжатия (CR), не учитывая при этом главную составляющую систем связи – пропускную способность канала.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили два подхода в решении задачи сжатия изображений, основанные на применении спектрального Фурье-преобразования и вейвлет – преобразований.

а) *Дискретное косинусное преобразование* (ДКП). ДКП представляет собой важный инструмент декорреляции из-за симметричности функции косинуса и осуществляет уплотнение энергии путем извлечения только необходимых трансформант частотной области сигнала. Другими словами, ДКП позволяет четко разделить исходное

изображение на две области – высокочастотную и низкочастотную [5].

В кодеке на основе ДКП-3D видеопоследовательность делится на несколько кубов $M \times N$, где $M \times N$ – это размеры матрицы пикселей изображения.

ДКП-2D представляется как:

а) для прямого ДКП-2D:

$$F(u,v) = \alpha(v,N)\alpha(w,M) \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{z=0}^{M-1} f(x,y) \cdot \frac{\cos(2x+1)v\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2y+1)w\pi}{2M}$$

где F – значение коэффициента прямого косинусного преобразования, x,y – координаты пикселя в трехмерном пространстве куба размером $M \times N$, v,w – координаты коэффициента

преобразования, $\alpha(i,j) = \begin{cases} \sqrt{1/j}, & \text{при } i = 0 \\ \sqrt{2/j}, & \text{при } i \neq 0 \end{cases}$

при этом j принимает значение M или N .

б) для обратного ДКП-2D определяется по формуле:

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \alpha(v,N)\alpha(w,M)F(v,w) \cos\left(\frac{(2m+1)v\pi}{2M}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)w\pi}{2N}\right)$$

где $f(x,y)$ – значение яркости пикселя с координатами (x,y) в пределах куба после обратного ДКП.

После выполнения ДКП исходного изображения, вся информация размещается в небольшом количестве в верхнем левом углу блока ДКП, где сконцентрированы низкочастотные коэффициенты, которые в последствии подвергаются адаптивному квантованию. Низкочастотные коэффициенты называются компонентами высокочастотной области, а остальные коэффициенты называются компонентами низкочастотной области. Используя таблицу квантования размером 8×8 , коэффициенты ДКП будут квантованы также как в стандарте JPEG.

Использование этих особенностей позволяет обоснованно избегать ненужных вычислений и тем самым существенно сократить вычислительную сложность процесса и, следовательно, требуемых ресурсов [10,11]:

Существуют определенные ограничения эффективного применения ДКП, такие как возникновение артефактов и высокого уровня ложной контурности. Искажение, подобных артефактов возникает из-за высокой степени сжатия и выглядит как большие пиксельные блоки. Ложная контурность обусловлена тем, что плавно коррелированная область по яркости была искажена и появляется в виде контурной карты для большинства изображений [12,13]. Основной причиной появления таких искажений является квантование коэффициентов ДКП и зависит от коэффициента сжатия визуальных данных.

Процесс кодирования изображений включает следующие основные этапы (рис. 1):

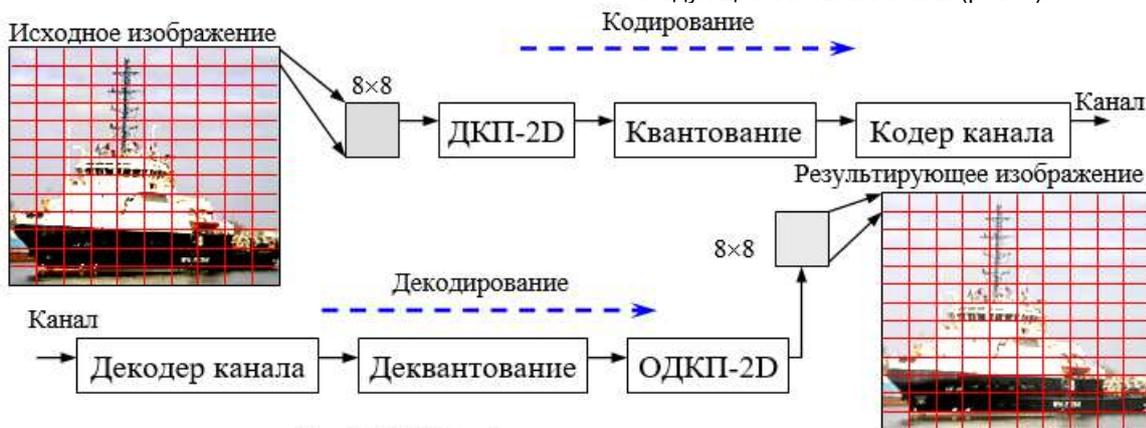


Рис. 1. ДКП-2D изображения морского судна

- 1) Разбиение исходного изображения на сегменты (или блоки) размером 8×8 ;
- 2) Выполнение ДКП;
- 3) Квантование коэффициентов ДКП;
- 4) Энтропийное кодирование.

Процесс декодирования включает: декодер канала, деквантование и обратное дискретное косинусное преобразование (ОДКП).

б) *Дискретное вейвлет преобразование*. Суть данного преобразования заключается в следующем. Исходное изображение разбивается на две части – высокочастотная (области резких перепадов яркости), и сглаженная, представляющая уменьшенную версию исходного

изображения. Это достигается использованием двух фильтров, при этом каждая из этих частей меньше в два раза, чем исходное изображение. Фильтры с конечным импульсным откликом, в которых пиксели, попавшие в небольшое «окно», умножаются на заданный набор коэффициентов, полученные значения суммируются, и окно сдвигается для расчета следующего значения на выходе [14].

ДВП указывает на визуальную информацию в виде суммы вейвлет-функции, характеризующие частотные свойства, различные местоположения и масштаба изображения [14]. ДВП представляет данные в виде набора высокочастотных

(детализированных) и низкочастотных (приближенных) коэффициентов (например, с помощью фильтра Хаара). Входные данные передаются через набор фильтров нижних и верхних частот. Выход высокочастотных и низкочастотных фильтров делим на 2. Фильтр

Хаара – это пара фильтров, разделяющих сигнал на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Чтобы получить исходный сигнал, нужно просто снова объединить эти составляющие (рис. 2).

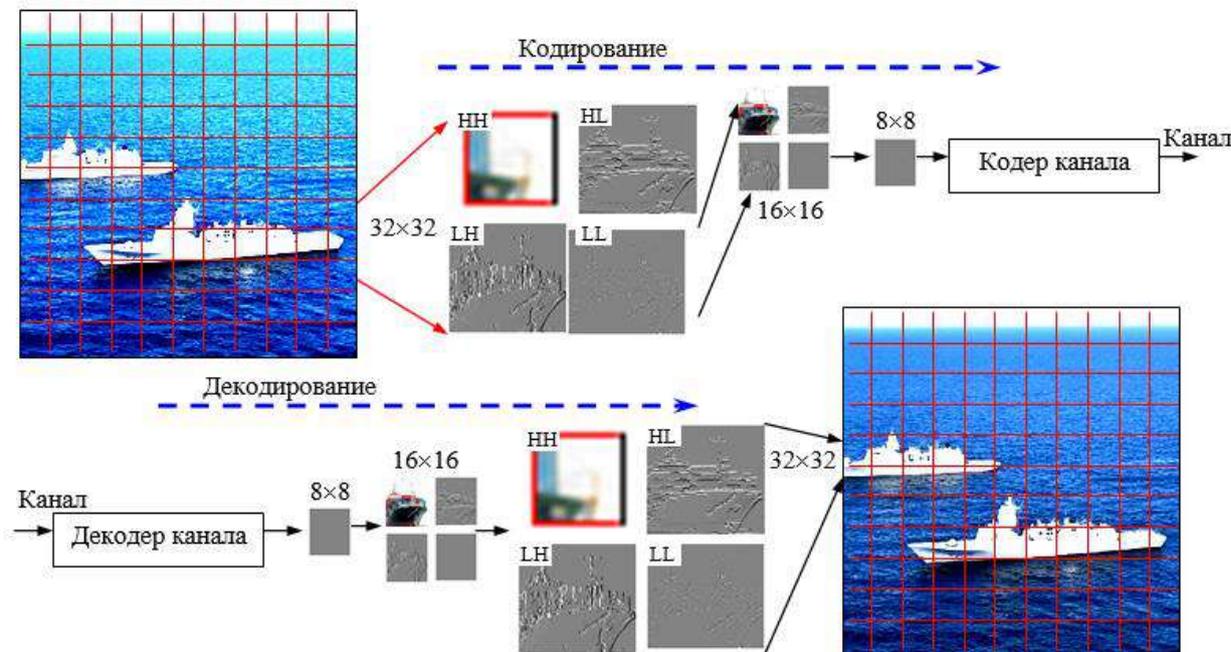


Рис. 2. Двух-уровневое вейвлет преобразование изображения морского судна

Процесс ДВП изображения осуществляется по следующим формулам:

$$HH_j(k,l) = \frac{1}{2} \sum_{x=0}^{2j-1-2k} \sum_{y=0}^{2j-1-2l} h'(2k-x)h'(2l-y)HH_{j-1}(x,y)$$

$$LH_j(k,l) = \frac{1}{2} \sum_{x=0}^{2j-1-2k} \sum_{y=0}^{2j-1-2l} gh(2k-x)h'(2l-y)HH_{j-1}(x,y),$$

$$HL_j(k,l) = \frac{1}{2} \sum_{x=0}^{2j-1-2k} \sum_{y=0}^{2j-1-2l} h'(2k-x)h(2l-y)HH_{j-1}(x,y),$$

$$LL_j(k,l) = \frac{1}{2} \sum_{x=0}^{2j-1-2k} \sum_{y=0}^{2j-1-2l} gh(2k-x)h(2l-y)HH_{j-1}(x,y),$$

$$x, y = 0, \dots, 2^j-1, k, l = 0, \dots, 2^{j-1}-1, j=0, \dots, J, L=2^j-1, h'(x)=h(L-x-1), g'(x)=g(L-x-1),$$

где j – степень разрешения; x и y – координаты пикселей изображения HH_{j-1} ; k, l – координаты пикселей изображений HH_j, LH_j, HL_j, LL_j ; $h(t), g(t)$ – импульсные характеристики пространственных фильтров [14]. По данным формулам осуществляется разбиение изображения HH_{j-1} на

четыре части, одно из которых, HH_j , содержит аппроксимацию исходного изображения HH_{j-1} с уменьшенным в два раза разрешением, а три других, LH_j, HL_j, LL_j , те детали изображения, которые не вошли в полученную аппроксимацию.

Импульсная характеристика фильтра $h(t)$ описывается вейвлетом Хаара $Fh(t)$, а импульсная характеристика фильтра $g(t)$ – масштабной функцией Хаара $Dh(t)$ [6]:

$$Fh(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ -1 & 1 \leq t < 2 \\ 0 & t < 0, t \geq 2 \end{cases} Dh(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & 1 \leq t < 2 \\ 0 & t < 0, t \geq 2 \end{cases}$$

Выбор таких функций обусловлен их негладкостью в смысле конечных разрывов, позволяющих лучше выделять области изображения, имеющие уровень яркости, отличающийся от уровня яркости граничащих с ним областей, то есть позволяет связывать пиксели в бинарные изображения.

Таким образом, в двумерном ДВП входные данные передавались через фильтр нижних частот и фильтр верхних частот в двух разных направлениях как в строке, так и в столбце. Выходы после этого делятся на два в каждом направлении. Полный процесс показан на рисунке 2.

Выход затем получается в виде четырех коэффициентов: LL, HL, LH и HH , где L

представляет сигнал низких частот, а H – сигнал высоких частот. ЛГ сигнал представляет собой низкочастотный сигнал в ряд и ДХ представляет собой высокий перевал в колонке. Сигнал LH состоит из горизонтальных элементов, HL и HH состоят из вертикальных и диагональных элементов соответственно.

При реконструкции ДВП входные данные могут быть получены путем разложения коэффициента LL для разных уровней в нескольких разрешениях [14]. Сжатые данные сравниваются в 2 раза для восстановления выходных данных. Затем сигнал передавался через один и тот же набор фильтров верхних и нижних частот как в строке, так и в столбце.

Процесс продолжается еще на одном уровне. Коэффициенты разделяются постоянным масштабирующим коэффициентом для получения желаемой степени сжатия.

Квантователь [5] просто уменьшает количество битов, необходимых для хранения преобразованных коэффициентов, уменьшая точность этих значений. Поскольку это сопоставление многих к одному, то это процесс с потерями является основным источником сжатия в кодере. Квантование может быть выполнено по каждому отдельному коэффициенту, который называется скалярным квантованием. Квантование также может быть выполнено на группе коэффициентов вместе, и это называется векторным квантованием.

Равномерное квантование – это процесс разбиения области входных значений на равные интервалы, за исключением внешних интервалов. Конечные точки интервалов разбиения называются границами решения квантователя. Выходное или восстановительное значение, соответствующее каждому интервалу, принимается за середину интервала. Длина каждого интервала называется размером шага (фиксированным в случае равномерного квантования), обозначаемого символом Δ . Размер шага Δ определяется: X_{\max}/M , где M – количество уровней квантователя, X_{\max} – максимальный диапазон входных видеоданных.

Наконец, для восстановления данных данные были масштабированы, дополнены нулями и направлены на вейвлет-фильтры.

Алгоритм ДКП, в отличие от вейвлетного, сжимает по отдельности каждый блок исходного изображения размером 8×8 пикселей. В результате при высоких степенях сжатия на восстановленном изображении может быть заметна блочная структура. При вейвлетном сжатии такой проблемы не возникает, но могут появляться искажения другого типа, имеющие вид «призрачной» ряби вблизи резких границ. Считается, что такие артефакты в среднем меньше бросаются в глаза наблюдателю, чем «квадратики», создаваемые ДКП.

2. Предлагаемый алгоритм гибридного кодирования изображений

Дискретное косинусное преобразование и дискретное вейвлет-преобразование используются для шумоподавления изображений. ДКП имеет свойства уплотнения энергии и характеризуется меньшей вычислительной сложностью, что

позволяет экономить ресурсы, в то время как ДВП требует больше ресурсов при вычислении, но позволяет получить восстановленные изображения более высокого качества.

Предлагаемые гибридные алгоритмы используют преимущества обоих алгоритмов ДКП и ДВП и, эффективно уменьшают ложные контурные и артефакты в результате сжатия изображений. В гибридном ДВП-ДКП алгоритмы разработаны таким образом, что подмножества обрабатываются с использованием ДКП, в то время как основной блок обрабатывается ДВП, как показано на рисунке 3.

Алгоритм гибридного ДВП-ДКП:

Стратегии суб-выборки гибридного метода, на основе выше указанных алгоритмов ДВП и ДКП для сжатия изображений морских судов могут быть описаны следующим образом:

1) прием видеоинформации со спутника ДЗЗ, беспилотника или вышек систем наблюдения;

2) первичная обработка и формирование сетки из сегментов для выполнения ДВП фиксация размера сетки в зависимости от степени локальных корреляций;

3) разбиение исходного изображения на блоки размером 32×32 и выполнение ДВП-2D над каждым блоком;

4) анализ полученных вейвлет-коэффициентов и выполнение вейвлет-преобразования второго уровня;

5) формирование блоков размером 8×8 ;

6) выполнение ДКП-2D над каждым блоком 8×8 и разделение блока на низкочастотную и высокочастотную области;

7) кодирование полученных коэффициентов ДВП и ДКП по Хаффману для передачи по каналу связи.

На этапе декодирования процесс повторяется, только в обратном порядке. В начале после декодера канала выполняется ОДКП-2D, а затем ОДВП-2D в результате которого восстанавливается результирующее изображение.

3. Результаты моделирования предложенного гибридного алгоритма

Изображение морских судов в основном является носителем информации об окружающей среде, и в зависимости от источника видеоинформации (спутник ДЗЗ, беспилотник или телевышка) можно четко выделить некоторые основные классы изображений морских судов (таблица):

изображения со спутника, где фон характеризуется гауссовским распределением с нулевым математическим ожиданием;

– изображения из беспилотника и фон состоит из двух областей (небо и море) и разделены линией горизонта;

– изображения из телевышки являются нестационарными и характеризуются сложными статистическими свойствами.

Изображения первых двух классов содержат сильно коррелирующие между собой локальные области. Следовательно, имеется огромное количество избыточности. Избыточность может быть пространственной, временной и спектральной. Первая представляет собой

нежелательные повторяющиеся данные в пределах кадра, которые необходимо удалить для минимизации размера изображения, вторая – для минимизации количества битов, используемых для представления изображения, а третья представляет собой корреляцию между различными цветовыми плоскостями.

Одним из наиболее используемых методов количественной оценки качества изображения является MSE. Это дает меру того, как пиксельно похожи два изображения. Правда, он не учитывает никакой структурной информации о них. В качестве

альтернативы, некоторые другие методы были предложены в области медицинского изображения [15,16]. Об ограничениях таких методов широко сообщается в литературе. В [17] Wang et al. предложен новый качественный (полный эталонный) метод оценки, основанный на структурном сходстве двух изображений $f_1(x,y)$ и $f_2(x,y)$. На сегодняшний день этот метод оказался универсальным и надежным во многих различных средах.

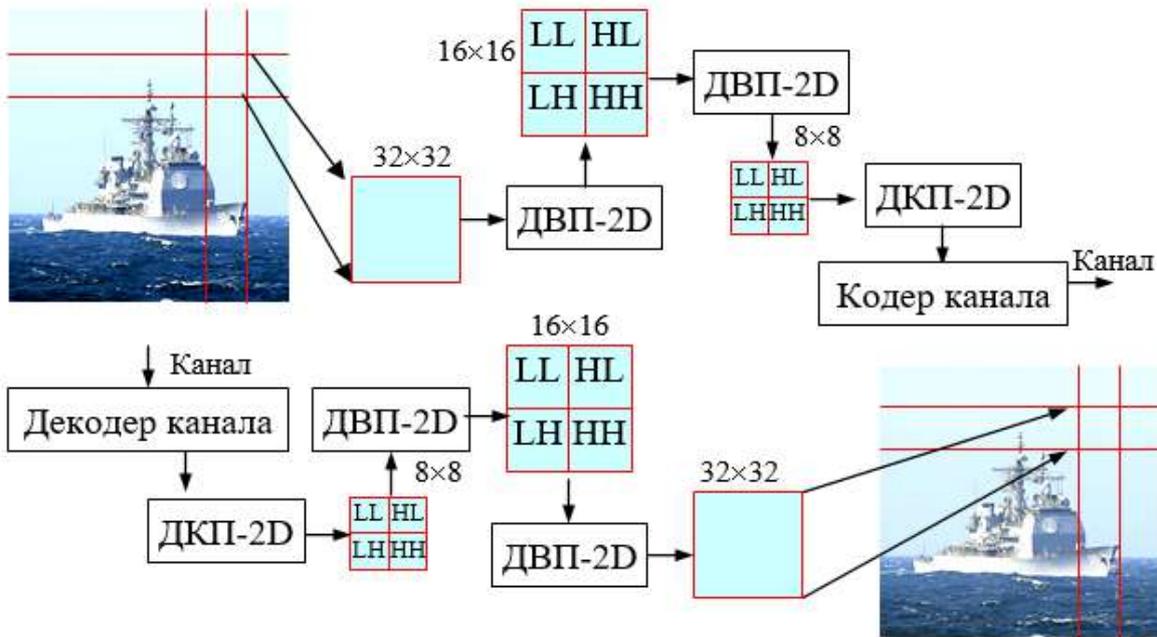


Рис. 3. Схема гибридного кодирования а) и декодирования б) изображений морских судов

Тестирование всех алгоритмов ДКП, ДВП и гибридного (т.е. ДКП+ДВП) было выполнено с использованием объектно-ориентированного языка C++ среды Визуал студии и библиотеки Орен СВ. Эффективность гибридного метода сравнивается с существующими алгоритмами на основе следующих количественных оценок: MSE, PSNR, CV, SSIM и MSSM.

1) Индекс структурного сходства (SSIM - structure similarity). Разница между двумя окнами x и y , имеющими одинаковый размер $N \times N$, и является одним из методов измерения схожести между двумя изображениями и определяется по следующей формуле:

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}$$

где SSIM метрика рассчитана на различные размеры окна, μ_x – среднее значение по x , μ_y – среднее значение по y , σ_x^2 – дисперсия x , σ_y^2 – дисперсия y , σ_{xy}^2 – ковариация x , y , $c_1 = (k_1L)^2$, $c_2 = (k_2L)^2$, L – динамический диапазон пикселей, а k_1, k_2 – константы (0,01, 0,03).

Отношение максимальной мощности сигнала к мощности искаженного шума, влияющего на качество, является пиковым отношением сигнал/шум.

$$2) PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255^2(3)}{MSE} \right) - \text{значение}$$

информационного показателя сигнал/шум, а MSE определяется по формуле:

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|f(i,j) - g(i,j)\|^2}{m \cdot n}$$

3) CV = σ/μ – отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению.

$$4) MSSIM = \sum_{y=0}^Y \sum_{x=0}^X \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}$$

средний индекс структурного сходства двух изображений.

Следует отметить, что PSNR должен быть как можно выше, MSE должна быть как можно меньше.

Таблица.
Результаты тестирования гибридного метода для изображений морских судов различных классов

Изображения Морских судов	Алгоритмы	MSE	PSNR	CV	SSIM	MSSIM
	ДКП	4.6e+03	11.5	45.9	4.1e-04	-5.1e-04
	ДВП	752.0	29.2	48.0	0.33	0.18
	ДВП-ДКП	507.3	29.9	45.6	0.9	0.3
	ДКП-ДВП	5.1e+03	25.8	60.9	0.4	0,09
	ДКП	3.6e+03	12.4	77.1	2.6e-04	7.8e-04
	ДВП	1.8e+03	28.3	76.5	0.2	0.1
	ДВП-ДКП	569.2	29.6	68.9	0.8	0.3
	ДКП-ДВП	2.9e+03	26.7	69.5	0.23	0.08
	ДКП	2.8e+03	13.6	54.7	0.0047	0.0062
	ДВП	788.5	28.4	48.8	0.5	0.28
	ДВП-ДКП	483.05	31.99	47.39	0.999	0.53
	ДКП-ДВП	798.75	28.17	51.11	0.425	0.29
	ДКП	3.7e+03	12.4	69.7	0.0074	0.0042
	ДВП	1.1e+03	28.2	57.8	0.381	0.2051
	ДВП-ДКП	631.09	30.61	53.09	0.9987	0.4252
	ДКП-ДВП	1.2e+03	27.09	67.02	0.3804	0.203
	ДКП	3.6e+03	13.4	68.7	0.084	0.005
	ДВП	1.2e+03	28.2	57.8	0.3804	0.2050
	ДВП-ДКП	630.09	30.8	53.6	0.93	0.432
	ДКП-ДВП	1.3e+03	26.7	67.66	0.39	0.2025

Заключение

Современные исследования в области сжатия и восстановления изображений ведутся по разным направлениям: косинусное и вейвлет преобразования. Каждое из этих направлений преследует цель, с одной стороны, решение задачи шумоподавления, а с другой, потребность в обеспечении высокой производительности систем передачи сжатых видеоданных в реальном времени.

В работе осуществлена попытка сочетать преимущества двух указанных подходов:

– косинусное преобразование позволяет обрабатывать блоки пикселей 8x8 независимо, что создает условие для параллельной реализации и увеличения производительности. Однако главным недостатком косинусного преобразования заключается в том, что в нем используется фиксированное окно, которое невозможно адаптировать к локальным особенностям сигнала изображения;

– вейвлет преобразование эффективен с точки зрения достижения более высокой степени адаптации к локальным особенностям сигнала изображения, но сложность алгоритма возрастает в зависимости от коэффициента сжатия.

В данной работе предложена схема сжатия изображений морских судов на основе гибридного метода кодирования, включающего три подхода

сжатия: косинус, вейвлет и энтропийное кодирование Хаффмана. Косинусное преобразование обеспечивает минимальные аппаратные ресурсы декорреляции, вейвлет минимальное искажение, а Хаффмана уменьшает среднюю длину кодового слова, назначая более короткое кодовое слово частым символам и более длинное кодовое слово редко встречающимся символам. Сочетание этих трех преимуществ этих трех подходов вошло в основу предложенного гибридного метода.

Результат показывает, что он дает лучшее качество изображения и высокий коэффициент сжатия, высокий уровень сигнал/шум и низкое среднеквадратическое отклонение.

В заключение можно отметить, что предложенный гибридный метод, позволяет реализовать оптимальную комбинацию двух выше указанных преобразований исходного сигнала. Результаты выполнения данной работы подтвердили, что метод имеет два главных преимущества перед другими известными методами: во-первых, более высокий коэффициент сжатия видеoinформации; во-вторых, меньшую долю ошибки при кодировании и декодировании изображений морских судов. Представленный метод с учетом развития [19-23] позволит повысить качество функционирования морских интеллектуальных систем.

Литература

1. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Катцын Д.В. Некоторые проблемы построения когнитивных транспортных систем и сетей // Сборник трудов Международной научно- практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015». С.- Петербург, 24-25 ноября, 2015 г. СПб: ИПТ РАН. 2015. Т. 1. С. 3–8.
2. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов/ М.С. Крюкова, Ш.С. Фахми, Я. Хасан и др.// Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.
3. R. Koenen, Ed., "Overview of the MPEG-4 standard," ISO/IEC JTC/SC29/WG21, Seoul, Korea, MPEG-99-N2925, Mar. 1999.
4. A. Said and W. Pearlman, "Low-complexity waveform coding via alphabet and sample-set partitioning in visual communications and image processing," in Proc. SPIE, 1997, pp. 25– 37.
5. Singh, M., Kumar, S., Singh, S. & Shrivastava, M. (2016). Various Image Compression Techniques: Lossy and Lossless. International Journal Of Computer Applications, 142(6), 23-26. doi: 10.5120/ijca2016909829.
6. Хасан Я.А., Фахми Ш.С. Адаптивное трехмерное косинусное преобразование транспортных сюжетов// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3.
7. Ikerionwu Charles, Isonkobong Christopher Udousoro. The Application of Selective Image Compression Techniques. Software Engineering. Vol. 6, No. 4, 2018, pp. 116-120. doi: 10.11648/j.se.20180604.12
8. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600–612, Apr. 2004.
9. S.-T. Hsiang and J. W. Woods, "Embedded image coding using zeroblocks of subband/wavelet coefficients and context modeling," in Proc. ISCAS 2000 Geneva Circuits and Systems, vol. 3, 2000, pp. 662–665.
10. R.Costantini, J.Bracamonte, G.Ramponi, J.L.Nagel, M.Ansorge, and F.Pellandini, "Low complexity video coder based on discrete Walsh Hadamard transform," in Proc. European signal processing conference, 2002, pp. 1217–1220.
11. M. Ezhilarasan and P. Thambidurai, "A hybrid transform technique for video coding," LNCS, vol. 4308, pp. 503–508, 2006.
12. U. S. Mohammed, "Highly scalable hybrid image coding scheme," Digital Signal Processing, Science Direct, vol. 18, pp. 364–374, 2008.
13. U. S. Mohammed and W. M. Abd-elhafiez, "Image coding scheme based on object extraction and hybrid transformation technique," Int. J. of Engineering Science and Technology, vol. 2, no. 5, pp. 1375–1383, 2010.
14. T.-H. Yu and S. K. Mitra, "Wavelet based hybrid image coding scheme," in Proc. IEEE Int Circuits and Systems Symp, vol. 1, 1997, pp. 377–380.
15. Ю. С. Бехтин, Д. В. Титов. Теоретическое обоснование выбора вейвлет-базиса в задачах сжатия зашумленных сигналов. Известия ВУЗов Приборостроение 2015, Т.58, № 2. С.87-93.
16. H. Tang and L. Cahill, "A new criterion for the evaluation of image restoration quality," in Proc. of the IEEE Region 10 Conf. Tencon 92, Melbourne, Australia, Nov. 1992, pp. 573–577.

17. A. Eskicioglu and P. Fisher, "Image quality measures and their performance," IEEE Tr. Comm., vol. 43, no. 12, pp. 2959–2965, Dec. 1995.
18. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004.
19. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеoinформации. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 1. С. 42-51.
20. Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Крюкова М.С., Селиверстов С.А. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С. 143-155.
21. Фахми Ш.С., Еид М.М., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И. Алгоритмы и устройства обнаружения объектов на звёздном фоне с использованием полигонально-рекурсивных решёток. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 1. С. 63-74.
22. Цицулин А.К., Фахми Ш.С., Зубакин И.А., Бобровский А.И., Черногубов А.В. Повышение качества передаваемой видеoinформации при кодировании источника. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 66-71.
23. Фахми Ш.С., Еид М.М., Бобровский А.И., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И., Альмахрук М., Салем А. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 3. С. 15-20.

References

1. Malygin I. G., Komashinsky V. I., Kattsyn D. V. Some problems of construction of cognitive transport systems and networks // Proceedings of the International scientific and practical conference "Transport of Russia: problems and prospects - 2015". St. Petersburg, November 24-25, 2015, St. Petersburg: IPT Russian Academy of Sciences. 2015. Vol.1. С. 3-8.
2. Fahmi S. S. Techniques, coding algorithms and image classification of ships/ M. S. Kryukova, S. Fahmi, Y. Hassan et al.// Marine intelligent technologies. № 1 (43). Vol.3. 2019. P. 145–155.
3. R. Koenen, Ed., "Overview of the MPEG-4 standard," ISO/IEC JTC/SC29/WG21, Seoul, Korea, MPEG-99-N2925, Mar. 1999.
4. A. Said and W. Pearlman, "Low-complexity waveform coding via alphabet and sample-set partitioning in visual communications and image processing," in Proc. SPIE, 1997, pp. 25–37.
5. Singh, M., Kumar, S., Singh, S. & Shrivastava, M. (2016). Various Image Compression Techniques: Lossy and Lossless. International Journal Of Computer Applications, 142(6), 23-26. doi: 10.5120/ijca2016909829.
6. Хасан Я.А., Фахми Ш.С. Адаптивное трехмерное косинусное преобразование транспортных сюжетов// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3.
7. Ikerionwu Charles, Isonkobong Christopher Udousoro. The Application of Selective Image Compression Techniques. Software Engineering. Vol. 6, No. 4, 2018, pp. 116-120. doi: 10.11648/j.se.20180604.12
8. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600–612, Apr. 2004.
9. S.-T. Hsiang and J. W. Woods, "Embedded image coding using zeroblocks of subband/wavelet coefficients and context modeling," in Proc. ISCAS 2000 Geneva Circuits and Systems, vol. 3, 2000, pp. 662–665.
10. R. Costantini, J. Bracamonte, G. Ramponi, J. L. Nagel, M. Ansoorge, and F. Pellandini, "Low complexity video coder based on discrete Walsh Hadamard transform," in Proc. European signal processing conference, 2002, pp. 1217–1220.
11. M. Ezhilarasan and P. Thambidurai, "A hybrid transform technique for video coding," LNCS, vol. 4308, pp. 503–508, 2006.
12. U. S. Mohammed, "Highly scalable hybrid image coding scheme," Digital Signal Processing, Science Direct, vol. 18, pp. 364–374, 2008.
13. U. S. Mohammed and W. M. Abd-elhafiez, "Image coding scheme based on object extraction and hybrid transformation technique," Int. J. of Engineering Science and Technology, vol. 2, no. 5, pp. 1375–1383, 2010.
14. T.-H. Yu and S. K. Mitra, "Wavelet based hybrid image coding scheme," in Proc. IEEE Int Circuits and Systems Symp, vol. 1, 1997, pp. 377–380.
15. Yu. S. Bekhtin, D. V. Titov. Theoretical substantiation of the choice of wavelet basis in the problems of noise signal compression. Izvestia Vuzov, Priborostroenie 2015, Vol. 58, No. 2. P. 87-93.
16. H. Tang and L. Cahill, "A new criterion for the evaluation of image restoration quality," in Proc. of the IEEE Region 10 Conf. Tencon 92, Melbourne, Australia, Nov. 1992, pp. 573–577.
17. A. Eskicioglu and P. Fisher, "Image quality measures and their performance," IEEE Tr. Comm., vol. 43, no. 12, pp. 2959–2965, Dec. 1995.
18. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004.
19. Fahmi SH.S. Poligonal'naya rekursivnaya obrabotka videoinformacii. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2008. № 1. S. 42-51.
20. Fahmi SH.S., Kostikova E.V., Kryukova M.S., Seliverstov S.A. Videosistema obnaruzheniya morskikh sudov po triangulyacionnym reshyotkam. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 143-155.
21. Fahmi SH.S., Eid M.M., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I. Algoritmy i ustrojstva obnaruzheniya ob"ektov na zvyozdnom fone s ispol'zovaniem poligonal'no-rekursivnyh reshyotok. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 1. S. 63-74.

22. Cyculin A.K., Fahmi SH.S., Zubakin I.A., Bobrovskij A.I., CHernogubov A.V. Povyshenie kachestva peredavaemoj videoinformacii pri kodirovanii istochnika. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 3. S. 66-71.
23. Fahmi SH.S., Eid M.M., Bobrovskij A.I., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I., Al'mahruk M., Salem A. Sistematizaciya algoritmov nahozhdeniya i kodirovaniya opornyh toчек izobrazhenij. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 3. S. 15-20.

УДК 681.7.069.32

ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ СУДОВ**Шакиб Субхиевич Фахми**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

профессор кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53
Тел.: +7(812) 234-36-75
e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68
e-mail: shatillen@mail.ru

Ярослав Александрович Селиверстов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

Кафедра компьютерных систем и программных технологий, Институт компьютерных наук и технологий
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21
Тел.: +7 (812) 297-16-28
e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Елена Сергеевна Калинина

кандидат технических наук, профессор кафедры Высшей математики и системного
моделирования сложных процессов
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149
Тел.: +7 (812) 388-86-39
e-mail: elenakali21@yandex.ru

Александр Васильевич Иванов

доктор технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных транспортных систем
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68
e-mail: iptranspb@gmail.com

Аннотация

Важнейшим компонентом обнаружения и распознавания морских судов является четкое обнаружение контуров в условиях шума и помех. Контур или граница объектов – это перепады значений интенсивности яркостей пикселей изображения, содержащие полезную информацию, позволяющую формировать геометрические и амплитудные признаки объектов на изображениях. В работе рассматриваются алгоритмы выделения контуров. Алгоритм Кэнни, реализованный на основе вычисления и направления градиента и осуществления локализации границ путем удаления псевдомаксимумов и подавлением ненужных элементов около требуемых границ. Алгоритм Робертса, обеспечивающий быстрые вычисления двумерного пространственного измерения на изображении и алгоритм Собеля, использующий приближение к производной в местах высокого градиента.

Предложены метрики и критерии для оценки точности обнаружения контуров:

а) Пратта, который базируется на использовании эмпирического расстояния между контурами;
б) критерий «ошибка локализации», который определяет «модуль разности» эталонного и полученного контуров.

Получены результаты тестирования алгоритмов выделения контуров различных морских судов для реальных тестовых изображений.

Ключевые слова: выделение контуров, обнаружение, фильтрация, перепады яркости, градиент, лапласиан, Кэнни, Робертс Привита и Собель

EDGE ENHANCEMENT OF SEA-GOING SHIP IMAGES

Shakib S. Fahmi

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Senior Research Scientist
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel .: +7 (921) 321-95-68

Professor, Department of Computer Aided Design
of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)
197376, St. Petersburg, St. Professora Popova, house 5, building I, room 11-53
tel .: +7 (921) 234-36-75
e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalya V. Shatalova

PhD in Engineering Science, Senior Research Scientist
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel .: +7 (921) 321-95-68
e-mail: shatillen@mail.ru

Yaroslav A. Seliverstov

PhD in Engineering Science, Senior Researcher
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel .: +7 (921) 321-95-68

Department of Computer Systems and Software Technologies, Institute of Computer Science and Technology
St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great,
194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 21;
tel .: +7 (921) 297-16-28
e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Elena S. Kalinina

PhD in Engineering Science, Professor of the Department of Higher Mathematics and System
Modeling of Complex Processes
FSBEI of Higher Education of St. Petersburg University of State Fire Service, EMERCOM of Russia
196105, St. Petersburg, Moskovskiy Prospect, 149
tel .: +7 (921) 388-86-39
e-mail: elenakali21@yandex.ru

Alexander V. Ivanov

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Laboratory of Intelligent Transport Systems
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, 12 line VO, 13
tel .: +7 (921) 321-95-68
e-mail: iptranspb@gmail.com

Abstract

The most important component of detection and recognition of ships is the clear detection of edges in the conditions of noise and interference. The edge or boundary of objects is differences between pixel brightness values of an image containing useful information that allows formation of geometric and amplitude features of objects in the images. The paper deals with edge enhancement algorithms. The Canny algorithm, implemented on the basis of computation and orientation of the gradient and the implementation of localization of boundaries by removing pseudo-maxima and suppressing unwanted elements around the desired boundaries. The Roberts algorithm, which provides quick calculations of a two-dimensional spatial measurement on an image and the Sobel algorithm, which uses an approximation to the derivative at high gradient locations.

Metrics and criteria for assessing the accuracy of edge detection are proposed:

- a) Pratt measure, which is based on the use of empirical distance between the edges;
- b) the criterion "localization error", which determines the "modulus of the difference" between the reference and the resulting edges.

The results of algorithm testing for selection of edges of various ships for real test images were obtained.

Key words: edge enhancement, detection, filtering, brightness differences, gradient, Laplacian, Canny, Roberts, Pratt and Sobel.

Введение

Современные исследования и предложенные инновационные проекты и приложения в области компьютерного зрения были впервые внедрены в область искусственного интеллекта для создания

интеллектуальных систем автономного восприятия и понимания визуальных данных о внешнем мире [1,2]. Однако нехватка ресурсов на раннем этапе исследований и необходимость автоматизации в различных промышленных, научных и военных задачах сузили круг внедрения компьютерного

зрения [3,4]. Последующие исследования были ориентированы на использование математического аппарата при решении конкретных практических задач в соответствующих приложениях [5,6].

В последнее время разработка новых методов в таких областях, как, например, машинное обучение, способствовала значительному прогрессу в области компьютерного зрения, позволяя системам выполнять определенные и существенные шаги в реализации когнитивных систем, но, тем не менее, производительность существующих систем в значительной степени зависит от адаптации к новым условиям [5]. Таким образом, главная проблема машинного зрения заключается в создании надежных и гибких систем, которые могут распознавать сложные классы объектов в сложных условиях шума и помех. В этом контексте, модель человеческого зрения является наиболее перспективной в качестве эталонной модели [3,7].

В последние десятилетия сегментация и обнаружение краев морских объектов на изображениях остаются не решенными и являются также важной проблемой в области проектирования интеллектуальных когнитивных транспортных систем [1,2]. Выделение контуров объектов является важным шагом во многих системах передачи, анализа и распознавания образов, а также в мышлении. Кроме того, контуры включают в себя наиболее важные структуры в изображении. Как правило, ребра возникают на границе между двумя различными областями изображения. Другими словами, ребро - это граница между объектом и фоном или между двумя различными объектами.

Существует много различных методов обнаружения краев. Тем не менее, важной проблемой при обработке изображений остается эффективное сравнение краевых детекторов и то, какие параметры соответствуют лучшим настройкам для получения точных результатов обнаружения краев [8].

Действительно, надежный метод обнаружения границ должен создавать контурное изображение, содержащее ребра в их правильных местоположениях с минимальным количеством неправильно классифицированных пикселей. Для объективной количественной оценки работы детектора границ контролируемая мера вычисляет сходство/несходство между результатом сегментации и основной истиной, полученной из синтетических данных или человеческого суждения [9,10].

В связи с развитием интеллектуальных видеосистем и с нарастающей потребностью в эффективном и более качественном мониторинге функционирования центров диспетчерского управления морскими объектами, в частности контроля состояния акваторий, обострилась актуальность использования систем мониторинга на основе изображений, полученных из различных камер наблюдения и с использованием последних достижений компьютерного зрения [11].

Различные исследователи предложили использовать в системах технического зрения и контроля цифровые камеры, установленные в

соответствующих местах для сбора и анализа визуальных данных о состоянии морских судов (площадь, габариты, размеры, формы, дефекты и т.д.). Анализ в данном случае заключается в выделении контуров морских судов, как начальный этап к решению задачи определения геометрических и амплитудных характеристик с целью классификации морского судна.

Обнаружение границ – важный этап предварительной обработки для задач технического зрения таких как, сегментация, структуризация геометрических форм объектов и их распознавание. Обнаружение контуров относится к процессу идентификации объектов, имеющих резкие перепады яркости, поскольку резкие изменения амплитудных характеристик пикселей представляют границы объектов на изображении. Классические методы обнаружения ребер используют операторы свертки в пространственной области изображения [4].

1. Постановка задачи исследований

На сегодняшний день существует множество двумерных (2D) фильтров с высокой чувствительностью к изменениям интенсивности отсчетов и работающие по принципу выделения однородных областей путем присвоения им значения нуля. Большое количество доступных фильтров [5] предназначены для обнаружения определенного типа ребер [6]. Но при этом ориентация края, тип шума и структура границ объектов играют важную роль в определении требуемого 2D-фильтра обнаружения контуров.

В условиях шума и помех, задача обнаружения границ объектов [7] является сложной задачей, так как и край, и шум могут содержать высокочастотное составляющее и, следовательно, подавление шума приводит к искаженным и размытым изображениям.

Следует отметить, что термины контур, край и граница в данной работе являются синонимами для обозначения цели исследуемых алгоритмов.

Как отмечалось ранее, существует множество алгоритмов выделения контуров, каждый из них использует определенные свойства изображений и имеет свои преимущества для определенного класса задач. Ни один из алгоритмов не может быть оптимальным для всех случаев. Такое разнообразие и их специфика делает сложным вопрос об оценке качества работы какого-либо из них.

Наличие шумов приводит к возникновению проблем локализации границ, требующих больших вычислительных затрат времени и ресурсов из-за:

а) отсутствия предварительной информации об истинных контурах;

б) возможности обнаружения ложных границ. Для обнаружения ребер доступно множество методов.

Алгоритмы обнаружения контуров разделяются на две категории: на основе градиента и на основе Лапласа. Дифференцирование изображения [12] является наиболее распространенным методом обнаружения контуров. Операторы градиента используют производные первого порядка изображения, при поиске максимума и минимума.

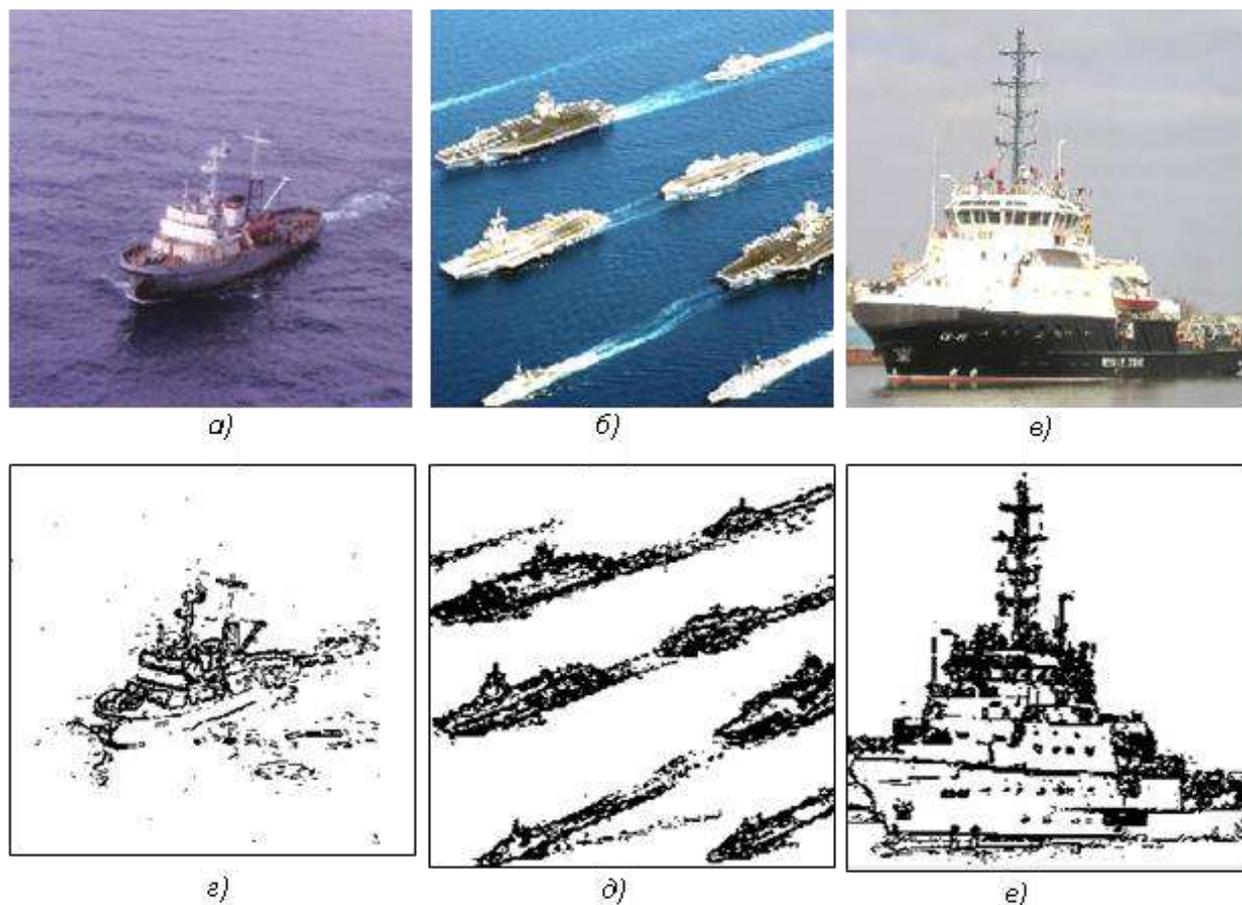


Рис. 1. Исходные изображения морских судов а-в) эталонные контурные изображения г-е) соответственно

Операторы Лапласа [13] для обнаружения контуров выполняют поиск нулевых пересечений в производных второго порядка изображения. Поскольку изображения тормозной системы поезда характеризуются наличием шумов и помех, то для оценки качества алгоритмов выделения контуров необходимо иметь набор исходных картин с уже известными сформированными контурами, так называемые канонические картины контуров (ККК). Эти ККК обычно напрямую задаются исследователями или создаются автоматически по «искусственно» созданным изображениям [14].

В данной работе рассматриваются критерии, базирующиеся на вычислении «метрик различия» ККК и картин, полученных после применения различных методов выделения контуров:

- 1) Пратта (PRA – Pratt) для определения эмпирического расстояния между контурами.
- 2) Критерий «точность локализации» (LE – Localization Error), вычисляющий «модуль разности» двух изображений.

2. Основные алгоритмы выделения контуров

В качестве алгоритмов выделения контуров были использованы наиболее распространенные алгоритмы: Кэнни, Прюитт, Робертса и Собеля. При этом базовые метрики для оценки различия в работе являются:

– ODE (overdetection error – ошибка пересегментирования или нахождения границ, которых нет на ККК);

– UDE (underdetection error – ошибка недосегментирования или необнаружения границ присутствующих на ККК);

– LE (localization error – увеличивается с увеличением «разности» получившейся картины контуров (ПКК) и ККК, является объединением UDE и ODE).

Важно отметить, что в качестве входных визуальных данных выступают изображения морского судна, где цифровая камера расположена в фиксированном месте, которое позволяет получить кадры под нужными ракурсами.

2.1. Критерии оценки алгоритмов выделения контуров

Представленные различные алгоритмы выделения контуров могут быть применены и оценены с использованием реальных изображений (рис. 1: а, б, в) и их ККК (рис. 1: г, д, е), созданных экспертами, или с использованием синтетических изображений и, как следствие созданных по ним автоматически ККК. В случае синтетических изображений контуры полностью надежны и имеют высокую точность, но не всегда реалистичны. Для реальных приложений экспертная оценка субъективна, при этом для проверки точности нахождения контура, необходимо вычислять критерии качества контура [7].

В следующих параграфах представлен обзор некоторых классических доступных метрик, используемых в этом контролируемом контексте для методов сегментации контуров.

Критерии и способы оценки алгоритмов обнаружения контуров

Критерий Пратта (PRA). Данный критерий базируется на вычислении эмпирического расстояния между KKK f_{ref} и результатом работы алгоритмов выделения контуров f_C [15]:

Лучшее значение данного критерия = 1, худшее = 0. Чем ближе значение критерия к 1, тем лучше использованный для обнаружения контуров алгоритм:

$$PRA(f_{ref}, f_C) = \frac{1}{\max\{\text{card}(f_{ref}), \text{card}(f_C)\}} \sum_{k=1}^{\text{card}(f_C)} \frac{1}{1 + d^2(k)}$$

где:

f_{ref} – каноническая или эталонная картина контуров (т.е. множество пикселей, образующих контур);

f_C – картина контуров, получившаяся в результате работы какого-либо алгоритма обнаружения контуров (т.е. множество пикселей, образующих контур);

$\text{card}(f_i)$ – количество пикселей, образующих контур изображения f_i ;

$d(k)$ – расстояние между k -ым пикселем контура f_C и ближайшим пикселем контура f_{ref} (в лучшем случае = 0, т.е. на месте пикселя контура f_C будет находиться пиксель контура f_{ref}).

Критерий «Ошибка локализации» (Localization error). Лучшее значение данного критерия 0, худшее 1. Чем ближе значение критерия к 0, тем лучше использованный для обнаружения контуров алгоритм).

$$LE(f_{ref}, f_C) = \frac{\text{card}(f_{ref}/C \cup f_C/ref)}{\text{card}(f)}$$

где:

f_{ref}/C – множество пикселей, принадлежащих f_{ref} и не принадлежащих f_C ;

f_C/ref – множество пикселей, принадлежащих f_C и не принадлежащих f_{ref} ;

f – множество пикселей исходного изображения.

2.2. Описание основных способов выделения контуров

Перепад интенсивности яркости считается контуром, если его высота и угол наклона превосходят некоторые пороговые значения.

Главными проблемами при выделении контуров морских судов являются:

- разрывы границ в местах, где перепад меняется медленно;
- псевдо-граница, по причине наличия шума и помех на изображениях;
- размытости, что приводит к излишним широким границам;
- ошибки в определении позиции пикселей на границах.

Часто используемые на практике способы выделения контуров объектов на изображениях основаны на вычислении Градиента и Лапласиана:

а) производная первого порядка обнаружения ребер вычисляется следующим образом:

$$\nabla f = [G_x, G_y] = [df(x,y)/dx, df(x,y)/dy]^T,$$

где $f(x,y)$ – это исходное изображение.

Величина вектора является важной величиной при обнаружении ребер, обозначаемой ∇f , где

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}.$$

Направление вектора градиента определяется по формуле:

$$\Theta|\nabla f| = \tan^{-1}(G_y/G_x),$$

а для вычисления градиента изображения в требуемых местах перепада яркости пикселей вычисляются частные производные $\partial f/\partial x$ и $\partial f/\partial y$.

б) обнаружение контура производной второго порядка, лапласиан 2D функции $f(x,y)$ вычисляется следующим образом:

$$\nabla^2 f = \frac{d^2 f}{dx^2} + \frac{d^2 f}{dy^2}.$$

Сглаживание (размытие) обычно выполняется Лапласианом в качестве операции. Которая предшествует поиску контура через нулевые пересечения 2D Гауссова функции:

$$h(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – стандартное отклонение, определяющее степень размытости изображения. При этом Лапласиан h определяется как:

$$\nabla^2 h(x,y) = -\left[\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4}\right] e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}.$$

Вышеуказанная функция также называется Лапласианом Гаусса (LOG):

$$LOG(x,y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

После вычисления двумерной производной второго порядка изображения находится значение точки, которое больше заданного порога, при этом один из ее соседей меньше отрицательного порога. Свойство этой точки называется нулевым пересечением, и далее ее можно обозначить, как точку ребра. После нахождения двумерной производной второго порядка изображения, необходимо найти значение точки, которое больше заданного порога и один из ее соседей меньше отрицательного порога. Эта точка называется нулевым пересечением и считается краевой точкой.

Рассмотрим основные алгоритмы выделения контуров изображений.

Алгоритм выделения контуров Кэнни.
 Джон Ф. Кэнни в 1986 году разработал алгоритм выделения контуров [8], известный как оптимальный детектор, который удовлетворяет следующим трем общим критериям обнаружения границ [16]:

1) вычисление градиента и низкая частота появления ошибок, следовательно, обнаруживает только существующие перепады яркости.

2) локализация путем удаления псевдомаксимумов. Данная процедура вычисляет разницу (расстояние) между пикселями реального контура и обнаруженными пикселями границы, так как качество контура определяется общим минимальным расстоянием вдоль всей границы объектов.

3) подавление ненужных границ – обнаруженный контур должен быть отмечен только один раз, а точки вблизи границ подавляются.

Этапы алгоритма обнаружения контуров Кэнни:

1) Удаление шума. Для устранения шума используется Гауссовский фильтр [16]. Примером Гауссовского фильтра ядра размера 5 является:

$$K = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix};$$

2) Поиск градиента на изображении:

– градиент вдоль направлений x и y , вычисляется с использованием масок свертки 3×3 следующим образом:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix};$$

– величина градиента и направление рассчитываются следующим образом:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \text{ и } \Theta = \arctan(G_y / G_x),$$

где G_x и G_y – градиенты вдоль направлений x и y , а Θ – это направление градиента.

3) Удаление лишних пикселей. Этот шаг удаляет пиксели, которые не считаются частью контура. Останутся только тонкие линии, пиксели, которых считаются контуром;

4) Двухпороговый анализ. На данном этапе используются два порога, названные как верхний и нижний:

– если значение градиента пикселя выше верхнего порога, то пиксель рассматривается как пограничный пиксель;

– если значение градиента пикселя меньше нижнего порога, пиксель отклоняется;

– если градиент пикселя находится между нижним и верхним порогами, то пиксель будет

принят, только если он подключен к пикселям, которые находятся выше верхнего порога [17].

Пиксели-кандидаты определяются как пиксели, пережившие процесс истончения, называемый не максимальным подавлением. В этом процессе сила ребра каждого пикселя-кандидата устанавливается равной нулю, если его сила ребра не превышает силу ребра двух соседних пикселей в направлении градиента. Определение порога осуществляется на истонченный край изображения, используя величину гистерезиса. В гистерезисе, используются 2 порога прочности края. Все пиксели-кандидаты на ребро ниже нижнего порога помечаются как «не ребра», а все пиксели выше низкого порога, которые могут быть подключены к любому пикселю выше высокого порога через цепочку пикселей ребра, помечаются как «ребра» [17].

Результаты моделирования алгоритма Кэнни показаны на рисунке 3, д.

Алгоритм выделения контуров Робертса.

Алгоритм Робертса выполняет простое и быстрое вычисление 2D пространственного измерения градиента на изображении с помощью масок (рис. 2). Таким образом, он выделяет области высокой пространственной частоты, которые часто соответствуют контурам. В общем случае, входной сигнал преобразуется в контур с оттенками серого. Значения пикселей в каждой точке на выходе представляют оцененную абсолютную величину пространственного градиента входного изображения в этой точке [18].

Результаты моделирования алгоритма Робертса показаны на рисунке 3, б.

Алгоритм выделения контуров Прюитта.

Алгоритм Прюитт выполняет простое и быстрое вычисление 2D-фильтра пространственного измерения градиента на изображении с помощью масок (рис. 2, а). Таким образом, он выделяет области высокой пространственной частоты, которые часто соответствуют контурам. В общем случае, входной сигнал преобразуется в контур с оттенками серого. Значения пикселей в каждой точке на выходе представляют оцененную абсолютную величину пространственного градиента входного изображения в этой точке [14].

В данном алгоритме граница определяется с помощью направления и величины градиента. Алгоритм является подходящим способом для оценки величины и ориентации края. Хотя обнаружение края дифференциального градиента требует довольно трудоемкого расчета для оценки ориентации по значениям в направлениях x и y , обнаружение направления границ получается непосредственно от ядра с максимальным откликом, и оно ограничено 8-ми возможными ориентациями, однако опыт показывает, что большинство прямых оценок ориентации не намного более точны. Этот детектор на основе градиента оценивается в окрестности 3×3 для восьми направлений. Вычисляются все восемь масок свертки. Затем выбирается одна маска свертки именно с наибольшим модулем.

Результаты моделирования алгоритма Прюитта показаны на рисунке 3, г.

Таблица. Результаты экспериментов алгоритмов выделения контуров

Входное изображение	Алгоритмы выделения контуров	Оценка по критерию Пратта (PRA)	Оценка по критерию «Ошибка локализации» (LE)
Изображение класса 1_1	Робертса	0,5405	0,0492
	Собея	0,5900	0,0427
	Превитта	0,7138	0,0542
	Кэнни	0,7320	0,0321
Изображение класса 2_2	Робертса	0,3829	0,0597
	Собея	0,4824	0,0592
	Превитта	0,48757	0,0540
	Кэнни	0,6401	0,04587
Изображение класса 3_3	Робертса	0,4246	0,0690
	Собея	0,5730	0,0451
	Превитта	0,5728	0,0458
	Кэнни	0,5976	0,0409

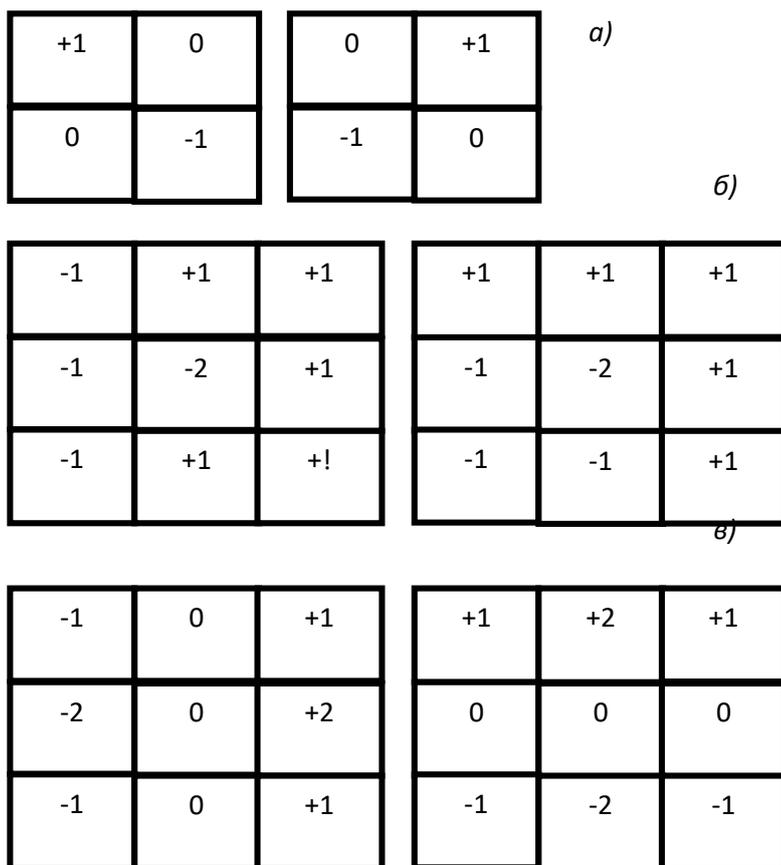


Рис. 2. Маски: а) Робертса, б) Собея, в) Прюитт

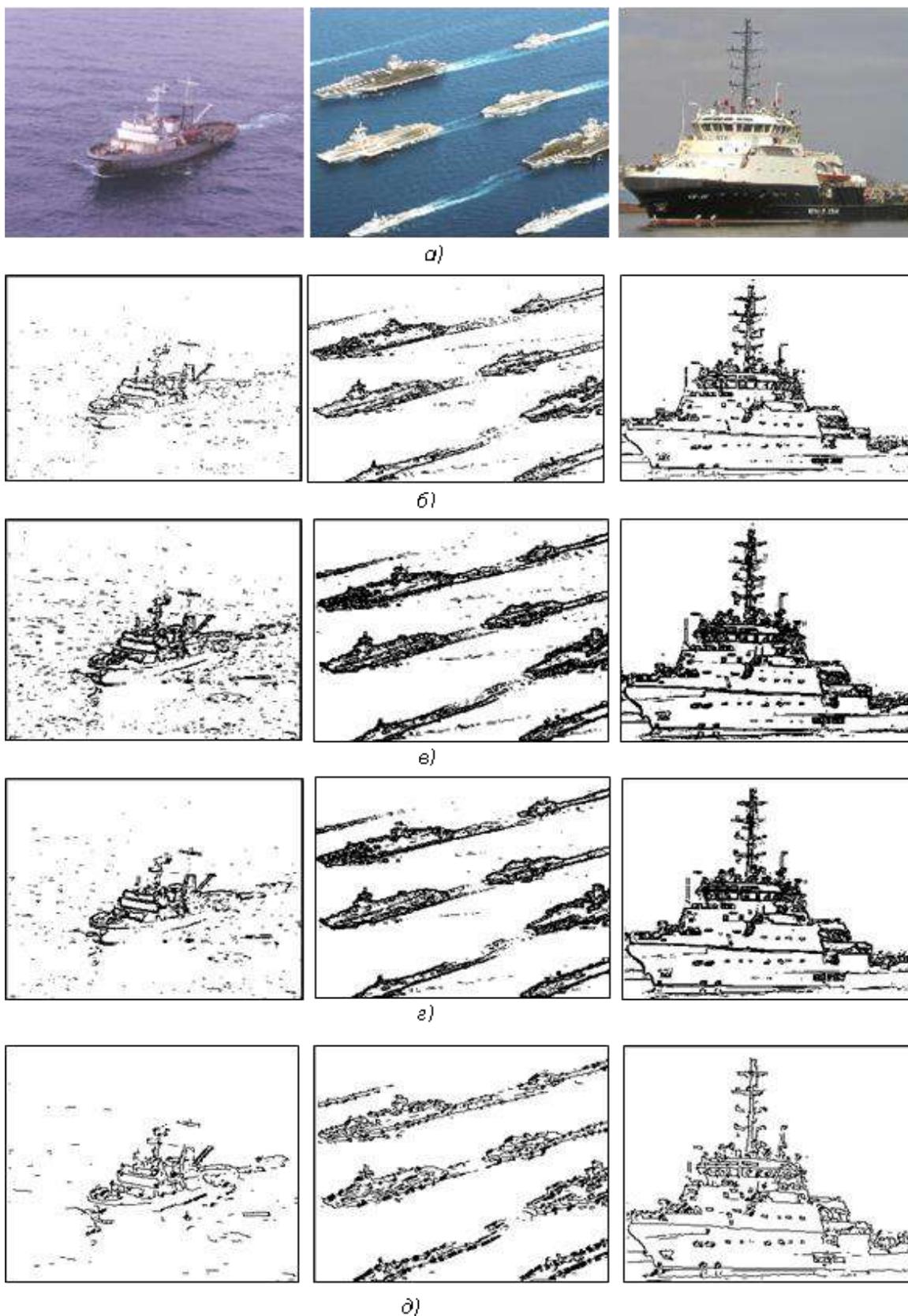


Рис. 3. Результаты выделения контуров: а) исходные изображения морских судов, б) Рабертса, в) Сабеля, г) Приюитт, д) Кюни

Алгоритм выделения контуров Собеля.

Алгоритм Собеля выполняет 2D пространственное измерение градиента на изображении и тем самым подчеркивает области высокой пространственной частоты, соответствующей ребрам. Обычно он используется для нахождения приблизительной абсолютной величины градиента в каждой точке входного изображения в оттенках серого. В теории, по крайней мере, алгоритм состоит из пары сверток ядра размером 3×3, как показано на рисунке 2, в. Каждое ядро представляет из себя другое, повернутое на 90°. Данный алгоритм не сильно отличается от алгоритма Креста Робертса [19,20].

Результаты моделирования алгоритма Собеля показаны на рисунке 3, в.

3. Результаты экспериментов алгоритмов выделения контуров

В данной работе был представлен обзор классических метрик, используемых для оценки в контролируемом контексте алгоритмов обнаружения контуров. Изученные критерии вычисляют меру несходства между результатом выделенных и канонических контуров. Были протестированы и получены относительные характеристики на синтетических и реальных результатах выделения контуров.

Проведенные эксперименты включали два этапа исследований. Первый этап заключался в получении результатов работы каждого алгоритма обнаружения контуров для одной картинке с различными входными параметрами. В ходе второго этапа для всех результатов, полученных ранее, были рассчитаны значения критериев оценки качества выделения границ PRA и LE. На основании полученных результатов второго этапа, можно заключить, что контуры, полученные с

использованием метода Кэнни, являются наиболее точными, т.к. позволили получить наиболее четкие границы морских судов с наименьшим количеством помех.

Результаты 2 этапа представлены в таблице.

Заключение

В данной статье описываются различные методы выделения контуров в контексте задачи выделения морского судна морских акватории на реальных изображениях и подробно обсуждаются различные алгоритмы обнаружения перепадов яркостей пикселей на основе двух критериев оценки точности вычисления контуров:

Пратта – PRA основывающийся на вычислении эмпирического расстояния между контурами;

«точность локализации» – LE, вычисляющий «модуль разности» двух изображений.

Результаты показывают, что точность обнаружения, во многом зависит от метрики оценки и статистических характеристик изображений, а также от локальных свойств контуров изображения.

Синтез канонических картин контуров морских судов и вычисление критериев точности выделения контуров осуществлялись с помощью программы средств Microsoft Visual C#. Оценка алгоритмов выделения контуров Робертса, Собеля, Прюитт и Кэнни, по описанному в статье критериям, показала, что наилучшие результаты дал алгоритм Кэнни, так как адаптирован к различным условиям шума и помех.

Результаты работы на ряду с [21-24] позволят качественно повысить обнаружение объектов в условиях шума и помех.

Литература

1. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Катцын Д.В. Некоторые проблемы построения когнитивных транспортных систем и сетей // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015». С.-Петербург, 24-25 ноября, 2015 г. СПб: ИПТ РАН. 2015. Т. 1. С. 3–8.
2. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов/ М.С. Крюкова, Ш.С. Фахми, Я. Хасан и др.// Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.
3. S. Zheng, X. Chai, X. An, L. Li, Railway track gauge inspection method based on computer vision, in: Mechatronics and Automation, ICMA, 2012 International Conference on, 2012, pp. 1292–1296.
4. E. Argyile. — Techniques for edge detection, // Proc. IEEE, vol. 59, pp. 285-286, 1971.
5. Werner Frei, and Chung-Ching Chen. "Fast Boundary Detection: A Generalization and a New Algorithm", IEEE Transactions On Computers, Vol. C-26, No. 10, October 1977.
6. D. Ziou, S. Tabbone, "Edge Detection Techniques – An Overview", Pattern Recognition & Image Analysis, 1998, 8 (4), pp.537-559.
7. Ravi.S, A.M. Khan, "Operators Used In Edge Detection Computation: A Case Study", International International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Vol.7 No.11 (2012).
8. J. Canny, "A computational approach to edge detection," IEEE TPAMI, no. 6, pp. 679–698, 1986.
9. J.W. Modestino, R.W. Fries, "Edge detection in noisy images using recursive digital filtering", Computer Graphics and Image Processing Volume 6, Issue 5, October 1977, Pages 409–433.
10. Armando J. Pinho and Lu'is B. Almeida, "A review on edge detection based on filtering and differentiation", Revista Do Detua, VOL. 2, No1, 1997, pp. 113-126.
11. Фахми, Ш. С. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам/ Ш.С. Фахми, Е.В. Костинова, М.С. Крюкова, С.А.Селиверстов// Морские интеллектуальные технологии. № 3 (41). Т.1. 2018. С.143-156.
12. Armando J. Pinho and Lu'is B. Almeida, "A review on edge detection based on filtering and differentiation", Revista Do Detua, VOL. 2, No1, 1997, pp. 113-126.
13. V. Berzins, — Accuracy of laplacian edge-detectors, // Comput. Vis. Graph. Image Process. vol. 27, pp. 195–210, 1984.

14. S'ebastien C., H'el`ene Laurent, C. Rosenberger, B. Emile. Comparative Study of Contour Detection Evaluation Criteria Based on Dissimilarity Measures/EURASIP Journal on Image and Video Processing. Volume 2008, Article ID 693053, pp. 334-342. doi:10.1155/2008/693053.
15. W. K. Pratt, O. D. Faugeras, and A. Gagalowicz, "Visual discrimination of stochastic texture fields," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 8, no. 11, pp. 796–804, 1978.
16. M. Bennamoun, B. Boashash, and J. Koo, —Optimal parameters for edge detection, II in Proc. IEEE Int. Conf. SMC, vol. 2, 1995, pp. 1482–1488.
17. Jing Tian, Weiyu Yu, Shengli Xie, An Ant Colony Optimization Algorithm For Image Edge Detection, In IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp. 751-756, Hongkong, Jun. 2008.
18. Bouchet A, Pastore J and Ballarin V, "Segmentation of Medical Images using Fuzzy Mathematical Morphology", JCS and T, Vol.7, No.3, October 2007, pp.256-262.
19. Matheel E. Abdulmunim, Suhad M. Propose a Mixture Edge Detection Method for Infrared Image Segmentation / British Journal of Science 61 September 2012, Vol. 6 (2), pp. 61-71.
20. Фахми, Ш. С. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам/ Ш.С. Фахми, Е.В. Костикова, М.С. Крюкова, С.А.Селиверстов// Морские интеллектуальные технологии. № 3 (41). Т.1. 2018. С.143-156.
21. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеоинформации. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 1. С. 42-51.
22. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Зубакин И.А., Бобровский А.И., Черногубов А.В. Повышение качества передаваемой видеоинформации при кодировании источника. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 66-71.
23. Фахми Ш.С., Еид М.М., Бобровский А.И., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И., Альмахрук М., Салем А. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 3. С. 15-20.
24. Фахми Ш.С., Еид М.М., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И. Алгоритмы и устройства обнаружения объектов на звёздном фоне с использованием полигонально-рекурсивных решёток. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 1. С. 63-74.

References

1. Malygin I. G., Komashinsky V. I., Kattsyn D. V. Some problems of construction of cognitive transport systems and networks // Proceedings of the International scientific and practical conference "Transport of Russia: problems and prospects - 2015". St. Petersburg, November 24-25, 2015, St. Petersburg: IPT Russian Academy of Sciences. 2015. Vol.1. С. 3-8.
2. Fahmi S. S. Techniques, coding algorithms and image classification of ships/ M. S. Kryukova, S. Fahmi, Y. Hassan et al.// Marine intelligent technologies. № 1 (43). Vol.3. 2019. P. 145–155.
3. S. Zheng, X. Chai, X. An, L. Li, Railway track gauge inspection method based on computer vision, in: Mechatronics and Automation, ICMA, 2012 International Conference on, 2012, pp. 1292–1296.
4. E. Argyle. — Techniques for edge detection, II Proc. IEEE, vol. 59, pp. 285-286, 1971.
5. Werner Frei, and Chung-Ching Chen. "Fast Boundary Detection: A Generalization and a New Algorithm", IEEE Transactions On Computers, Vol. C-26, No. 10, October 1977.
6. D. Ziou, S. Tabbone, "Edge Detection Techniques – An Overview", Pattern Recognition & Image Analysis, 1998, 8 (4), pp.537-559.
7. Ravi.S, A.M. Khan, "Operators Used In Edge Detection Computation: A Case Study", International International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Vol.7 No.11 (2012).
8. J. Canny, "A computational approach to edge detection," IEEE TPAMI, no. 6, pp. 679–698, 1986.
9. J.W. Modestino, R.W. Fries, "Edge detection in noisy images using recursive digital filtering", Computer Graphics and Image Processing Volume 6, Issue 5, October 1977, Pages 409–433.
10. Armando J. Pinho and Lu'is B. Almeida, "A review on edge detection based on filtering and differentiation", Revista Do Detua, VOL. 2, No1, 1997, pp. 113-126.
11. Fahmi, W. S. Video system detection of ships on triangular lattices/ S. Fahmy, E. V. Kostikova, M. S. Kryukova, A. S. Seliverstov// Marine intelligent technologies. № 3 (41). Vol.1. 2018. P. 143-156.
12. Armando J. Pinho and Lu'is B. Almeida, "A review on edge detection based on filtering and differentiation", Revista Do Detua, VOL. 2, No1, 1997, pp. 113-126.
13. V. Berzins, — Accuracy of laplacian edge-detectors, II Comput. Vis. Graph. Image Process. vol. 27, pp. 195–210, 1984.
14. S'ebastien C., H'el`ene Laurent, C. Rosenberger, B. Emile. Comparative Study of Contour Detection Evaluation Criteria Based on Dissimilarity Measures/EURASIP Journal on Image and Video Processing. Volume 2008, Article ID 693053, pp. 334-342. doi:10.1155/2008/693053.
15. W. K. Pratt, O. D. Faugeras, and A. Gagalowicz, "Visual discrimination of stochastic texture fields," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 8, no. 11, pp. 796–804, 1978.
16. M. Bennamoun, B. Boashash, and J. Koo, —Optimal parameters for edge detection, II in Proc. IEEE Int. Conf. SMC, vol. 2, 1995, pp. 1482–1488.
17. Jing Tian, Weiyu Yu, Shengli Xie, An Ant Colony Optimization Algorithm For Image Edge Detection, In IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp. 751-756, Hongkong, Jun. 2008.
18. Bouchet A, Pastore J and Ballarin V, "Segmentation of Medical Images using Fuzzy Mathematical Morphology", JCS and T, Vol.7, No.3, October 2007, pp.256-262.

19. Matheel E. Abdulmunim, Suhad M. Propose a Mixture Edge Detection Method for Infrared Image Segmentation / British Journal of Science 61 September 2012, Vol. 6 (2), pp. 61-71.
20. Fahmi, Sh. S. Video system detection of ships on triangular lattices/ Sh. S. Fahmi, E. V. Kostikova, M. S. Kryukova, A. S. Seliverstov// Marine intelligent technologies. № 3 (41). Vol.1. 2018. P. 143-156.
21. Fahmi SH.S. Poligonal'naya rekursivnaya obrabotka videoinformacii. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2008. № 1. S. 42-51.
22. Cychulin A.K., Fahmi SH.S., Zubakin I.A., Bobrovskij A.I., Chernogubov A.V. Povyshenie kachestva peredavaemoj videoinformacii pri kodirovanii istochnika. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 3. S. 66-71.
23. Fahmi SH.S., Eid M.M., Bobrovskij A.I., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I., Al'mahruk M., Salem A. Sistematizaciya algoritmov nahozhdeniya i kodirovaniya opornyh toчек izobrazhenij. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 3. S. 15-20.
24. Fahmi SH.S., Eid M.M., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I. Algoritmy i ustrojstva obnaruzheniya ob"ektov na zvyozdnom fone s ispol'zovaniem poligonal'no-rekursivnyh reshyotok. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 1. S. 63-74.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.94

МЕТОД ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИНСПЕКЦИИ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ**Валерий Александрович Бобков**

доктор технических наук, заведующий лабораторией машинной графики
Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 5
e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Михаил Александрович Морозов

ведущий инженер-программист лаборатории машинной графики
Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 5
e-mail: morozov@iacp.dvo.ru

Александр Вячеславович Инзарцев

доктор технических наук, заведующий лабораторией систем управления
Института проблем морских технологий ДВО РАН
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
e-mail: inzar@marine.febras.ru

Григорий Дмитриевич Елисеенко

научный сотрудник лаборатории систем управления
Института проблем морских технологий ДВО РАН
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
e-mail: eliseenko_g@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с использованием автономных подводных роботов (АПР). Описывается предлагаемый метод определения положения робота по отношению к инспектируемому трубопроводу в непосредственной близости от объекта. Метод базируется на обработке видеоинформации и измерений линейного лазера с применением метода визуальной навигации. Предложены оригинальные алгоритмы идентификации трубопровода применительно к использованию, как моно-, так и стерео-камеры. Проверка функционирования разработанных алгоритмов и оценка эффективности осуществлялась на виртуальных сценах в рамках разработанного авторами имитационного моделирующего комплекса, распределенного на многопроцессорной вычислительной архитектуре. Вычислительные эксперименты показали, что точность вычисляемых параметров взаимного расположения АПР и трубопровода удовлетворяет требованиям системы управления АПР.

Ключевые слова: автономный подводный робот, линейный лазер, подводный трубопровод, инспекция коммуникаций, моделирование, визуальная навигация, идентификация.

VISUAL NAVIGATION METHOD FOR ARRANGING INSPECTION OF UNDERWATER PIPELINE BY AUTONOMOUS ROBOT**Valery A. Bobkov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Computer Graphics Laboratory of
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690041, Vladivostok, st. Radio, 5
e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Mikhail A. Morozov

Lead Software Engineer, Computer Graphics Laboratory
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690041, Vladivostok, st. Radio, 5
e-mail: morozov@iacp.dvo.ru

Alexander V. Inzartsev

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Laboratory of Management Systems of
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690091, Vladivostok, st. Sukhanova 5a
e-mail: inzar@marine.febras.ru

Grigory D. Eliseenko

Researcher of the Laboratory of Management Systems of
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
690091, Vladivostok, st. Sukhanova 5a
e-mail: eliseenko_g@mail.ru

Abstract

The article reviews a simulation modeling solution to the problem of automatic inspection of underwater pipelines using autonomous underwater robots. The proposed method for determining the position of the robot in relation to the inspected pipeline in the immediate vicinity of the object is described. The method is based on the processing of video information and measurements of a linear laser using the method of visual navigation. Original pipeline identification algorithms are proposed for use with both mono and stereo cameras. Functional testing of the developed algorithms and performance evaluation was carried out on virtual scenes within the framework of the simulation modeling complex developed by the authors, distributed on a multiprocessor computing architecture. Computational experiments have shown that the accuracy of the calculated parameters of the relative position of the autonomous underwater robot and the pipeline meets the requirements of the autonomous underwater robot control system.

Key words: autonomous underwater robot, linear laser, underwater pipeline, inspection of communications, simulation, visual navigation, identification.

Введение

Подводные коммуникации, включая газовые и нефтяные трубопроводы, а также кабели, обеспечивающие связь и передачу электроэнергии, требуют регулярного контроля их состояния (т.е., проведения периодических инспекций). В задачи инспекции входит получение визуальной информации и сбор данных о состоянии объекта по всей его длине. Традиционные методы инспекции коммуникаций предполагают участие водолазов или использование телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Применение для этих целей автономных подводных роботов (АПР) в качестве носителя аппаратуры, регистрирующей состояние объекта, во многих случаях экономически более выгодно, поскольку минимизирует время использования обеспечивающих судов и позволяет в сжатые сроки произвести обследование всей коммуникации. Кроме того, АПР способны проводить инспекцию в зимнее время, когда доступ с поверхности может ограничиваться наличием плавучего льда.

Для решения задач инспекции АПР должен быть оборудован надежными средствами идентификации объекта. Типичная модель применения АПР для этих целей включает этапы предварительного обнаружения объекта с использованием дальнедействующих средств, сближения с объектом и прецизионного движения в окрестностях объекта на базе информации от близкодействующих средств распознавания. На первом этапе обычно используются акустические средства, обеспечивающие достаточную дальность обнаружения (гидролокаторы бокового, секторного или переднего обзора). Алгоритмы распознавания и определения характеристик локальных и протяженных донных объектов на акустических изображениях, а также организации выхода АПР к этим объектам достаточно хорошо проработаны [1-5]. В то же время комплекс проблем, связанных с организацией прецизионного этапа обследования, ещё нельзя считать полностью решенным. В первую очередь это относится к задаче инспекции объектов, которые из-за своих размеров требуют маневрирования АПР в пространстве, например, к трубопроводам (ТП). Использование АПР на этом этапе требует решения двух основных задач – точной локализации АПР для прецизионной навигационной привязки обнаруженных дефектов и

организации прослеживания, проходящей по морскому дну коммуникации (т.е. движения параллельно объекту на небольшом расстоянии от него).

Этой теме посвящен ряд исследований, в которых предлагается использование разных конфигураций сенсоров и алгоритмов обработки данных. В [6] авторы предлагают метод управления подводным аппаратом на основе объединения данных от различных сенсоров, включая камеру, многолучевой эхолот, донный профилограф и магнитный сенсор. Алгоритмы объединения данных и распознавания трубопроводов/кабелей используют вероятностные карты, в которых содержится информация о локации и рейтинге данных от каждого сенсора. В [7] описан метод управления подводным аппаратом, согласно которому генерируются путевые точки для следования АПР на заданном расстоянии от целевого объекта. В [8] система локализации АПР основана на использовании акустических сигналов и применении методов теории машинного обучения для устранения аномальных измерений и повышения точности измерений. В [9] описан алгоритм для сегментации трубопроводов и классификации некоторых событий. Для обнаружения границ трубопровода в различных сценариях применяются несколько методов обработки изображений и стратегий слежения, основанных на технологии глубокого обучения с использованием нейронных сетей и многослойного перцептрона на базе вейвлетов.

Настоящая статья посвящена проблеме инспекции подводного ТП с помощью АПР. Рассматривается организация прецизионного этапа обследования ТП. Предполагается, что ТП уже предварительно обнаружен дальнедействующими средствами, и АПР осуществил перемещение в окрестность ТП в зону действия близкодействующих средств. Предлагаемый подход к инспекции в целом базируется на авторском методе решения задачи слежения за ТП по видеоинформации, и задачи управления движением АПР вдоль ТП. Как часть реализации общего подхода, в данной статье рассматривается метод идентификации ТП в процессе движения АПР, основанный на обработке видеоинформации и измерений лазера. Моделирование миссии и оценка эффективности алгоритмов осуществляется в среде разработанного авторами моделирующего комплекса [10].

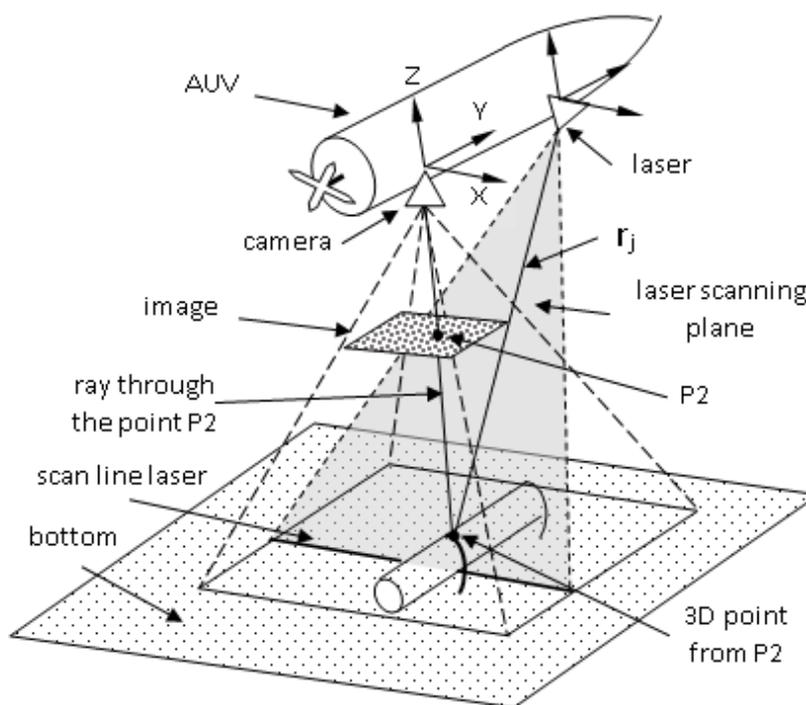


Рис.1.Сканирование линейным лазером синхронизировано со съемкой камеры. Искомая 3D точка трубопровода вычисляется как пересечение луча (из камеры через P2) с плоскостью сканирования лазера.

1. Визуальная идентификация объекта

Постановка задачи. Предполагается, что задача инспекции трубопровода будет решаться с помощью АПР, оснащенного стерео видеокамерой, линейным лазером и стандартным навигационным оборудованием, включающим: эхолоты с фиксированными диаграммами направленности, доплеровский лаг и комплекс навигационно - пилотажных датчиков. Линейный лазер формирует на снимках линию сканирования зеленого цвета в поле зрения видеокамеры, из которой обработкой снимков извлекается 3D информация о ТП. Съемка видеокамерой и работа лазера синхронизированы (рис.1.). Задача заключается в разработке системы локализации АПР, обеспечивающей надежное управление движением АПР вдоль подводного ТП, и метода отслеживания ТП. Система локализации, базируясь на методе визуальной одометрии, определяет и передает в систему управления параметры положения АПР относительно ТП (ориентацию АПР относительно видимой части ТП и расстояние до него) и скорость приближения к ТП. Метод отслеживания ТП основывается на разработке алгоритмов совместной обработки данных камеры и лазера, учитывающих специфику геометрии ТП.

Следует заметить, что в контексте данной постановки задачи: обеспечить планирование траектории АПР и управление его движением вдоль ТП - для целей локации достаточно точного вычисления текущего положения АПР относительно ТП. При этом исключается накопление ошибки локализации АПР, как правило,

имеющее место при вычислении абсолютных координат методом интеграции относительных перемещений. Вместе с тем необходимая локализация места повреждения ТП в абсолютных координатах может обеспечиваться расчетом пройденного пути от одной из реперных точек.

1.1 Визуальная навигация

В соответствии с логикой предлагаемого метода визуальной навигации будем использовать следующую терминологию. Траектория АПР состоит из позиций, в которых осуществляется съемка камерой и сканирование лазером. С каждой позицией связана стереопара снимков (на которых фиксируется линия сканирования лазером, и вычисляются 3D данные – расстояния до линии сканирования). Позиции, в которых выполняется обработка видеоданных и данных лазера, будем называть узловыми позициями. Шаг – это расстояние между узловыми позициями, которое можно измерять числом снятых кадров (оно является эквивалентом времени, поскольку известна частота съемки) (рис.2.). Фрагмент – это участок траектории, состоящий из нескольких шагов (в частности, может быть 1 шаг).

Результирующие данные локализации АПР передаются в систему управления по завершении обработки текущего фрагмента. К ним относятся: **S** - вектор направления движения АПР, **D** - вектор направления участка ТП, видимого на данном фрагменте траектории, **R** – минимальное расстояние до ТП, и **V** – скорость приближения к трубопроводу.

Локализация АПР выполняется методом визуальной навигации [11-13], основанным на обработке снимков стереопар двух позиций с помощью детектора SURF, трекара KLT и построении двух 3D облаков с последующим вычислением локальной матрицы геометрического преобразования h . Локальная матрица позволяет определить 6 DoF (6 degrees of freedom) относительного перемещения АПР за время Δt между соседними позициями траектории движения АПР. В данном случае локальные матрицы вычисляются на каждом шаге, а матрица H_i , определяющая перемещение АПР на фрагменте i траектории, получается перемножением локальных матриц h_k , где k = номер шага, а m – число шагов во фрагменте (рис.2). Тогда вектор S относительного перемещения АПР на фрагменте i определяется в связанной с АПР системой координат CS^i как $S = P(0, 0, 0) H_i$, где $P(0, 0, 0)$ точка начала CS^i в начальной позиции фрагмента i . Здесь CS^i - локальная система координат, связанная с позицией i траектории АПР.

1.2 Определение направления видимого участка трубопровода

Алгоритм распознавания ТП основывается на построении пространственных профилей по измерениям лазера и анализу геометрических характеристик, определяющих форму и направление ТП. Используется тот факт, что поперечные сечения ТП располагаются в пространстве вдоль направления ТП (рис.3), а в каждом сечении имеется характерная точка – точка максимальной высоты.

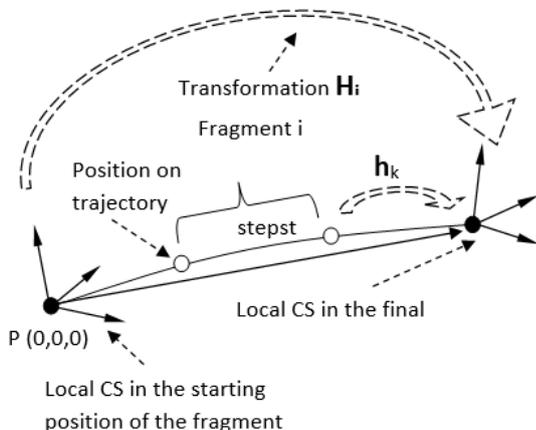


Рис.2. Вычисление относительного перемещения S на фрагменте.

Идея прослеживания заключается в последовательном поиске на каждом шаге траектории очередной характерной точки, которая близка к прогнозируемой линии продолжения ТП. В качестве прогнозируемой линии продолжения ТП рассматривается экстраполяция линии по нескольким последним найденным точкам ТП. В настоящей реализации это ломаная линия из двух

звеньев, построенная по 3-м последним точкам, найденным на предшествующем участке ТП. Она определяет кривизну ТП. Тогда выбор очередной 3D точки для продолжения ТП определяется требованием сохранения текущей кривизны. Выбирается та точка из возможных, которая наилучшим образом сохраняет изменение угла поворота ТП (рис.4). Такой способ позволяет отслеживать ТП и на криволинейных участках. На прямолинейных участках трубопровода прогнозируемая линия продолжения – прямая.

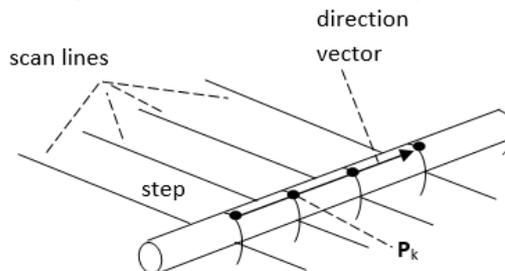


Рис.3. Характерные точки Pk, определяющие направление трубопровода.

Поскольку каждая из характерных точек определена в своей локальной CS, связанной с позицией траектории, необходимо перед вычислением прогнозируемой линии получить координаты этих точек в CS^i . Это делается с помощью получаемых методом визуальной навигации локальных матриц геометрических преобразований, которые связывают CS соседних позиций.

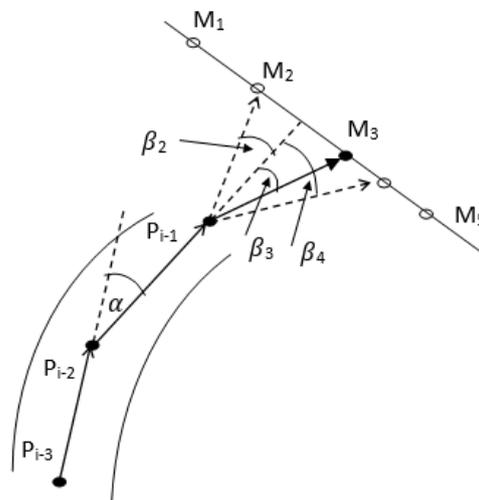


Рис.4. Поиск очередной точки Pi трубопровода: выбрана точка Pi = M3, для которой угол beta близок к углу alpha.

Рассмотрим две реализации алгоритма нахождения точек, принадлежащих ТП: а) монокамера и линейный лазер; б) стереокамера и линейный лазер.

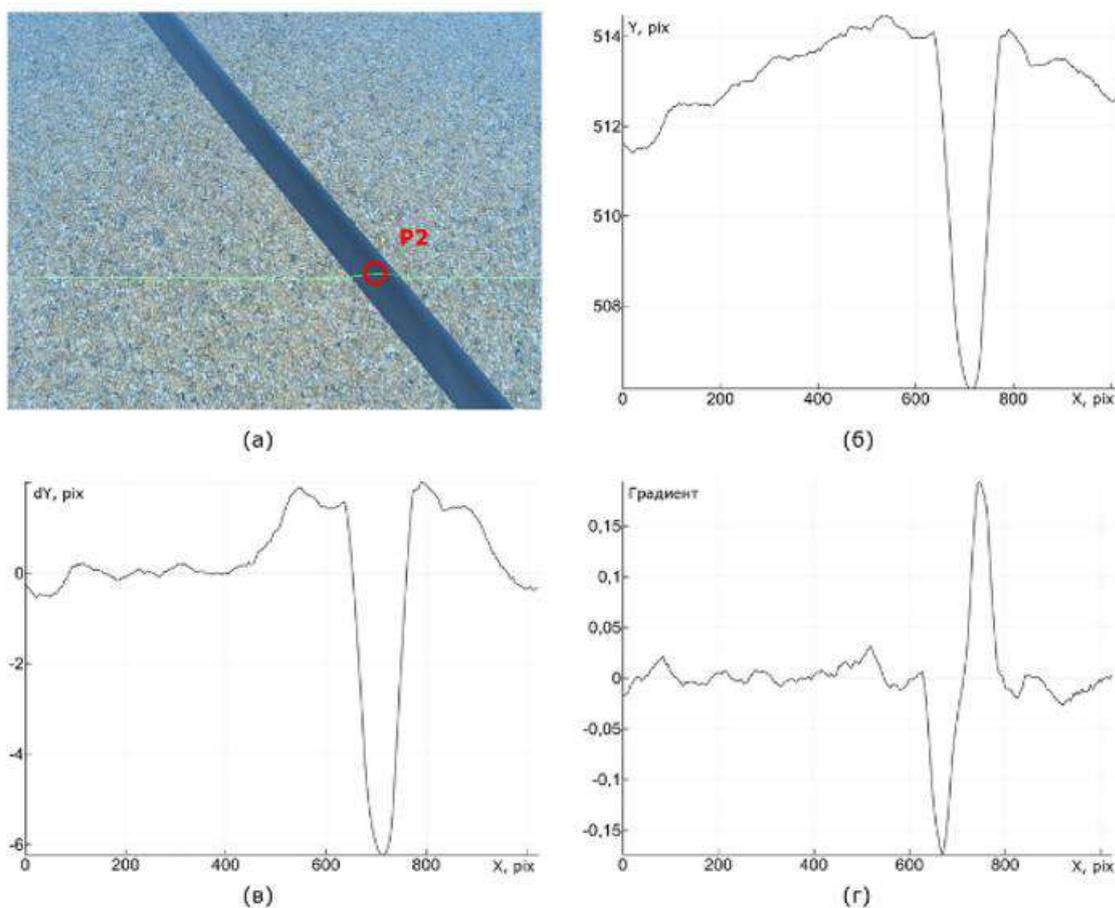


Рис 5. Поиск на изображении точек, потенциально принадлежащих ТП: а) исходное изображение с линией лазера; б) функция ФЛП; в) сглаженная функция ФЛП (ОФЛП); г) градиент ОФЛП

1.2.1 Алгоритм с использованием монокамеры

Согласно алгоритму, обработка данных состоит из следующих этапов:

- захват изображения с камеры;
- выделение на изображении лазерного профиля;
- построение дискретно заданной непрерывной функции лазерного профиля (ФЛП);
- фильтрация ФЛП:

а) исключение высокочастотного шума, связанного с дискретностью исходного изображения;

б) исключение низкочастотного шума, связанного с ландшафтом дна;

- расчет экстремумов на линии профиля и формирование набора 2D точек – кандидатов на принадлежность к ТП;
- вычисление 3D координат для полученных 2D точек;

- проверка критерия принадлежности точки ТП.

Получение функции лазерного профиля. Выделяются все пиксели на изображении, у которых зеленая компонента 99% от максимального значения, а две другие не превышают 80% (рис.5а). То есть берутся все пиксели от темно зеленого до светло зеленого, исключая белые пиксели и близкие к белому. Поскольку линия лазера на изображении имеет

толщину более одного пикселя, находится усредненное положение выделенных пикселей вдоль каждого столбца по Y на изображении. Далее недостающие значения в некоторых столбцах линейно интерполируются и сглаживаются фильтром “скользящее среднее” с размером окна 2% от ширины изображения (рис.5.б). Данное сглаживание необходимо для фильтрации высокочастотного шума, порождаемого пиксельной дискретизацией. Так как для нахождения трубопровода нам не важны абсолютные значения ФЛП, из нее удаляется низкочастотный шум, связанный с рельефом местности. Физический смысл низкочастотного фильтра заключается в том, чтобы оставить только те значения профиля, которые существенно отличаются от рельефа. После рассмотрения нескольких вариантов такого фильтра была выбрана следующая реализация фильтра.

Из исходного сигнала вычитается исходный сигнал, который сглажен “скользящим средним” с окном 20% от ширины изображения. Размер окна был выбран с учетом визуального размера трубопровода на изображении. Результат показан на рис. 5в.

Значения отфильтрованной ФЛП (ОФЛП) будут лежать в окрестности нулевого значения (рис.5в). Для вычисления всех точек, потенциально

принадлежащих ТП, ищутся все минимумы ОФЛП (первая производная равна 0), для которых ОФЛП по модулю больше некоторого порога. Порог определяет минимальное отклонение ОФЛП от рельефа, сопоставимое с локальными изменениями рельефа. В данной реализации величина порога выбрана равной 2-м пикселям. На рис.5г найденный минимум ОФЛП (нулевое значение) соответствует точке Р ТП.

Таким образом, в результате описанной обработки изображения получаем набор 2D точек - кандидатов на принадлежность к ТП, из которых предстоит далее выбрать одну, наиболее вероятную.

Вычисление 3D координат точек профиля. Исходим из того, что положение и ориентация установленной на АПР камеры и линейного лазера известны. В рассматриваемой виртуальной сцене, связанные с ними системы координат различаются только сдвигом по оси Y (направление движения АПР). CS камеры ориентирована следующим образом: Y - направление вдоль АПР; Z - верх АПР; X - вправо. Лазер установлен таким образом, чтобы плоскость светового пучка была параллельна оси X камеры (рис. 1). В данном случае лазер установлен в точке (0, 1, 0) в CS камеры и имеет направление (0, -0.4, -1) (такая конфигурация обеспечивает визуальное обнаружение трубопровода на глубине от 4 до 8 метров). Известная геометрия взаиморасположения камеры и лазера позволяет вычислять 3D координаты любой точки линии лазерного профиля на изображении.

Пусть P2 – точка на изображении, принадлежащая профилю (рис.5). Тогда соответствующая ей 3D точка в сцене, согласно приведенному на рис.1 геометрическому построению, вычисляется как точка пересечения луча, проведенного из камеры в P2, с плоскостью сканирования лазера.

Проверка критерия принадлежности точки трубопроводу. Для каждой из полученных 3D точек-кандидатов на принадлежность ТП выполняется проверка критерия принадлежности с помощью описанного выше алгоритма учета текущей кривизны ТП.

1.2.2 Алгоритм с использованием стереокамеры

В заданной конфигурации стереокамера и лазер установлены таким образом, что линия лазерного профиля проходит вдоль строки изображения. При этом левое и правое изображение стереопары выровнены (строки изображений параллельны). Это позволяет упростить получение 3D координат точек лазерного профиля за счет известной геометрии взаимного расположения камеры и лазера, и возможности применения алгоритма вычисления карты диспаратности.

Тогда обработка очередного (текущего) фрагмента i траектории состоит из следующих этапов:

- идентификация линий лазера на снимках стереопары. Вычисление диспаратности для строки изображения, через которую проходит линия лазера;
- вычисление методом триангуляции лучей 3D координат пространственных точек сцены, отвечающих пикселям строки. Результат – функция

профиля $f(r_j)$, где r_j – расстояние до j-ой точки профиля (рис.1);

- анализ $f(r_j)$ с вычислением локальных экстремумов. Результат – множество 3D точек экстремумов в CSⁱ, которое обозначим как {M};

- три предшествующие точки ТП P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1} (рис.4), каждая из которых определена в локальной CS соответствующей позиции, помещаем в CSⁱ, применяя предварительно полученные матрицы геометрических преобразований:

$$P_{i-3}^{CS^i} = P_{i-3}^{CS^{i-3}} \cdot H_{i-3,i-2} \cdot H_{i-2,i-1} \cdot H_{i-1,i}; \quad P_{i-2}^{CS^i} = P_{i-2}^{CS^{i-2}} \cdot H_{i-2,i-1} \cdot H_{i-1,i}; \quad P_{i-1}^{CS^i} = P_{i-1}^{CS^{i-1}} \cdot H_{i-1,i};$$

- по трем точкам в CSⁱ {P_{i-3}^{CSⁱ}, P_{i-2}^{CSⁱ}, P_{i-1}^{CSⁱ}} строим два звена ломаной линии, которые определяют текущий угол поворота ТП. И ищем среди точек множества {M} в CSⁱ точку P_i^{CSⁱ}, наилучшим образом отвечающую указанному выше критерию сохранения текущей кривизны ТП. Проверка критерия построена, как было описано выше, на сравнительной оценке углов поворота. Здесь используем следующие обозначения:

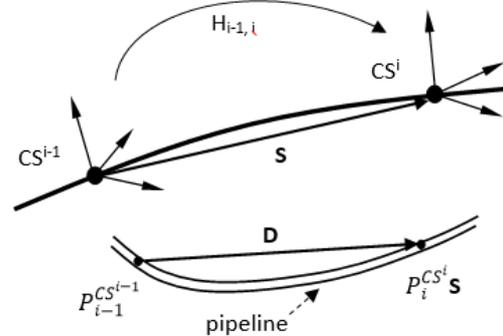


Рис.6. Вычисление взаимного положения векторов S и D на текущем фрагменте.

P_k^{CSⁱ} – пространственная точка (на ТП) с номером k, заданная в локальной системе координат СКⁱ, которая связана с позицией i;

H_{i,j} – матрица геометрического преобразования, связывающая CSⁱ и CS^j.

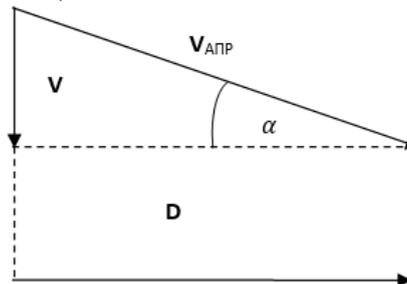


Рис.7. Вычисление скорости приближения АПР к трубопроводу.

1.2.3 Определение параметров взаимного расположения АПР и ТП

Вычисление углов рассогласования направления ТП и направления движения АПР, необходимых для работы системы управления движением АПР в режиме слежения. Эти углы определяются взаимным положением векторов D (вектор направления ТП в текущей позиции i) и S (вектор

текущего перемещения АПР, вычисляемый системой визуальной навигации).

Вектор $\mathbf{D} = P_i^{CS^i} - P_{i-1}^{CS^{i-1}} \cdot H_{i-1,i}$ (см. рис.6).

Оба вектора - \mathbf{S} (S_x, S_y, S_z) и \mathbf{D} (D_x, D_y, D_z) заданы в системе координат, связанной с АПР. Ось Y направлена по движению АПР. Исходим из того, что движение АПР осуществляется без крена. Тогда угол рассогласования по курсу α определяется взаимным положением проекций векторов \mathbf{S} и \mathbf{D} в плоскости XY, т.е.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(\mathbf{S} \cdot \mathbf{D})}{|\mathbf{S}| \cdot |\mathbf{D}|} \right)$$

Здесь $(\mathbf{S} \cdot \mathbf{D})$ – скалярное произведение двух векторов.

Аналогичным образом угол рассогласования по дифференту

$$\beta = \arccos \left(\frac{(\mathbf{S} \cdot \mathbf{D})}{|\mathbf{S}| \cdot |\mathbf{D}|} \right)$$

Вычисление ближайшего расстояния R от АПР до ТП.

В качестве R вычисляется расстояние до точки $P_i^{CS^i}$ в CS^i .

Скорость приближения АПР к ТП V определяется исходя из вычисленного вектора перемещения АПР \mathbf{S} на текущем фрагменте и вектора направления ТП \mathbf{D} при известной частоте съемки f и длине фрагмента в кадрах n (рис. 7).

$V = V_{АПР} \cdot \sin \alpha$; где $\alpha = \arccos \left(\frac{(\mathbf{S} \cdot \mathbf{D})}{|\mathbf{S}| \cdot |\mathbf{D}|} \right)$. При $[\mathbf{S} \times \mathbf{D}] / |[\mathbf{S} \times \mathbf{D}]| > 0$ АПР приближается к ТП со скоростью V , при $[\mathbf{S} \times \mathbf{D}] / |[\mathbf{S} \times \mathbf{D}]| < 0$ - удаляется от ТП.

Здесь $[\mathbf{S} \times \mathbf{D}]$ – векторное произведение двух векторов.

2. Вычислительный эксперимент

Вычислительные эксперименты по оценке эффективности описанных алгоритмов идентификации трубопровода проводились на виртуальных сценах в среде разработанного авторами имитационного моделирующего комплекса [10]. Комплекс использовался в пространственно-распределенной конфигурации, состоящей из двух компонентов (рис. 8).

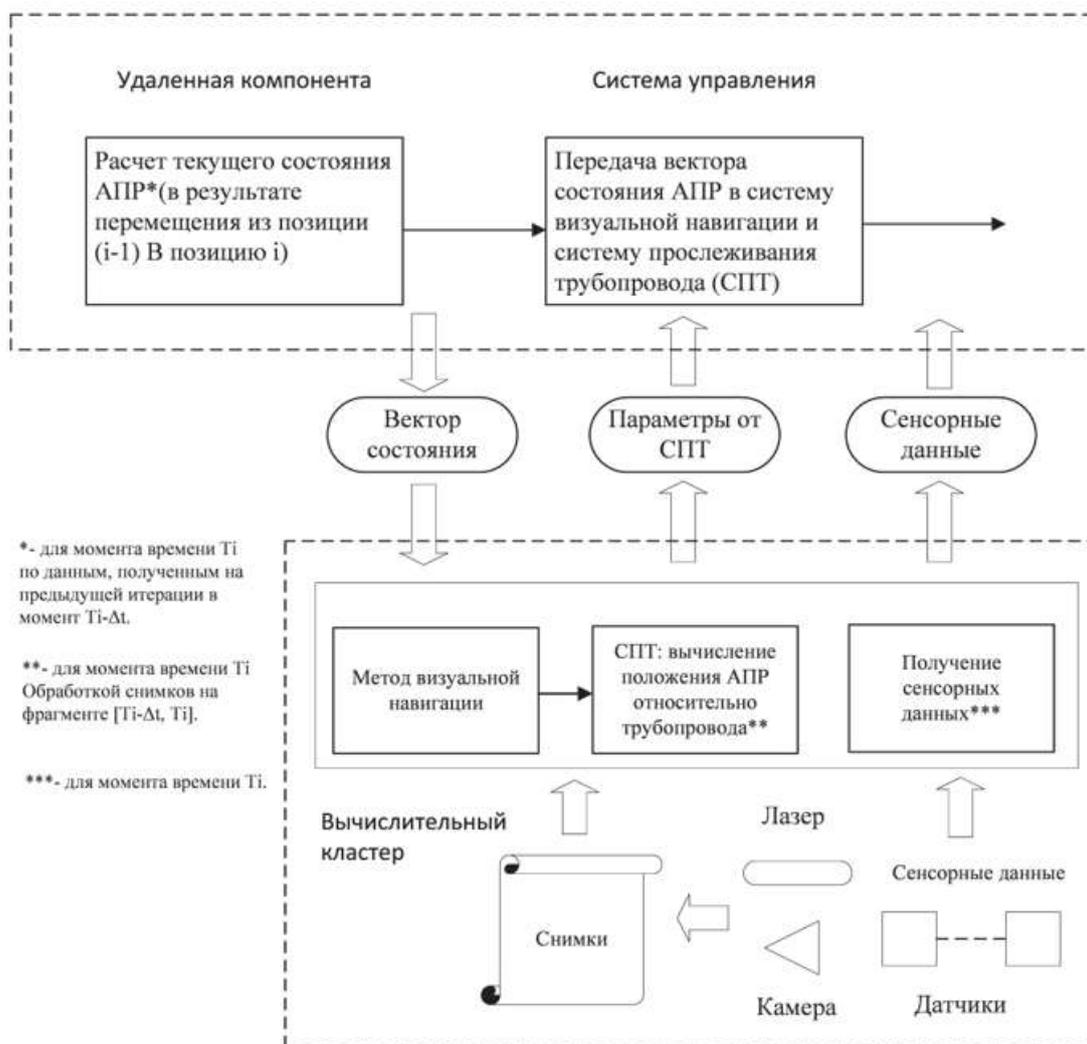


Рис. 8. Схема взаимодействия компонент ПО ИПМТ и ИАПУ на очередной итерации обработки данных

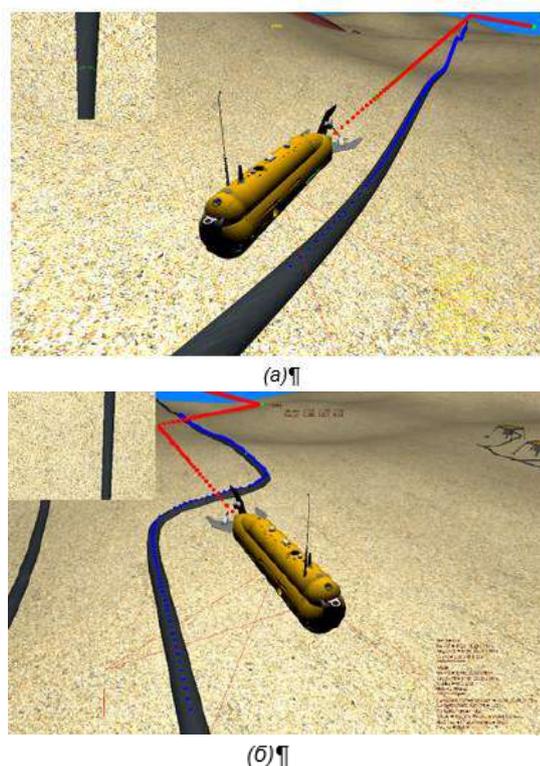


Рис.9. Виртуальная сцена. Прослеживание ТП-с помощью АПР. оснащенного камерой и профильным лазером: а) прохождение прямолинейного участка; б) прохождение криволинейного участка

Основной компонент системы, обеспечивающий моделирование работы датчиков внешней среды, а также получение и обработку видеoinформации, функционировал в комплексе, объединяющем персональный компьютер и гибридный вычислительный кластер. Система управления АПР работала в режиме удаленного доступа и обеспечивала непосредственное формирование траектории по поступающим данным от основного компонента. При этом пространственное движение АПР имитировалось с использованием динамической модели, входящей в состав системы управления АПР [14]. Такая организация работы обеспечивает более удобное взаимодействие двух исследовательских групп,

совместно работающих над разными аспектами одной задачи управления. Кроме того, отладка алгоритмов распознавания ТП ведется в программной среде целевой системы управления АПР.

На рис. 9 показана одна из виртуальных сцен с вариантами прохождения АПР прямолинейного и криволинейного (два поворота на 90° с радиусом округления 5 м) участков ТП. Были заданы следующие значения определяющих параметров: скорость движения АПР - 1 м/с, частота кадров - 2 FPS, высота траектории над ТП - от 3 до 10 метров, диаметр ТП - 0.5м. АПР прошел над каждым участком ТП путь длиной в 200 м. Алгоритм обеспечил прослеживание ТП без ошибок. В процессе движения в каждом случае было найдено около 400 точек, лежащих на ТП. Погрешность вычисляемой локализации точек не превысила 0.9 см.

Погрешность вычисления требуемых для системы управления АПР параметров взаимного расположения АПР и ТП также находилась в допустимых пределах.

Заключение

В работе представлен метод идентификации и прослеживания ТП при выполнении АПР инспекционной миссии. Метод основывается на совместной обработке видеoinформации и измерений линейного лазера. Для локализации АПР относительно ТП используется авторский метод визуальной навигации. Предложенные алгоритмы идентификации ТП протестированы на виртуальных сценах в супервизорном режиме в рамках имитационного моделирующего комплекса, распределенного на многопроцессорной вычислительной архитектуре. В конечной версии системы планируется реализация метода управления движением АПР вдоль ТП в автоматическом режиме.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-07-00165), Программы «Дальний Восток» (проект № 18-5-014 (раздел 2)), и Программ Президиума РАН № 27 «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров» и № 29 «Актуальные проблемы робототехнических систем».

Литература

1. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev, In-Tech Publishers, Vienna, January, 2009, 582 pages, pp. 215-234, open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles
2. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Мельман С.В., Морозов М.А. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника, №1 (11), 2011, С. 17-23.
3. Inzartsev A., Pavin A., Rylov N. Development of the AUV Automatic Docking Methods Based on Echosounder and Video Data // Proceedings of 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 29-31 May 2017, Saint Petersburg, Russia, pp. 178-184.
4. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк. [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН.- Владивосток, 2018. 368 стр.
5. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника, № 2(22), 2016, С. 36-43.

6. Marco Jacobi, Divas Karimanzira, "Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs", *Oceans - St. John's 2014*, pp. 1-6, 2014.
7. Marco Jacobi, Divas Karimanzira. Guidance of AUVs for Autonomous Underwater Inspection. *Automatisierungstechnik* 63(5): 380-388 (2015).
8. Breno C. Pinheiro, Ubirajara F. Moreno, João T. B. de Sousa, Orlando C. Rodríguez, "Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles", *Oceanic Engineering IEEE Journal of*, vol. 42, pp. 603-618, 2017, ISSN 0364-9059.
9. Felipe R. Petraglia, Roberto Campos, José Gabriel R. C. Gomes, Mariane R. Petraglia, "Pipeline tracking and event classification for an automatic inspection vision system", *Circuits and Systems (ISCAS) 2017 IEEE International Symposium on*, pp. 1-4.
10. Sergey Melman, Valery Bobkov, Alexander Inzartsev, Alexander Pavin. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior / Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC, October 19-22, 2015, ISBN DVD: 978-0-933957-43-5.
11. V.A. Bobkov, Yu.I. Ron'shin, A. P. Kudryashov, and V.Yu. Mashentsev. 3D SLAM from Stereoimages // Programming and Computer Software, 2014, Vol. 40, No. 4, 2014, pp. 159–165.
12. V.A. Bobkov, A.P. Kudryashov, S.V. Mel'man, A.F. Shcherbatyuk. Autonomous Underwater Navigation with 3D Environment Modeling Using Stereo Images // Gyroscopy and Navigation, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67–75.
13. V.A. Bobkov, S.V. Mel'man and A.P. Kudryashov. Fast computation of local displacement by stereo pairs // Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, Vol. 27, No. 3, pp. 458–465.
14. Елисеенко Г.Д., Павин А.М. Программное обеспечение подготовки и сопровождения миссии АНПА // Подводные исследования и робототехника, № 2 (16), 2013, С. 16-23.

References

1. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev, In-Tech Publishers, Vienna, January, 2009, 582 pages, pp. 215-234, open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles
2. Bagnitskiy A.V., Inzartsev A.V., Pavin A.M., Mel'man S.V., Morozov M.A. Model'noe reshenie zadachi avtomaticheskoy inspektsii podvodnykh truboprovodov s pomoshch'yu gidrolokatora bokovogo obzora, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, No 1 (11), 2011, pp. 17-23.
3. Inzartsev A., Pavin A., Ryllov N. Development of the AUV Automatic Docking Methods Based on Echosounder and Video Data, Proceedings of 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 29-31 May 2017, Saint Petersburg, Russia, pp. 178-184.
4. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye / A.V. Inzartsev, L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, Yu.V. Matvienko, A.M. Pavin, A.F. Shcherbatyuk. [otv. red. L.V. Kiselev]; FGBUN In-t problem morskikh tekhnologiy DVO RAN.- Vladivostok, 2018, p. 368.
5. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Lebedko O.A., Panin M.A. Raspoznavanie i obsledovanie malorazmernykh podvodnykh ob"ektov s pomoshch'yu avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov // *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, No 2(22), 2016, pp. 36-43.
6. Marco Jacobi, Divas Karimanzira, "Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs", *Oceans - St. John's 2014*, pp. 1-6, 2014.
7. Marco Jacobi, Divas Karimanzira. Guidance of AUVs for Autonomous Underwater Inspection. *Automatisierungstechnik* 63(5): 380-388 (2015).
8. Breno C. Pinheiro, Ubirajara F. Moreno, João T. B. de Sousa, Orlando C. Rodríguez, "Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles", *Oceanic Engineering IEEE Journal of*, vol. 42, pp. 603-618, 2017, ISSN 0364-9059.
9. Felipe R. Petraglia, Roberto Campos, José Gabriel R. C. Gomes, Mariane R. Petraglia, "Pipeline tracking and event classification for an automatic inspection vision system", *Circuits and Systems (ISCAS) 2017 IEEE International Symposium on*, pp. 1-4.
10. Sergey Melman, Valery Bobkov, Alexander Inzartsev, Alexander Pavin. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior / Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC, October 19-22, 2015, ISBN DVD: 978-0-933957-43-5.
11. V.A. Bobkov, Yu.I. Ron'shin, A. P. Kudryashov, and V.Yu. Mashentsev. 3D SLAM from Stereoimages, Programming and Computer Software, 2014, Vol. 40, No. 4, 2014, pp. 159–165.
12. V.A. Bobkov, A.P. Kudryashov, S.V. Mel'man, A.F. Shcherbatyuk. Autonomous Underwater Navigation with 3D Environment Modeling Using Stereo Images, Gyroscopy and Navigation, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67–75.
13. V.A. Bobkov, S.V. Mel'man and A.P. Kudryashov. Fast computation of local displacement by stereo pairs, Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, Vol. 27, No. 3, pp. 458–465.
14. Eliseenko G.D., Pavin A.M. Programmnoe obespechenie podgotovki i soprovozhdeniya missii ANPA, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, No 2 (16), 2013, pp. 16-23.

УДК 159.9:656.61

**ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
«НЕСЕНИЯ СУДОВОЙ ВАХТЫ»****Фирмин Дживо Кукуи**кандидат технических наук, ведущий инженер управления по транспортному обеспечению
ООО «Газпром нефть шельф»183038 Мурманск, ул. Карла Маркса д.19.
тел. +7(911) 063 59 66, e-mail: kukui-murmansk@mail.ru**Марин Любенов Маринов**кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Института проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13,
тел. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com**Юрий Евгеньевич Крылов**Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Института проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13,
тел. (812) 321-95-68 e-mail: krylov_yuriy@mail.ru**Сергей Николаевич Турусов**доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО
„Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт
электромашиностроения (ВНИТИ ЭМ)“
196105, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 2,
тел.: 8(812) 369-93-61 e-mail: office@vnittem.ru**Аннотация**

В статье рассматриваются психологические и психофизиологические аспекты (возможностей, желаний, способностей и т.п.) при подборе судовых специалистов для формирования судовой вахты. Показано, что эффективность и безопасность функционирования системы «несения судовой вахты» во многом зависят от психологического и психофизиологического состояния судового персонала, в общем, и вахтенной службы в частности. Доказано, что высокое качество подготовки судового персонала – одно из основных требований современных стандартов безопасности. Представлены методы принятия управленческих решений по обеспечению эффективного функционирования системы «несения судовой вахты» с учетом присущих судовому коллективу мотивационных качеств, ответственности, ценности; и составлена последовательность действий судового персонала, позволяющая удовлетворительно решить задачу по обеспечению безопасности мореплавания. Приведена функция мотивация судового персонала, и составлена математическая модель стимулирования слаженности вахтенной службы. Для составления данной модели использованы, общеизвестны в теории вероятности и математической статистике методы.

В результате исследования, постановка и решение задачи мотивации слаженности в составе вахтенной службы с учетом индивидуальных представлений субъектов и при установленном администрацией судна ресурсе на реализацию мотивационных интересов позволит добиться того, чтобы надежность слаженности любого представителя вахтенной службы была равна надежности слаженности всего вахтенного коллектива.

Ключевые слова: несение вахты, безопасность мореплавания, психологические аспекты, психофизиологические аспекты лидерские качества, мотивация, слаженность судового персонала, ответственность.

**REGARDING ENSURING THE EFFECTIVE FUNCTIONING OF THE
“WATCHKEEPING” SYSTEM****Firmin Jivo Kukui**Ph.D., Leading engineer of transportation support department
LLC Gazprom Neft Shelf183038, Murmansk, st. Karla Marxa, 19
tel. : +7(911) 063 59 66, e-mail: kukui-murmansk@mail.ru**Marin Lyubenov Marinov**PhD in Engineering Science, Senior Research Scientist
Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St.
Petersburg, V.O. 12 line, 13,

tel. : +7 (812) 321-95-68, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Yury E. Krylov

PhD in Engineering Science, Senior Researcher

Transport Problems Institute named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13,
tel. : +7 (812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru

Sergey N. Turusov

Dr.Sci.Tech, professor, General Director of JSC

“All-Russian Research and Development Design and Technological Institute of Electrical Engineering (VNITI EM)”
196105, St. Petersburg, Blagodatnaya st., 2
tel. : 8(812) 369-93-61 e-mail: office@vnitiem.ru

Abstract

The article discusses the psychological and psycho-physiological aspects (capabilities, desires, abilities, etc.) in selection of shipboard specialists for organization of a ship's watchkeeping. It is shown that the efficiency and safety of functioning of the “ship's watchkeeping” system largely depends on the psychological and psycho-physiological state of the ship's crew, in general, and watchkeeping in particular. It is proved that high quality training of shipboard crew is one of the basic requirements of modern safety standards. Methods for making management decisions to ensure the effective functioning of the “ship's watchkeeping” system were presented, taking into account the motivational qualities, responsibility, and values inherent to a ship's crew; and a sequence of actions of shipboard crew has been drawn up, which allows satisfactorily solving the task of ensuring the safety of navigation. The motivation function of the shipboard crew is given, and a mathematical model of encouraging coordination of watchkeeping is made. For compilation of this model, well-known in the theory of probability and mathematical statistics methods have been used.

As a result of the study, the formulation and solution of the task of motivating integration as part of the watchkeeping, taking into account individual views of subjects and with the resource set by the administration of the vessel for implementation of motivational interests, will ensure that the fail-safe integration of any member of the watchkeeping be equal to fail-safe integration of the whole watchkeeping personnel.

Key words: watchkeeping, safety of navigation, psychological aspects, psycho-physiological aspects of leadership qualities, motivation, crew integration, responsibility.

Введение

Практика современного безопасного мореплавания показывает, что, несмотря на постоянное совершенствование технических средств, и «человеческого фактора», обеспечение безопасной эксплуатации судов продолжает оставаться острой проблемой в морской транспортной и рыболовной индустрии, а предупреждение судовых аварий является злободневной практической задачей. Накоплено достаточно много печального опыта свидетельствующего о том, что в качестве постоянной причины, аварийности морских судов, выступает судоводитель (оператор средства повышенной опасности) или субъект, управляющий движущимся объектом [8]. Поэтому усилия по предупреждению аварийности эксплуатируемых морских судов помимо прочего должны предусматривать поиск неиспользованных возможностей по снижению доли «человеческого фактора» или по терминологии ИМО «человеческого элемента» в общем объеме аварийности на мировом транспортном и рыболовном флоте [8].

Функции судового специалиста, несущего ходовую вахту весьма разнообразны и обычно включают прием, ретрансляцию, анализ, интерпретацию и контроль информации, выработку команд, принятие и исполнение решений. При этом судоводитель специалист все более и более отделяется от объектов управления и вынужден, поэтому принимать и оценивать их состояние не непосредственно, а по кодированной информации, при этом требуемая скорость реакции на сигналы о состоянии управляемого объекта постоянно возрастает. Очевидно, что проблема

«человеческого элемента» сложна, и включает множество возможных направлений для исследований и разработок, которые должны способствовать снижению негативного влияния судового и берегового персонала на процесс эксплуатации судов. Такое снижение должно происходить за счет компенсации недостатков, присущих людям, и эффективного использования их знаний, опыта, творческих и других способностей.

1. Профессионализм и психофизиологические аспекты судового персонала при обеспечении безопасного функционирования судовой ходовой вахты

Принципы несения ходовой вахты на судне и принятие надежных управленческих решений одобрены международным морским сообществом путем принятия стандартов безопасного управления состоянием безопасности. Эти принципы изложены в Международных Конвенциях и Кодексах к ним. Так Международная Конвенция СОЛАС 74/78 в девятой главе и международном Кодексе управления безопасностью (МКУБ) к ней сосредотачивает внимание на тех элементах управленческих систем, которые гарантированно отвечают требованиям по обеспечению безопасной эксплуатации судна. Принципы, отраженные в Конвенции СОЛАС 74/78, в ее девятой главе и МКУБ, могут быть с успехом использованы в широком диапазоне различных управленческих систем транспортных и рыболовных компаний как стандарты. Как таковые, стандарты утверждены Международной Морской Организацией (ИМО) в резолюции А.647(17) и в этой же резолюции было признано, что стандарты

должны применяться в области морского судоходства.

Наличие регламентирующей документации в системе безопасной эксплуатации судна не лишает людей свободы действий. Эти действия в рамках внутрисистемного управления способны породить ошибки. Поэтому из задач управления организационными системами типа СУБ наиболее важными являются подбор и подготовка кадров. Однако стандарты не дают ответа на вопрос, каким образом следует подбирать персонал, распределять обязанности и полномочия между отдельными членами коллектива судовой вахты. Задачу подбора специалистов «по местам работы» можно решить, если сделать следующие допущения. Каждый член коллектива судовой вахты, имеет «портрет» специалиста, который характеризуется набором оценок по ряду критериев, таких, например, как способности к организационной работе, склонность к исследовательской работе. С другой стороны, каждое рабочее место, нуждающееся в специалисте, может «выдвинуть» ряд требований к нему, таких как характер работы, уровень квалификации иными словами так же обладает «портретом». От перечня критериев оценок и требований рабочего места ясно, что производительность труда и атмосфера в коллективе зависят от того, насколько возможности каждого специалиста, отраженные в его портрете, будут учтены при распределении работ. В идеальном случае портрет рабочего места должен полностью соответствовать портрету специалиста.

В СУБ компании всегда имеется лицо (назначенное лицо), которое принимает решение о соответствии качеств «портрета» специалиста требованиям «портрета» рабочего места. На судне такие решения, как правило, принимают начальники служб. Поэтому начальнику службы необходимо определить *n* наиболее близких по своим характеристикам пар «судовой специалист – рабочее место». Сформулированная таким образом задача о назначениях решает проблему соответствия.

При несении судовой вахты существует две внутренние формы разделения труда. Первая – это разделение труда на компоненты, составляющие части общей деятельности, т.е. горизонтальное разделение труда. Вторая, называемая вертикальной, отделяет работу по координированию действий от самих действий. Деятельность по координированию работы других людей и составляет сущность управления. Можно считать, что эффективность работы в организации определяется степенью и уровнем развития вертикального разделения труда. Таким образом, решая задачу о назначениях, начальники судовых служб создают условия, при которых вахтенный коллектив способен успешно обеспечивать безопасное и эффективное функционирование судовой ходовой вахты.

Любая деятельность персонала в составе ходовой вахты осуществляется ради какого-то результата. Чтобы достичь его, отдельный специалист должен предпринять ряд действий в определенном направлении. Направленность действий и задает первую координату успешности

деятельности. При этом понятия деятельность, движение, направление нужно рассматривать расширительно. Это не просто элементарная физическая деятельность, но и мыслительная, где направление задается желанием осмыслить что-то, а результатом является какой-то вывод, законченная мысль, при этом движение является последовательными шагами, где каждая следующая мысль основана на результатах предыдущей.

При рассмотрении качества любой деятельности, в том числе и управленческой, деятельность судового специалиста по своей сути должна быть трехмерной и может приводить к результату, только если, персонал вахты:

- в полной мере осознает цель, поставленную перед судовыми специалистами;
- имеет устойчивый мотив достижения заданного результата;
- обладает достаточными способностями, необходимыми для выполнения этой деятельности.

Целью движения вахтенного коллектива является то, в каком направлении ему нужно двигаться, чтобы достичь конкретного результата. Чем отчетливее это представление, тем короче путь, который проделает судовый специалист, чтобы реализовать свою и общую цель. Если цель размыта, то человек и вахтенный коллектив может попросту блуждать, пытаясь достичь того, что плохо понимает. Если цель ложная, то нужный результат никогда не будет достигнут. Важно отметить, что отчетливые представления о направлении включают в себя представления о действиях, которые нужно проделать, чтобы достичь требуемого результата при необходимом для этого ресурсе.

Если судовому специалисту будут заведомо известны все шаги, которые ему нужно пройти, чтобы достичь заданного результата и если во время движения он тщательно выполнит свои действия, и не будет отклоняться, то получит требуемый результат. При этом движение в заданном направлении можно однозначно считать качественным. И наоборот, нельзя требовать от вахтенного качественного действия, если перед ним ставятся неясные цели. Однако постановка предельно ясной цели вовсе не гарантирует, что человек будет двигаться к заданной цели кратчайшим путем. Другими словами, мало поставить перед вахтенным ясную цель, нужно еще добиться, чтобы он шел к ней и не отклонялся. Поэтому за вторую координату успешной деятельности при выполнении судовых операций при несении ходовой вахты можно принять мотивацию специалиста.

Мотив – это внутренняя побудительная сила, которая определяет готовность судового специалиста, стремится к заданной цели. Это стремление является основной движущей силой, опосредующей всю его деятельность. Основной, но не единственной. Дело в том, что специалиста всегда окружают другие специалисты, на него воздействуют различные обстоятельства. При этом собственные интересы специалиста из состава вахтенной службы сталкиваются с интересами других специалистов, а обстоятельства создают

преграды, которые нужно либо учитывать, как некую непреодолимую силу, либо преодолевать. В конечном итоге при реализации цели специалист все это взвешивает и принимает решение, куда все-таки ему двигаться в данный момент времени.

Здесь следует особо отметить, что можно ставить сколь угодно ясные цели, но, если вахтенный не мотивирован на их достижение, ничего не получится. Точно так же можно сколь угодно сильно мотивировать специалиста и коллектив вахты выполнять свои обязанности безопасно и качественно, но если перед ним не поставлена ясная цель, то специалист в составе вахты попросту не будет знать, куда двигаться.

Для воплощения целей, стоящих перед специалистом, требуются определенные способности. Поэтому третьей координатой успешной деятельности судового специалиста можно считать его способность осуществлять данную деятельность в составе вахтенного коллектива. Способность – это владение специалистом способами неизменно достигать значимых результатов при несении судовой ходовой вахты. Из этого определения следует, например, что любые способности можно развивать, для чего достаточно вооружить человека новыми способами действий. Другой вопрос, что не всегда и не всем эти способы известны, овладение способами может потребовать значительного времени, и у одних людей это будет «хорошо» получаться, а у других нет.

Судовые специалисты из одного и того же состава вахты ясно осознающие цели и имеющие одинаковые индивидуальные или специальные способности могут кардинально отличаться друг от друга качеством и силой мотивации. Дело в том, что стремление самоутвердиться, проявить себя в вахтенном коллективе ставит специалиста перед необходимостью занять определенную позицию по отношению к этому коллективу в целом. Позиция специалиста – это его устойчивый взгляд на свои возможности и способности изменить что-либо при несении вахты с ясным осознанием того, что ему ожидать в ответ на свою активность. Позицию можно выразить через зависимости, присущие любому специалисту, а также через свободу в деятельности, которую он сумел достичь.

2. Слаженность судового персонала при несении ходовой вахты

Первый шаг к налаживанию отношений в вахтенном коллективе это делегирование полномочий. Уже давно замечено, что решения и действия тем эффективнее, чем ближе к источнику информации расположен механизм принятия решений. Делегирование полномочий основано на доверии, а доверие – один из самых важных элементов атмосферы, предназначенной для эффективной работы в жестких организационно-технических системах. Доверие создаёт предпосылки для открытости информационных потоков в вахтенном коллективе и прозрачности. Прозрачность информационных потоков в свою очередь способствует слаженности персонала вахты, и делегированию этому персоналу полномочий.

Слаженность вахтенного коллектива будет усиливаться, если вахтенный помощник будет использовать принципы парасипативного управления персоналом вахты. Принципы парасипативного управления заключаются в том, что всем членам вахтенного коллектива предоставляется реальная возможность участвовать в управлении состоянием безопасности навигации и состоянием безопасной эксплуатации судна в целом. На практике это означает, что персонал ходовой вахты должен иметь систематическую возможность участия в выработке и реализации управленческих решений. Такая возможность рождает в вахтенном коллективе чувство сопричастности, которое резко усиливает мотивацию к обеспечению безопасности. Поэтому организуя вахтенную службу необходимо стремиться к тому, чтобы индивидуальные цели каждого вахтенного, так или иначе, совпадали с целями структуры несения вахты в целом. В такой команде каждый будет хорошо понимать свои обязанности, и выполнять их в рамках своих должностных инструкций. При таком подходе к управлению вахтенным коллективом каждый будет гордиться своей работой. Конечно, материальное стимулирование играет далеко не такую важную роль как те стимулы, о которых говорилось выше, но всё-таки они тоже важны.

Пусть управление состоянием слаженности в коллективе ходовой вахты («человеческом элементе») реализуется в открытой двухуровневой системе. При этом центром и органом планирования и управления слаженностью субъектов в «человеческом элементе» судовой вахты осуществляет капитаном судна. Пусть далее вахтенный коллектив состоит из m субъектов

$(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ которые

обладают собственными представлениями об отношении «труд – вознаграждение» а, в общем, для всего «человеческого элемента» эти отношения обладают случайным характером. Кроме того, судовой «человеческого элемента» состоит из классов субъектов D_i объединенных по характеру профессиональной деятельности (палубная команда, машинная команда).

Процесс управления слаженностью в «человеческом элементе» будем рассматривать за ряд последовательных периодов $k = 0, 1, \dots$

Пусть в $k - m$ периоде в профессиональном классе D_i появляется или образуется конфликт в отношении «труд – вознаграждение» с численным смещением R в сторону одной из двух компонент равным величине r_{ik} по $i \in I$. Пусть далее

$r_{ik} = r_k = const$ при $\forall k$, причем общее смещение в отношении «труд – вознаграждение» R , равен сумме r_i по $i \in I$, а величины r_i и

R известны как высшему руководству компании, так и капитану судна. Более того, субъектам из числа судового «человеческого элемента»

$(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ известны с точностью до некоторых принимаемых ими оценок, далее называемых субъективными оценками, величины r_i и R . Если принять, что удовлетворение C_k запроса величины R формируется в высшем руководстве компании и устанавливается в социотехнической системе компании, то задача управления слаженностью судового «человеческого элемента» будет заключаться в установлении этим руководством нижней границы требований C_k к судовому «человеческому элементу»

$(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$. Такое требование позволит согласовать текущее отношение «труд – вознаграждение» между судовым «человеческим элементом» и высшим руководством компании и обеспечить с одной стороны надежность выполнения плановых заданий субъектом $s_i, i \in I$, а с другой стороны надежность удовлетворения запроса на вознаграждение этого же субъекта.

Для скалярных величин, характеризующих состояние i -го субъекта из состава судового «человеческого элемента» $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ и социально-технической системы (судна) в целом на k -м периоде функционирования будем использовать следующие обозначения:

- V_i и V – субъективные оценки величин r_i и R , формируемые высшим руководством компании и устанавливаемые им на судах компании при этом V равно сумме V_i по $i \in I, 0 \leq V_i \leq r_i$ и $0 \leq V \leq R$;

- w_{ik} и W_k – субъективные оценки величин r_i и R , формируемые высшим руководством компании на этапе проработки проблемы слаженности деятельности судового «человеческого элемента» при этом W_k равна сумме величин w_{ik} по $i \in I, 0 \leq w_{ik} \leq V_i$ и $0 \leq W_k \leq V$.

Пусть далее C_k соответствует представлениям высшего руководства компании, и эта величина определена так $0 \leq C_k \leq V$, а x_{ik} и X_k плановые величины по слаженности труда судового «человеческого элемента», причем x_{ik} принимается высшим руководством компании и устанавливается субъекту из

$$(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\}).$$

$$Y_k - \gamma(X_k - Y_k) \text{ при } X_k \geq Y_k$$

$$Y_k - \beta(Y_k - X_k) \text{ при } X_k < Y_k$$

(1)

где γ и β – постоянные коэффициенты $\gamma > 0, 0 > \beta \leq 1$

- закон стимулирования слаженности в представлении субъектов из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ записывается следующим выражением

$$y_{ik} - (\alpha + w_{ik} / x_{ik})(x_{ik} - y_{ik}) \text{ при } x_{ik} \geq y_{ik},$$

$$\varphi_i(x_{ik}, w_{ik}) =$$

$$y_{ik} - \beta(y_{ik} - x_{ik}) \text{ при } x_{ik} < y_{ik}, \quad (2)$$

где $0 < \alpha \leq 1$.

Процесс согласования интересов высшего руководства компании и судовых «человеческих элементов», при использовании законов стимулирования слаженности (1) и (2), смещающих акцент в отношении «труд – вознаграждение», можно детализовать, если дополнительно принят ряд особенностей в функционировании социально-технической системы.

Пусть далее высшее руководство компании и субъект из состава судового «человеческого элемента» по-разному оценивает величину r_i в

D_i , причем субъект имеет более достоверную информацию, что позволяет ему проявлять активность и, если это ему выгодно, в каждом периоде согласования стимулирования слаженности k ограничивать выполнение планового задания величиной ω_{ik} . Если этот субъект ведет себя рационально и не наносит вреда производственным процессам на судне, а также в каждый период согласования k его удовлетворяет отношение $y_{ik} \geq w_{ik}$, то судовая администрация может самостоятельно наложить ограничение ω_{ik} на величину y_{ik} . Тогда, используя результаты работы [8], границы величин w_{ik} и ω_{ik} можно представить в виде параметрического семейства распределений:

$$\text{при } 0 \leq w_{ik} \leq \omega_{ik} \leq V_i$$

$$0 \quad \text{если } 0 \leq y_i \leq w_{ik}$$

$$1 \quad \text{если } y_i > w_{ik}$$

$$F_i(w_{ik}, \omega_{ik}, y_i) =$$

$$\text{Или равно } F_i(y_i) \quad \text{если } w_{ik} < y_i \leq \omega_{ik} \quad (3)$$

$$\text{а при } 0 \leq \omega_{ik} \leq w_{ik} \leq V_i$$

$$0 \quad \text{если } 0 \leq \omega_{ik} \leq y_i \leq w_{ik}$$

$$F_i(w_{ik}, \omega_{ik}, y_i) = 1 \quad \text{если } y_i > w_{ik} \quad (4)$$

Вполне естественно принять, что судовая администрация как и подведомственный вахтенный «человеческий элемент» имеют возможность ограничивать при согласовании

мотивации слаженности затраты X_k величиной ω_k . Тогда

$$F(Y) \quad \text{при } Y \leq \omega_k$$

$$F(\omega_k, Y) = 1 \quad \text{при } Y > \omega_k \quad (5)$$

а планы по внедрению слаженности в вахтенную службу могут формироваться по следующему закону

$$(1 + \alpha)u_{\bar{k}} \quad \text{при } u_{\bar{k}} \geq z_{\bar{k}}$$

$$u_{\bar{k}} = u_{\bar{k}} + \alpha z_{\bar{k}} \quad \text{при } u_{\bar{k}} < z_{\bar{k}} \quad (6)$$

где для администрации судна $u = X$ и $z = Y$, а для субъекта из состава судового «человеческого элемента» $u = x_i$ и $z = y_i$

Пусть субъект из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ учитывает

складывающуюся экономическую ситуацию на судне и в промысловой компании в целом, «смотрит» на N_i периодов согласования вперед и устанавливает в $k - m$ периоде границу ω_{ik} на выполнение плана мотивации x_{ik} . Кроме того, пусть этому субъекту известен закон, по которому администрация судна формирует оценку w_{ik} и он

учитывает влияние границы ω_{ik} на будущие планы и их выполнение. В этих условиях в качестве критерия эффективности слаженности субъекта в вахтенной службе из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ можно предложить следующее выражение это руководство «смотрит» при согласовании планов мотивации труда на N периодов вперед, записывается так

$$\eta(X, \omega) = \Phi(X_k, \omega_k) + \sum_{q=k+1}^{k+N} \int_0^Y \Phi(X_q, Y) dF(\omega_q, Y) \quad (7)$$

причем математическое ожидание $\Phi(X, Y)$ при заданной границе ω , определенной так $X \leq \omega \leq V$ можно, используя результаты работы записать следующим образом

$$\dot{\eta}(X, \omega) = (1 - \beta) \left[\omega \int_0^{\omega} F(Y) dY \right] - (\gamma - \beta) \int_0^X F(X) dX + \beta X \quad (8)$$

Для реализации мотивации к слаженности в вахтенной службе необходимо выбрать решающее правило $\omega_0(X_0)$, которое должно обеспечивать максимальное значение критерию эффективности (8). Поэтому, учитывая планы по стимулированию слаженности в вахтенной службе в виде выражения (6) при $u = X$, $z = Y$, и выражения (5), (8) и (9) можно получить последовательность планов этой мотивации слаженности $\{X_k\}_{k=1}^N$ записанную так

$$F(X_k) = [1 - \beta(1 - \alpha)] / \alpha(\gamma + \beta);$$

$$(\gamma + \beta)F(X) - [(1 - \beta) / \alpha] F[(X - X) / \alpha] = \beta; \quad (9)$$

$$F(X) = \alpha\beta / [\alpha(\gamma - \beta) - 1 + \beta],$$

где X - величина плана стимулирования мотивации на k -ом периоде согласования, X'' - на $(k + 1)$ -ом периоде согласования, а $X' = X'' = (1 + \alpha)X$.

Тогда если $X'' \geq X'$, то $X'' \geq X'$ и решающие правила для согласования планов по стимулированию слаженности в судовой ходовой вахте, дающие приближенное решение проблемы такой слаженности, будут иметь вид:

$$\sigma'_0 = (X'_1 - X_0) / \alpha \quad \text{если } X'_1 \geq X_0$$

$$\sigma_0 = X_0 \quad \text{если } X'_1 < X_0$$

Выбранная стратегия судовой администрации в процессе выбора решающего правила не случайна, поскольку администрации не известны функции распределения $F_i(y_i)$ и степень дальновидности

N_i субъектов из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$. Судовая администрация знает лишь свертку $F(y)$ по $i \in I$ этих функций, так как Y_k является суммой y_{ik} по $i \in I$. Очевидно, что даже при совпадении степеней дальновидностей субъектов из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ и администрации

судна решающее правило $\sigma_0(X_0)$ способно приближенно обеспечить максимум критерию лишь при согласованности целей сторон.

Действительно, в законах стимулирования слаженности вахтенной службы (1) и (2) штраф за невыполнение требований может рассчитываться по-разному. Однако при установленном администрацией судна законе формирования ресурса на проведение слаживания субъектов $w_{ik} = f(x_i, y_i, w_{ik-1})$ сумма реализаций y_{ik} по k -м периоде фиксации отношений может существенно отличаться от величины Y_k .

В силу этого, что решающее правило $\sigma_{i0}(x_{i0})$ будет устанавливаться субъектами из $(s_i, i \in I, \text{ где } I = \{1, 2, \dots, m\})$ исходя только из их собственных интересов. Следовательно, задачей судовой администрации (капитана) является такое согласование своих интересов с интересами судового экипажа, при котором последовательность $\{\omega_{ik}\}_{k=0}^N$ согласовывалась бы с последовательностью $\{\omega_{ik}\}_{k=0}^N$.

Если капитан судна не ограничен в выборе закона формирования оценки w_i , то наиболее простым решением задачи по обеспечению мотивации к слаженности в вахтенной службе может быть оценка равная величине

$$w_i = w_{ik} (\gamma - \alpha) x'_{ik} \quad (10)$$

Выбор оценки w_{ik} судовой администрацией означает, что она снимает неопределенность в индивидуальных настроениях субъектов в классе

D_i вахтенной службы для интервала $[0, w_{ik}]$ и устанавливает нижнюю границу y_i . В этих условиях, учитывая информированность судового экипажа о законе (6) и о величине оценки (10) решающее правило $\sigma_{i0}(x_{i0})$,

минимизирующее критерий (7), определяется представителями судовой вахтенной службой исходя из того каким образом выбраны коэффициенты α и γ в законах стимулирования сглаживания (1) и (2).

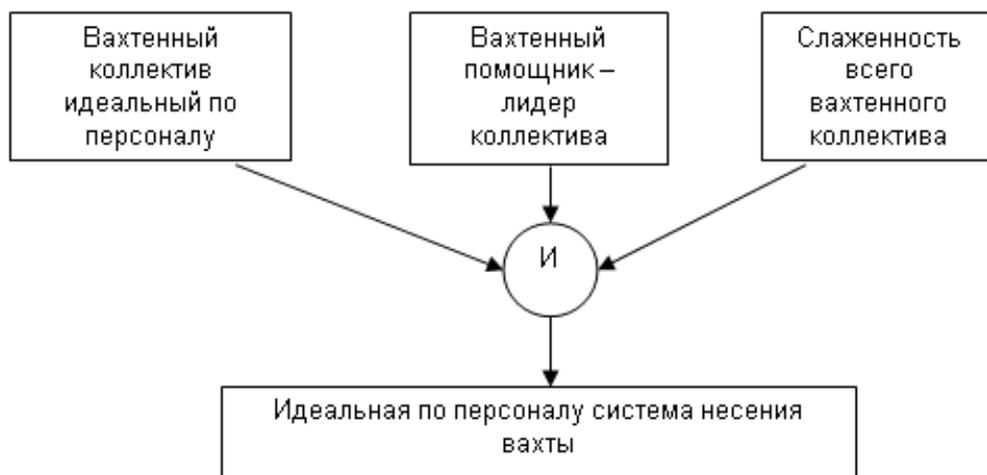


Рис. 1. Схема построения идеальной по персоналу организационной системы несения вахты.

Постоянное улучшение в организационно-технических системах управления должно начинаться с человека, с совершенствования его личных качеств, знаний, навыков и умений. Следующий шаг - совершенствования вахтенной службы, должно осуществляться, прежде всего, за счёт систематического обучения персонала вахты и создания доброжелательной атмосферы в коллективе.

Прокомментируем кратко названные шаги. Первый шаг - организованность - направлена на тщательную сепарацию технических средств, на рабочем месте. Чем меньше технических средств, экспертных и информационных систем окружают, судового специалиста на рабочем месте тем легче будет ему выполнять свои функциональные обязанности. Лучше всего, чтобы одновременно экспертную и информационную поддержку обеспечивала одно техническое средство с заранее продуманными и подготовленными эксплуатационными инструкциями.

Второй шаг - аккуратность - предполагает, что будет тщательно проанализировано текущее положение дел на рабочем месте. В ходе этого анализа должны быть получены варианты использования технического средства. Это позволит упорядочить действия судового специалиста на рабочем месте. Кроме того, упорядоченные действия судового специалиста могут обеспечить их прослеживаемость. Причем дополнительную помощь в быстром поиске нужной информации, поступающей от технического средства, может дать простая и ясная идентификация этой информации, а так же удобство доступа к ней.

Необходимо также обратить внимание на еще один из аспектов проблемы влияния человеческого фактора на морском транспорте, связанный с

ценностной оценкой действий людей [8]. Сейчас, при рассмотрении влияния поведения судового персонала на безопасность не учитывается влияние самых мощных и устойчивых факторов поведения, не зависящих от текущего состояния людей, конкретных условий и продолжительности работы - факторы мораль, воля и интерес. Именно эти категории дают представление о ценностной ориентации морских специалистов, а их влияние проявляется очень ярко в чрезвычайных ситуациях, где в условиях стресса и непредсказуемости профессионализм и способности часто теряют свое значение. Мораль человека в таких ситуациях является своеобразной рамкой, в которой могут проявляться свободная воля и интерес. Поэтому ценностная установка отдельных морских специалистов и судового персонала в целом является фундаментальным, определяющим фактором безопасности поведения в различных ситуациях на море. Воздействие всех профессиональных, личностных и ценностных факторов комплексное и только их рассмотрение в единстве и динамической взаимосвязи может указать на подлинные возможности морских специалистов и судовых экипажей.

Стандартизация всех элементов деятельности судового специалиста на рабочем месте позволяет каждую операцию довести до совершенства. Основой для иллюстрации решения задачи по стандартизации судовых операций используем "Руководство к составлению судовых планов чрезвычайных мер по борьбе с загрязнением нефтью", по рекомендации Международной Морской Организации (ИМО) принятое за стандарт. Это руководство предназначено, в первую очередь, для специалистов, включенных в систему управления безопасностью судоходной компании.

Планирование и составление технологической карты или сетевой модели операции по ликвидации разлива нефти могут быть осуществлены в классе комбинаторных задач, обеспечивающих полную упорядоченность действий судового экипажа. Именно такую технологическую карту действий направленную на минимизацию ущерба от разливов нефти и должен представлять собой "Судовой план чрезвычайных мер по борьбе с загрязнением нефтью", составленный в системе управления безопасностью компании для конкретного судна.

Заключение

Постановка и решение задачи мотивации слаженности в составе вахтенной службы с учетом

индивидуальных представлений субъектов и при установленном администрацией судна ресурсе на реализацию мотивационных интересов позволит добиться того, чтобы надежность слаженности любого представителя вахтенной службы была равна надежности слаженности всего вахтенного коллектива. Если свойство слаженности вахтенного коллектива добавить в качестве составляющей, в ассоциативно-структурную систему несения вахты, то можно составить вариант идеальной по персоналу организационной системы несения вахты (Рис.1), которая будет основой организационно-технической системы несения ходовой вахты.

Литература

1. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М: Наука, 1977; С. 457.
2. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления: М. : Советское радио, 1967.
3. Кукуи Ф. Д. Основные процессы в структурах безопасной эксплуатации судна : монография; Ф. Д. Кукуи, А. Н. Анисимов, А. А. Анисимов; под общ. ред. В. И. Меньшикова; Федер. агентство по рыболовству, ФГОУ ВПО «Мурм. гос. техн. ун-т». – Мурманск : Изд-во МГТУ, 2008; 184 с.: ил;
4. Кукуи Ф. Д. Скороходов Д.А. К вопросу об обеспечении безопасности судна судоводителем ; Научный журнал «Наука и транспорт»; 2012. №2; С. 30 – 33;
5. Кукуи Ф. Д. Модель и механизм побуждения к реализации безопасных технологий при эксплуатации судов компании; Морские интеллектуальные технологии; 2016. Т.1. № 1 (31); С. 49 - 55.
6. Марковский И. Н. Функциональная готовность «человеческого элемента» при восприятии навигационной информации от экспертных систем; Марковский И. Н., Позняков С. И., Меньшиков В. И.; Рыбное хозяйство; 2013- № 6; С. 93 - 95.
7. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ–78) (консолидированный текст): с поправками; СПб. : ЦНИИМФ; 2016; 824 с.
8. Маринов М.Л., Каминский В.Ю. Скороходов Д.А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки; Морские интеллектуальные технологии; №1 (39), том1; 2018; С. 209-215;
9. Помахо С. В. Использование ассоциативно-структурного подхода при описании аварийной ситуации и вариантов ее развития; С. В. Помахо, А. Ж. Смирнов, В. И. Меньшиков ; Вестн. МГТУ: Труды Мурман. Гос. техн. Ун-т. 2011; Т.14. № 4 - С.737 – 739.
10. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения; М. : Мир, 1976. Т.2. 435 с.

References

1. Burkov V. N Foundations of mathematical theory of active systems; M: Nauka, 1977 P. 457;
2. Koks D.Smit V Theory of restoration: M. : Sovetskoe radio, 1967;
3. Kukui F. D.; The main processes in the structures of the safe operation of the vessel; F. D. Kukui, A. N. Anisimov, A. A. Anisimov; red. V. I. Men'shikova; Feder. agentstvo po rybolovstvu, FGOU VPO «Murm. gos. tehn. un-t». – Murmansk : Izd-vo MGTU, 2008; 184 p. : il;
4. Kukui F.D., Skorokhodov D.A., To the question of ensuring the safety of the vessel the boatmaster § Nauchnyj zhurnal «Nauka i transport»; 2012. №2; P. 30 – 33;
5. Kukui Firmin Dzhiv; Model and mechanism to encourage the implementation of environmentally friendly technologies when the company ships; Morskije intellektual'nye tehnologii; 2016; T.1. № 1 (31); P. 49 – 55;
6. Markovskij I. N. Functional readiness "human element" in the perception of navigational information from expert systems; Markovskij I. N., Poznjakov S. I., Men'shikov V. I.; Rybnoe hozjajstvo; 2013. - № 6; P. 93 – 95;
7. International Convention on standards of training, certification and Watchkeeping for seafarers 1978 year (PDMNV–78) consolidated text; SPb: CNIIMF; 2016. 824 p;
8. Marinov M., Kaminsky V. Skorokhodov D.a. Accounting Methodology of vocational value aspect of the action of the skipper during the open training; Marine technology, №. 1 (39); tempo 2018; С. 209-215.
9. Pomaho S. V. Use the associative-structured approach in describing the emergency and its development options; S. V. Pomaho, A. Zh. Smirnov, V. I. Men'shikov ; Vestn. MGTU: Trudy Murman. Gos. tehn. Un-t. 2011; T.14. № 4; P. 737 – 739;
10. Feller, V. Introduction to probability theory and its applications M.: Mir; 1976. T.2. 435 p.

УДК 681.51

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Алексей Леонидович Стариченков

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),

197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5,
тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Никита Владимирович Модин

Аспирант, кафедра корабельных систем управления
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),

197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5,
тел. +7(981) 937-03-12, e-mail: nikita.modin@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрена проблема использования нейронных технологий в системах управления судна для решения ряда задач с целью улучшения прогноза и уточнения навигационной информации, моделирования динамики судна для определения маневренных элементов, построения систем управления его движением. Одной из главных задач является получение координат места судна в режиме счисления. Обзор проводится именно с позиции возможности использования нейросетевых алгоритмов для решения данной задачи. Общей чертой рассмотренных в работе публикаций является то, что нейросетевые системы не учитывают волнение в качестве существенного для счисления внешнего фактора. Также важной задачей судовождения является получение координат места судна в автономном режиме — ведение счисления. Предложены различные варианты построения интеллектуальной системы в связи с проблемой адаптации нейросетевой системы по отношению к физическим характеристикам судна и условиям плавания. Основные результаты предназначены для получения координат места судна в автономном режиме. С позиции нелинейности и неопределённости перспективным представляется использование нейронных сетей при проектировании систем счисления, направленном на повышение точности определения места судна. Применение нейросетевых технологий в судовождении, связанное с задачей построения системы счисления, происходит по двум основным направлениям. Первое направление включает исследования, в которых рассматривается использование нейронных сетей и гибридных нейронечётких систем в задачах обработки навигационной информации и определения параметров движения судна. Второе направление представляют исследования, в которых изучается возможность построения нейросетевых (нейро-нечётких) систем управления движением судна.

Ключевые слова: автоматический вид, задачи судна, навигация, нейронная сеть, параметры, система, судно, управление.

COMPARATIVE EVALUATION OF MODERN INTELLECTUAL CONTROL SYSTEMS IN TERMS OF TASKS OF NAVIGATION INFORMATION PROCESSING

Alexey L. Starichenkov

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI")
197376, Russia, St. Petersburg, Professora Popova Street, 5
tel. : +7 (921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Nikita V. Modin

Postgraduate Student, Department of Ship Control Systems
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI")
197376, Russia, St. Petersburg, Professora Popova Street, 5
tel. : +7 (981) 937-03-12, e-mail: nikita.modin@yandex.ru

Abstract

The article considers the problem of using neural technologies in ship control systems for solving a number of tasks in order to improve the forecast and refine navigation information, simulate ship dynamics to determine maneuverable elements, and build motion control systems. One of the main tasks

is to obtain the coordinates of the vessel in a reckoning mode. The review is conducted precisely from the perspective of possibility of using neural network algorithms for solving this problem. A common feature of the publications reviewed in this paper is that neural network systems do not consider waves as an essential factor for calculation of the external factor. Also an important task of navigation is to obtain the coordinates of the ship's position in the autonomous mode - work out the dead reckoning. Various options for building an intelligent system have been proposed in terms of a problem for adapting the neural network system with respect to the physical characteristics of the vessel and navigation conditions. The main results are designed to obtain the coordinates of the vessel's position in the autonomous mode. From the standpoint of nonlinearity and uncertainty, it seems promising to use neural networks in the design of reckoning systems, aimed at improving the accuracy of determining the location of the vessel. The use of neural network technologies in navigation, associated with the task of building a reckoning system, occurs in two main directions. The first direction includes research in which the use of neural networks and hybrid neuro-fuzzy systems in the tasks of processing navigation information and determining vessel motion parameters is considered. The second direction is represented by studies in which the possibility of building neural network (neuro-fuzzy) systems for controlling the motion of a vessel is being studied.

Key words: automatic view, vessel tasks, navigation, neural network, parameters, system, vessel, control.

Введение

В данной работе рассмотрены системы с использованием нейронных сетей, а также гибридных нейро-нечётких систем при моделировании динамики судна, для определения его маневренных элементов, обработки навигационной информации, построения систем управления его движением. В связи с тем, что важной задачей судовождения является получение координат места судна в режиме счисления, обзор проводится именно с позиции возможности использования нейросетевых алгоритмов для решения данной задачи. Общей чертой рассмотренных в работе публикаций является то, что нейросетевые системы не учитывают волнение в качестве существенного для счисления внешнего фактора. Более того, в рассматриваемых исследованиях отсутствуют методики полноценного тестирования нейросетевых систем в различных навигационных ситуациях. Отмечается, что путь к созданию работоспособной системы нейросетевого счисления должен лежать в области разработки методик, уменьшающих влияние указанных недостатков.

Важной задачей судовождения является получение координат места судна в автономном режиме – ведение счисления. Роль счисления особенно велика, когда по тем или иным причинам в течение длительного периода времени определение координат судна по внешним измерениям невозможно. Изменение счисляемых координат судна носит, в общем случае, нелинейный характер. Более того, измерение исходных величин, по которым рассчитываются координаты, происходит, как правило, в условиях значительной неопределённости и неполноты данных. Отмеченные свойства процесса счисления должны быть обязательно учтены при разработке новых методов определения автономных координат судна. С позиции нелинейности и неопределённости перспективным представляется использование нейронных сетей, нечётких и гибридных нейро-нечётких систем при проектировании систем счисления, направленном на повышение точности определения места судна. Применение нейросетевых технологий в судовождении, связанное с задачей построения

системы счисления, происходит по двум основным направлениям. Первое направление включает исследование, в которых рассматривается использование нейронных сетей и гибридных нейро-нечётких систем в задачах обработки навигационной информации и определения параметров движения судна. Второе направление представляют исследования, в которых изучается возможность построения нейросетевых (нейро-нечётких) систем управления движением судна.

1. Применение нейросетевых технологий для прогноза и уточнения навигационной информации

В исследовании [1] предлагается подход к решению задачи комплексирования навигационной информации, поступающей от инерциальной и спутниковой систем. Комплексирование выполняется на основе фильтра Калмана. Элементы матриц перехода и измерения, а также матричного коэффициента усиления являются, в то же время, коэффициентами нейронной сети. Элементы матричного коэффициента подлежат коррекции в соответствии с поступающими измерениями вектора состояния, тем самым обеспечивается адаптивность фильтра. Результаты численного эксперимента позволяют сделать вывод о состоятельности предложенной технологии комплексирования для частного случая движения объекта. Исследование [2] посвящено применению нейросетевых технологий в решении задачи комплексирования спутниковой и инерциальной систем. Слабосвязанное комплексирование выполняется на основе фильтра Калмана. Для фильтрации шумовых погрешностей процесса и измерений используется сеть с радиальными базисными функциями (RBF – Radial Basis Functions), параметры структуры которой настраиваются с использованием метода роя частиц (PSO – Particle Swarm Optimization) в режиме реального времени (рис.1). В результате определяются оценки ковариационных матриц процесса и измерений, которые используются в алгоритме фильтрации. Было выполнено моделирование движения летательного аппарата в течение 30 мин, координаты которого определялись с использованием корректируемой системы в условиях ошибок измерений датчиками

навигационной информации. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что точность определения координат объекта с использованием предлагаемого подхода существенно выше по сравнению со стандартной методикой комплексирования, основанной на применении фильтра Калмана.

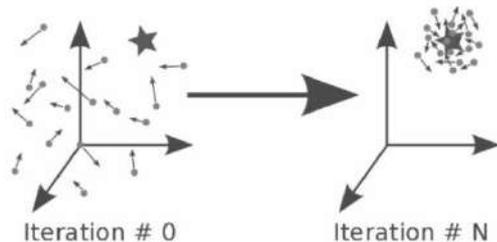


Рис. 1. Метод роя частиц

В работе [3] рассматривается применение нейронной сети RBF для прогноза координат объекта в случае выхода из строя инерциальной блока корректируемой навигационной системы, когда траектория движения может быть получена только на основе данных спутниковой навигационной системы. Предлагается подход, заключающийся в том, что поступающий на вход нейронной сети вектор координат проходит предварительную обработку при помощи фильтра низких, средних или высоких частот. Рассматривается также стандартный подход, не предполагающий использование указанных фильтров. В том и другом случае нейронная сеть прогнозирует оптимальную траекторию движения объекта по данным спутниковой навигационной системы, характеризующейся шумами измерений. Основным результатом исследования состоит в том, что оба рассматриваемых подхода позволяют прогнозировать траекторию с практически одинаковой точностью, но использование фильтра значительно сокращает время обучения нейронной сети. В [4] предлагается другой вариант использования нейронной сети для прогноза траектории движения наземного объекта в случае потери сигнала от спутниковой навигационной системы. Система состоит из трёх многослойных перцептронов, каждый из которых прогнозирует приращение пространственных координат центра тяжести судна. На вход системы поступает сигнал, формирующийся из составляющих вектора скорости, координат на предыдущем шаге, интегралов линейного ускорения и угловой скорости поворота судна. Для выбора оптимальной структуры и алгоритма обучения используется следующий подход. Проводится десятиминутный натурный эксперимент, в котором фиксируются параметры движения, получаемые с использованием спутниковой и бесплатформенной инерциальной навигационных систем. На основе экспериментальных данных формируются две выборки: для обучения и тестирования нейронной сети. Варьированием алгоритма обучения и параметров структуры сети: числа слоёв и количества нейронов в них, находится оптимальная по точности и скорости сходимости процесса обучения архитектура системы. При этом исследуется точность прогноза вертикальной координаты судна. После выбора оптимальной

структуры сеть проходит тестирование в другом натурном эксперименте, когда наземное транспортное средство совершает движение в течение 500 секунд. В течение первых 230 секунд интегрированная система работает в обычном режиме, используя всю необходимую информацию для прогноза траектории. В этот промежуток времени происходит также и обучение нейронной сети. В оставшиеся 270 секунд движение происходит при отсутствии сигнала спутниковой системы, а определение координат осуществляется инерциальной системой, а также её комбинацией с нейронной сетью. Использование одной лишь инерциальной системы приводит к накоплению пространственной ошибки определения координат, равной приблизительно 3 км. При использовании комбинированной с нейронной сетью системы величина ошибки составляет приблизительно 200 м.

Задача прогнозирования траектории движения судна может быть также решена, как предлагается в исследовании [5], на основе фокусированной сети прямого распространения с задержкой по времени (TLFN – Time Lagged Feed Forward Network). Нейронная сеть состоит из двух слоёв, первый из которых содержит нейроны с сигмоидальными функциями активации, а второй слой имеет один нейрон с тождественной функцией активации (рис.2). Сеть, принимая на вход вектор задержанных значений координаты судна в географической системе, прогнозирует её значение на шаг вперёд.

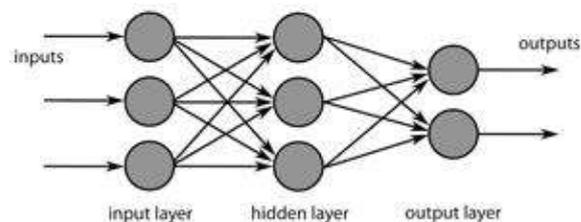


Рис. 2. Общий вид нейронной сети TLFN

Обучение сети происходит в режиме реального времени на основе выборки, содержащей определённое количество предшествующих точек траектории. Результаты тестирования сети показали, что в рассмотренных модельных ситуациях она прогнозирует траекторию движения судна с удовлетворительной для навигационных целей точностью. Синтезированная нейронная сеть может использоваться также и в качестве адаптивного фильтра. Проводилось сравнение работы нейросетевого фильтра и фильтра Калмана в условиях, когда координаты судна имеют шумовые погрешности, распределённые по нормальному и равномерному закону распределения. Результаты фильтрации в десятиминутной модельной ситуации свидетельствуют о том, что использование нейросетевого фильтра является более эффективным по сравнению с применением фильтра Калмана с позиции уменьшения максимума модуля невязки на промежутке времени плавания.

Исследование [6] посвящено проблемам оценивания текущего вектора состояния судна и

прогнозирования его значения на шаг вперёд. Задача оценивания вектора горизонтальных координат судна выполняется при помощи рекуррентной нейронной сети с двумя скрытыми слоями. Задача прогнозирования решается с использованием рекуррентной сети с тремя скрытыми слоями. Принимая на вход текущее и несколько предыдущих значений координаты судна, сеть прогнозирует её значение на шаг вперёд. Работа нейронных сетей по прогнозированию траектории движения судна сравнивалась с фильтром Калмана. Параметры движения судна получались в ходе решения системы дифференциальных уравнений при плавании в условиях регулярного синусоидального волнения. При решении задачи прогнозирования использовались два фильтра Калмана. Один из них был синтезирован исходя из условия, что динамическая модель процесса движения судна известна, другой был построен при отсутствии подобной информации. Точность прогноза траектории нейронной сетью оказалась приблизительно на таком же уровне, как и с фильтром Калмана, построенном с учётом информации о динамике судна. Преимущество нейросетевого метода прогнозирования параметров движения судна по сравнению с калмановским алгоритмом заключается в том, что не требуется использование динамической модели судна и знание статистической информации о погрешностях измерений и самого процесса.

В работе [7] предлагается использование трёхслойного персептрона для решения задачи сглаживания временных рядов, элементами которых являются координаты места судна. Эталонными для нейронной сети значениями координат являются их оценки, полученные на выходе фильтра Калмана, т. е. сеть используется для уточнения результатов фильтрации. Сравнение работы алгоритма Калмана и нейронной сети выполнялось на основе данных о движении наземного транспортного средства, полученных при помощи аппаратуры ГЛОНАСС, в течение 10 часов. Критерием точности выбрана среднеквадратическая ошибка определения координат транспортного средства. Результаты сравнения позволили авторам сделать вывод о более высокой точности нейросетевого предиктора наблюдаемых параметров движущегося объекта в системе ГЛОНАСС по сравнению с традиционным фильтром Калмана.

В исследовании [8] используются нейронные сети для прогноза траектории движения судна в режиме реального времени. Входной сигнал сети формируют путевой угол и модуль вектора абсолютной скорости судна. На выходе получают приращения к географическим координатам центра тяжести судна. Фактически, нейронная сеть выполняет функцию алгоритма счисления пути судна. Сеть содержит два слоя, нейроны которых имеют сигмоидальные функции активации. Дискретность прогноза траектории составляет одну минуту. Образцы формируются в ходе тридцатиминутного плавания реального судна по реке Янцзы с изменением курса в условиях влияния ветра и волнения. Тестирование обученной сети выполняется на образцах,

полученных в процессе плавания в течение последующих 25 минут. В ходе тестирования сравнивались две траектории, одна из них получена при помощи нейронной сети, а другая – с использованием соотношений, справедливых для проекции Меркатора. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть прогнозирует траекторию судна с большей точностью по сравнению с традиционным алгоритмом.

В работе [9] исследуются взаимосвязь и отличия двух подходов, используемых при решении нелинейных задач оценивания. Первый из них – байесовский подход – основан на положениях теории вероятности, другой подход заключается в использовании нейросетевых технологий. В исследовании показана взаимосвязь обоих подходов, заключающаяся в том, что при увеличении объёма обучающей выборки критерий, подлежащий минимизации в процессе настройки свободных параметров сети, стремится в данном классе нейронных сетей к среднеквадратичному критерию, используемому при синтезе оптимальных алгоритмов оценивания на основе байесовского подхода. Основное отличие подходов состоит в том, что для реализации байесовского подхода требуется исчерпывающая информация о свойствах оцениваемых параметров и ошибках измерений, в то время как построение нейросетевых алгоритмов оценивания возможно без использования такой информации в явном виде.

Исследование [10] посвящено использованию нейронных сетей для контроля целостности инерциальных навигационных систем в условиях избыточности информации. Для определения сбоя в работе конкретного датчика инерциальной системы используются два многослойных персептрона с задержками во времени входных сигналов. Один из них обучается на образцах, которые соответствуют работе системы с неисправностями в канале датчика, а другой – на образцах, соответствующих работе системы в исправном состоянии. В зависимости от того, какая сеть лучше прогнозирует в плане точности измерения на текущем временном шаге, делается вывод о наличии неисправности.

В [11] предлагается следующий подход к созданию модели движения судна на основе нейронной сети: составляется линейное уравнение состояния судна, содержащее матрицу перехода и матрицу управляющих воздействий. При помощи рекуррентной сети Хопфилда определяются коэффициенты данных матриц. Обучается сеть в режиме реального времени по мере поступления образцов, получаемых по результатам измерений. Вектор состояния включает координаты судна, угловую и линейную скорость, курс, угол дрейфа на циркуляции. На основе уравнений движения судна были сформированы модельные ситуации для стандартных манёвров «циркуляция» (с углами поворота руля 20° и 35°) и «зигзаг», в ходе которых непрерывно обучаемая нейронная сеть прогнозировала элементы матриц состояния и управления таким образом, что относительная ошибка параметров движения судна не превышала 1% в рассмотренных модельных ситуациях.

2. Разработка моделей движения судна на основе нейронной сети

Рассмотрим теперь возможность построения моделей движения судна на основе нейронных сетей. Особенностью является то, что настраиваемые параметры синтезированных систем остаются инвариантными к входным сигналам, поступающими на их вход. Также предлагается [12] построение модели движения судна на основе двухслойной нейронной сети NARX (Nonlinear Auto Regression with External inputs). Сеть принимает на вход скорость судна и угол перекадки руля, а прогнозирует рыскание и скорость дрейфа, которые подаются на вход сети по линии обратной связи. Настройка свободных параметров нейронной сети происходит на образцах, полученных в результате применения модели движения судна в горизонтальной плоскости на основе дифференциальных уравнений. Параметрами имитационной модели служат характеристики судна среднего тоннажа. Рассматриваются два типичных манёвра – «циркуляция» и «зигзаг». В каждом случае формируются выборки образцов, получаемые при различных сочетаниях скорости судна и угла перекадки руля. Множество образцов подразделяется на три подмножества, которые формируют выборки для обучения, проверки обобщающих свойств сети и её тестирования. В ходе тестирования нейронная сеть прогнозирует скорость дрейфа и угол рыскания с достаточной для навигационных целей точностью – наибольшая относительная погрешность в координатах в тестовых ситуациях не превосходит 5,7 % (на циркуляции). Особенность данного подхода к моделированию движения судна заключается в том, что нейронная сеть обучается для каждого типа манёвра отдельно. Иными словами, существует две сети, одна из которых обучена для манёвра «циркуляция», а другая – для манёвра «зигзаг».

В работе [13] также предлагается построение модели движения судна на основе нейронной сети. Используется многослойная нейронная сеть прямого распространения, прогнозирующая параметры движения судна на циркуляции (координаты, скорость, угол дрейфа, курс и др.) и имеющая своим входным сигналом величины, зависящие от управляющих воздействий со стороны движительно-рулевого комплекса судна (число оборотов винта и угол перекадки руля). Предлагается два подхода – прямой и силовой. При прямом подходе на вход сети подаются непосредственно угол перекадки руля и число оборотов винта. В случае силового подхода, входной сигнал содержит силы, воздействующие на корпус судна со стороны винта и руля, которые вычисляются с использованием известных из теории судна зависимостей. Построение нейросетевой системы счисления и её дальнейшее тестирование было выполнено для четырёх крупнотоннажных судов различных серий, оборудованных стандартным рулевым устройством и имеющих один винт правого вращения. Обучение нейросети выполняется на образцах, полученных при помощи двух навигационных тренажёров: «American Analytics

ShipSimulators» и «Norcontrol Simulators». Предполагается, что движение судна происходит на тихой глубокой воде в открытом море при отсутствии ветра. В рассмотренных модельных ситуациях, которые характеризовались различными значениями углов перекадки руля при данной начальной скорости, сеть прогнозирует параметры движения судна на циркуляции с высокой навигационной точностью. Сеть, на вход которой подаются силовые воздействия, как показали результаты тестирования, имеет меньшую точность по сравнению с сетью, построенной из соображений прямого подхода, что, по мнению автора указанного исследования, объясняется тем, что используемые зависимости для расчёта сил не учитывают взаимозависимости в системе «руль – винт – корпус», которые в действительности существуют.

В работе [14] предлагается построение нейронной сети, которая прогнозирует элементы циркуляции судна в зависимости от его физических характеристик, параметров движительно-рулевого корпуса, а также элементов движения в момент начала циркуляции. Используется двухслойная нейронная сеть прямого распространения. На вход сети подаются следующие величины: длина судна между перпендикулярами, ширина судна, осадка, коэффициент общей полноты, абсцисса центра тяжести судна, диаметр винта, скорость в момент начала циркуляции, относительное удлинение руля и площадь его боковой проекции. Выходными сигналами сети служат: выбег, выдвиг, тактический диаметр циркуляции, время выхода на противоположный курс, диаметр установившейся циркуляции, потеря скорости и угол дрейфа на установившейся циркуляции. В основе имитационной модели движения судна в горизонтальной плоскости лежит система дифференциальных уравнений, правые части которых содержат силы и моменты, зависящие от характеристик конкретного судна и параметров его движительно-рулевого комплекса. Варьированием входных величин был получен набор 260 образцов, 230 из которых использовались для обучения нейронной сети, а 30 – для проверки её обобщающих свойств. Результаты тестирования показали, что нейронная сеть прогнозирует элементы циркуляции с относительной погрешностью, не превышающей 7 % в рассмотренных ситуациях. Похожая нейросетевая система с идентичным входным сигналом была синтезирована и для определения элементов другого стандартного манёвра – «зигзаг». Элементы данного манёвра: время изменения курса на 10° , углы первого и второго перерегулирования и др., прогнозировались нейронной сетью с приемлемой степенью точности.

Похожий подход к использованию нейронных сетей для прогнозирования элементов циркуляции судна рассмотрен в работе [15]. Предлагается использовать двухслойную нейронную сеть прямого распространения, прогнозирующую диаметр установившейся циркуляции судна в зависимости от физических характеристик его корпуса и рулевого устройства, кинематических характеристик движения, величины

аэродинамических сил. Входными сигналами нейронной сети являются массовое водоизмещение, длина, ширина, осадка, угол дифферента, коэффициент общей полноты, абсцисса места установки руля, число рулей, абсцисса центра тяжести, скорость, метацентрическая высота, индикатор стороны поворота судна, сила ветра, действующая на надводную часть корпуса судна. Сеть обучается на образцах, полученных в результате проведения серии натуральных наблюдений для географического судна и военного корабля. Тестирование нейронной сети выполнялось также с использованием экспериментальных данных, полученных при маневрировании указанных судов. В проведенных натуральных испытаниях для каждого судна варьировались скорость, условия его загрузки и угол перекадки руля. Диаметр установившейся циркуляции прогнозировался нейронной сетью, а также с использованием модели движения судна в горизонтальной плоскости на основе дифференциальных уравнений. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть справляется с задачей определения диаметра установившейся циркуляции не хуже, а в отдельных случаях даже лучше модели, основанной на положениях классической теории.

В работе [16] предлагается построение нейронно-нечёткой системы для идентификации модели судна. Рассматривается гибридная система GEBF – FNN (Generalized Ellipsoidal Basis Function Based Fuzzy Neural Network). На вход системы поступает вектор, компонентами которого служат координаты и проекции скорости судна, угол рыскания и его производная, угол перекадки руля для текущего момента времени. Выходным сигналом системы является вектор этих же параметров для последующего момента времени, исключая угол перекадки руля.

Система обучается в последовательном режиме с использованием имитационной модели танкера объёмным водоизмещением 220000 м³. При её использовании для получения необходимого количества образцов угол перекадки руля меняется по синусоидальному закону. Затем выполняется проверка нейронно-нечёткой системы с использованием манёвра «зигзаг», результаты которой позволяют сделать вывод о высокой точности прогнозирования параметров движения судна. Так относительная погрешность координат не превосходит 1% при выполнении судном указанного манёвра.

Использованию гибридных нейронно-нечётких систем для прогноза скорости судна в условиях внешних возмущений посвящена работа [17]. В работе предложена система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), которая прогнозирует изменение скорости судна при наличии ветра, течения и волнения. Система обучается на образцах, полученных с использованием навигационного тренажёра Navitainer NTPRO 4000 для модели крупнотоннажного навалочного судна. Количество модельных ситуаций было взято в одном случае равным 126, а в другом – 252. Кроме того, использовались различные функции принадлежности при создании

и обучении системы. Основным результатом исследования состоит в том, что синтезированная гибридная система позволяет прогнозировать среднюю скорость судна в условиях внешних факторов с достаточно высокой точностью.

Применению нейросетевых технологий для построения системы, прогнозирующей относительную скорость судна в условиях влияния ветра и волнения, посвящено исследование [18]. Система состоит из двух нейронных сетей. Первая сеть принимает на вход величины, характеризующие действующие на судно внешние факторы, а также кинематические параметры его движения. Выходным сигналом является скорость дрейфа судна. Сеть имеет два слоя, первый из которых содержит 15 нейронов с сигмоидальными функциями активации, а второй – один нейрон с тождественной функцией активации. Сеть реализует модель NARX с 15 задержками в линиях входного и выходного сигналов. Вторая сеть, являясь статической, принимает на вход вектор, компоненты которого характеризуют кинематику судна, а прогнозирует составляющие вектора в локальной географической системе координат. Данная сеть имеет два слоя, первый из которых содержит 20 нейронов с сигмоидальными функциями активации, а второй – два нейрона с тождественными функциями активации.

Обучение сети № 1 выполняется на основе образцов для сухогрузного судна, полученных с использованием имитационной модели его движения в условиях влияния ветра и волнения. Формирование образцов для настройки сети № 2 производится на основе случайной выборки дискретных значений её входного сигнала с последующим вычислением выхода по известным кинематическим соотношениям. После обучения синтезированная система, состоящая из двух нейронных сетей, проходит проверку работоспособности с использованием имитационной модели. Было рассмотрено 2000 модельных ситуаций. Система нейронных сетей позволяет в указанных ситуациях прогнозировать траекторию движения судна таким образом, что наибольшее значение модуля невязки за время плавания составляет 138 м.

В работе [19] рассматриваются вопросы использования динамических нейронных сетей для прогнозирования курса судна. Формирование набора образцов осуществляется на основе дифференциальных уравнений для нескольких типов судов. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть прогнозирует курс судна в различных условиях плавания (ветра и волнения) с достаточной для целей управления точностью.

В исследовании [20] предлагается двухслойная нейронная сеть прямого распространения, которая выполняет задачу параметрической идентификации модели движения судна в горизонтальной плоскости. В качестве параметров, подлежащих идентификации, выступают коэффициенты демпфирования и гидродинамический коэффициент. На вход сети подаются угол перекадки руля и другие величины, характеризующие движение судна. Образцы формируются на основе данных, полученных в

результате имитационного моделирования. В ходе тестирования нейронной сети сравниваются две траектории. Первая получена с использованием «истинных» коэффициентов, вторая – с использованием коэффициентов, идентифицированных нейронной сетью. При движении судна на циркуляции (с углами перекладки руля 15° и 35°) расхождение траекторий составило несколько метров за период циркуляции.

В работе [21] предлагается построение интеллектуальной системы стабилизации судна на заданном курсе. Одной из её подсистем является блок, реализующий нейросетевую модель объекта регулирования. При использовании данной модели решаются вопросы выбора архитектуры сети, её алгоритма обучения, а также числа эпох, достаточного для обеспечения заданной точности прогноза курса. В работе было проведено имитационное моделирование движения судов шести типов в различных гидрометеорологических условиях плавания, характеризующихся высотой волны и скоростью ветра. На образцах, полученных в ходе данного моделирования, было проведено обучение сетей различных типов различными алгоритмами обучения. Так, рассматривались сети прямого распространения с алгоритмами обучения Левенберга–Марквардта, Моллера, рекуррентные сети Элмана с такими же методами настройки свободных параметров. Мерой точности обучения был выбран средний квадрат ошибки курса. Основным результатом части исследования, посвящённой выбору нейронных сетей для системы управления курсом, заключается в том, что в рассмотренных модельных ситуациях наиболее адекватно динамику судна воспроизводят нейронные сети прямого распространения с алгоритмом обучения Левенберга–Марквардта.

В одном из последних исследований в области применения нейросетевых технологий [22] при моделировании динамики судна предлагается использовать две статические двухслойные нейронные сети, одна из которых прогнозирует ускорение дрейфа судна, а другая – ускорение рыскания. На вход указанных сетей поступает вектор, компоненты которого содержат угол перекладки руля, угловую скорость поворота и скорость дрейфа. Для формирования необходимого для обучения нейросети количества образцов используется линейная модель, представляющая собой систему из двух линейных уравнений с постоянными коэффициентами. Работа линейной модели проходит в условиях волнения, которое нарушает адекватность пар вход – выход. Обе нейронные сети были обучены на множестве из 200000 образцов, после чего они были линеаризованы относительно нулевого положения вектора состояния, и восстановлены коэффициенты линейной модели. Относительная

погрешность определения указанных коэффициентов с использованием нейронных сетей не превосходит 9 %.

Заключение

В рассмотренных исследованиях нейронные сети нашли самое разнообразное применение при решении навигационных задач. В одних случаях коэффициенты нейронной сети зависят от физических характеристик конкретного судна, его движительно-рулевого комплекса, оставаясь постоянными при любых значениях входных сигналов, в других – свободные параметры сети настраиваются в соответствии с текущей динамикой судна, характером изменения траектории его движения и не зависят в явном виде от характеристик его корпуса, движителя и рулевого устройства. Нейронная сеть может также выступать в роли регулирующего устройства, стабилизирующего судно на заданном курсе или траектории. При этом коэффициенты сети могут настраиваться как в режиме реального времени на основе величины ошибки регулирования, так и определяться на основе эталонных ситуаций, сформированных в процессе управления судном при помощи того или иного регулятора. Результаты проверки работоспособности нейросетевых регулирующих устройств позволяют судить об их эффективности. Использование нейронных сетей также возможно для построения информационных систем, позволяющих прогнозировать параметры движения конкретного судна в режиме реального времени или элементы его циркуляции в статическом режиме. Находят применение нейронные сети и при решении задач комплексирования в интегрированных навигационных комплексах.

Актуальной является и проблема адаптации нейросетевой системы счисления по отношению к физическим характеристикам корпуса конкретного судна, особенностям его движительно-рулевого комплекса, а также условиям плавания, характеризующимся изменением плотности воды и воздуха, влиянием мелководья и другими подобными эффектами. Система счисления должна предусматривать также определение координат места судна с оценкой их точности, поэтому существует проблема разработки методик определения и оценки погрешностей прогнозируемых системой координат. На начальном этапе решение указанных проблем возможно лишь с использованием имитационного моделирования движения судна, при этом может возникнуть проблема выбора оптимальной имитационной модели, обладающей, с одной стороны, высоким уровнем адекватности, а с другой стороны, не требующей, для своей реализации слишком больших вычислительных ресурсов.

Литература

1. Числов К. А. Нейроподобный алгоритм коррекции безгироскопной инерциально-спутниковой гравиметрической системы // Информатика и системы управления. 2013, № 4 (38), стр. 093–099.
2. Jwo D. J., Chen J. J. Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS / INS navigation system design // Proceedings of 9th IFAC Workshop «Adaptation and learning in control and signal processing» (ALCOSP'07). 2007. 7 p.
3. Nguyen-H. M., Zhou C. Improving GPS / INS Integration through Neural Networks // Journal of Telecommunications. 2010. V. 2 (2). pp. 1–6.
4. Kaygisiz B. H., Erkmen I., Erkmen A. M. GPS / INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network // Journal of Navigation. 2004. V. 57. № 2. pp. 297–310
5. Сазонов А. Е., Дерябин В. В. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2013. № 3 (22), стр. 6–13.
6. Lainiotis D. G., Plataniotis K. N., Dinesh Menon, Charalampous C. J. Neural network application to ship position estimation // Proceedings of Conference «OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean». 1993. V.1. pp. 1384–1389
7. Болодурина И. П., Решетников В. Н., Таспаева М. Г. Применение и адаптация нейросетевых технологий в задаче идентификации динамических объектов // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2012, № 1, стр. 1–5.
8. Xu T., Liu X., Yang X. A. Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm // Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS). 2012. V. 4. № 11. pp. 271–277.
9. Степанов О. А. Нейросетевые алгоритмы в задаче нелинейного оценивания. Взаимосвязь с байесовским подходом. «Материалы докладов XI конференции молодых учёных «Навигация и управление движением». 2009, стр. 39–65.
10. Деева А. С., Щипицин А. Г. Методы контроля и диагностики информационных нарушений инерциальных навигационных систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. № 2 (178). стр. 21–25
11. Zak B., Malecki J., Kitowski Z. Modelling of ship's motion using artificial neural networks // Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press. 2001. pp. 298–303.
12. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks // Ocean Engineering. 2003. V. 30. № 13. pp. 1669–1697.
13. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems, Germany. 2007. 156 p.
14. Abramowski T. Application of artificial neural networks to assessment of ship manoeuvrability qualities // Polish Maritime Research. 2008. V. 15. № 2. pp. 15–21.
15. Martins P. T., Lobo V. Estimating Maneuvering and Seakeeping Characteristics with Neural Networks // OCEANS 2007-Europe. IEEE, 2007. pp. 1–5.
16. Ning W., Dan W., Tieshan L. A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks // Control Conference (CCC), 2012. 31st Chinese. IEEE, 2012. pp. 7026–7031.
17. Valcic M., Antonic R., Tomas V. Anfis Based Model for Ship Speed Prediction // Brodo Gradnja. 2011. V. 62. № 4. pp. 373–382.
18. Дерябин В. В. Применение нейронной сети в модели счисления пути судна // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 3. стр. 20–27.
19. Константинова Е. А. Системы управления движением морских судов на основе рекуррентных нейросетевых моделей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.19. Владивосток, 2012. 21 с.
20. Wacławek P. A neural network to identify ship hydrodynamics coefficients // Marine Simulation and Ship Manoeuvrability: Proceedings of the international conference, MARSIM '96, Copenhagen, Denmark, 9–13 September 1996, Rotterdam. 1996. pp. 509–513.
21. Седова Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления судном по курсу: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.19. Владивосток, 2009. 22 с.
22. Ведякова А. О. Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей // International Journal of Open Information Technologies. 2014. V. 2. № 3. pp. 18–22.

References

1. Chislov K. A. Neyropodobnyy algoritm korrektsii bezgiroskopnoy inertsiialno-sputnikovoy gravimetricheskoy sistemy // Informatika i sistemy upravleniya. 2013. № 4 (38). str. 093–099.
2. Jwo D. J., Chen J. J. Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS / INS navigation system design // Proceedings of 9th IFAC Workshop «Adaptation and learning in control and signal processing» (ALCOSP'07). 2007. 7 p.
3. Nguyen-H. M., Zhou C. Improving GPS / INS Integration through Neural Networks // Journal of Telecommunications. 2010. Vol. 2 (2). Pp. 1–6.
4. Kaygisiz B. H., Erkmen I., Erkmen A. M. GPS / INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network // Journal of Navigation. 2004. V. 57. № 2. pp. 297–310

5. Sazonov A. E., Deryabin V. V. Prognozirovaniye trayektorii dvizheniya sudna pri pomoshchi neyronnoy seti // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2013. № 3 (22). str 6–13.
6. Lainiotis D. G., Plataniotis K. N., Dinesh Menon, Charalampous C. J. Neural network application to ship position estimation // Proceedings of Conference «OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean». 1993. V.1. pp. 1384–1389
7. Bolodurina I. P., Reshetnikov V. N., Taspayeva M. G. Primeneniye i adaptatsiya neyrosetevykh tekhnologiy v zadache identifikatsii dinamicheskikh obyektoy // Programmnyye produkty. sistemy i algoritmy. 2012. № 1. str 1–5.
8. Xu T., Liu X., Yang X. A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm // Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS). 2012. Vol. 4. № 11. Pp. 271–277.
9. Stepanov O. A. Neyrosetevyye algoritmy v zadache nelineynogo otsenivaniya. Vzaimosvyaz s bayesovskim podkhodom. "Materialy dokladov XI konferentsii molodykh uchenykh «Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem»". 2009. str. 39–65.
10. Deyeva A. S., Shchipitsin A. G. Metody kontrolya i diagnostiki informatsionnykh narusheniy inertsiyalnykh navigatsionnykh sistem // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika. 2010. № 2 (178). str. 21–25
11. Zak B., Malecki J., Kitowski Z. Modelling of ship's motion using artificial neural networks // Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press. 2001. pp. 298–303.
12. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks // Ocean Engineering. 2003. V. 30. № 13. pp. 1669–1697.
13. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems, Germany. 2007. 156 p.
14. Abramowski T. Application of artificial neural networks to assessment of ship manoeuvrability qualities // Polish Maritime Research. 2008. V. 15. № 2. pp. 15–21.
15. Martins P. T., Lobo V. Estimating Maneuvering and Seakeeping Characteristics with Neural Networks // OCEANS 2007-Europe. IEEE, 2007. pp. 1–5.
16. Ning W., Dan W., Tieshan L. A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks // Control Conference (CCC), 2012. 31st Chinese. IEEE, 2012. pp. 7026–7031.
17. Valcic M., Antonic R., Tomas V. Anfis Based Model for Ship Speed Prediction // Brodo Gradnja. 2011. V. 62. № 4. pp. 373–382.
18. Deryabin V. V. Primeneniye neyronnoy seti v modeli schisleniya puti sudna // Eksploatatsiya morskogo transporta. 2011. № 3. str. 20–27.
19. Konstantinova E. A. Sistemy upravleniya dvizheniyem morskikh sudov na osnove rekurrentnykh neyrosetevykh modeley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19. Vladivostok. 2012. 21 s.
20. Waclawek P. A neural network to identify ship hydrodynamics coefficients // Marine Simulation and Ship Manoeuvrability: Proceedings of the international conference, MARSIM '96, Copenhagen, Denmark, 9–13 September 1996, Rotterdam. 1996. pp. 509–513.
21. Sedova N. A. Intellektualnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya sudnom po kursu: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19. Vladivostok. 2009. 22 s.
22. Vedyakova A. O. Identifikatsiya v usloviyakh vneshnego vozmushcheniya s ispolzovaniyem neyronnykh setey // International Journal of Open Information Technologies. 2014. V. 2. № 3. pp. 18–22.

ДК [681.5:62-83]:551.46.08

ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОКЕАНСКОЙ СРЕДЫ

Леонид Андреевич Краснодарец

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовое электрооборудование»
Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33,
главный научный сотрудник Института природно-технических систем
299011, Севастополь, ул. Ленина, 28
e-mail: lakrasno@gmail.ru

Лев Николаевич Канов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Судовое электрооборудование»
Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33
e-mail: lkanov48@mail.ru

Светлана Андреевна Конева

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Судовое электрооборудование»
Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33
e-mail: ksa2602@mail.ru

Владимир Муратович Цалоев

старший преподаватель кафедры «Судовое электрооборудование»
Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33
e-mail: 1._@mail.ru

Аннотация

Ставится и решается задача конструирования закона терминального управления процессом синхронных профильных измерений стратифицированной океанской среды группой автономных морских профилографов с регулируемой плавучестью, расположенных изначально на поверхности при значительном удалении друг от друга. Основная идея такого управления, обеспечивающего одновременное прибытие всей группы профилографов на горизонт заданной глубины с высокой точностью, заключается в построении аналитической модели желаемой траектории движения управляемой координаты – глубины и передаче параметров этой модели по спутниковой связи в бортовые контроллеры профилографов, участвующих в измерениях. Программное обеспечение бортовых контроллеров реализует закон терминального управления как результат адаптивного слежения профилографами за назначенной траекторией их движения в терминальное состояние. Закон адаптивного слежения сконструирован на основе локальной оптимизации в аналитической форме, которая позволяет сформировать структурную схему и выполнить синтез параметров настройки адаптивного регулятора. Приводятся результаты моделирования процессов управляемого и неуправляемого движения профилографов с регулируемой плавучестью в условиях стратифицированной морской воды.

Ключевые слова: терминальное управление, профилограф, закон управления, адаптивный регулятор, управление слежением, эталонный процесс, локальная оптимизация, модель, синтез.

TERMINAL CONTROL OF THE PROCESS OF PROFILE MEASUREMENTS OF THE OCEAN ENVIRONMENT

Leonid A. Krasnodubets

doctor of technical Sciences, Professor, professor of the department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University,
Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation,
Chief Researcher of the Institute of Natural and Technical Systems,
Lenin St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation
e-mail: lakrasno@gmail.ru

Lev N. Kanov

candidate of technical sciences, associate professor of the department «Ship's electric equipment»,
Sevastopol State University,
Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation
e-mail: lkanov48@mail.ru

Svetlana A. Koneva

candidate of technical sciences, associate professor, head of the department «Ship's electric equipment»,
Sevastopol State University,
Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation
e-mail: ksa2602@mail.ru

Vladimir M. Tsaloev

senior lecturer of the department «Ship's electric equipment»,
Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation
e-mail: 1._@mail.ru

Abstract

The problem of constructing the law of terminal control of the process of synchronous profile measurements of a stratified ocean environment by a group of autonomous marine profilers with adjustable buoyancy, initially located on the surface at a considerable distance from each other, is posed and solved. The main idea of this control, which ensures the simultaneous arrival of the entire group of profilers to a horizon of a given depth with high accuracy, is to build an analytical model of the desired trajectory of the controlled coordinate – depth and transmit the parameters of this model via satellite communications to the onboard controllers of profilers involved in the measurements. The software of the onboard controllers implements the law of terminal control as a result of adaptive tracking by the profilers of the trajectory of their designated movement to the terminal state. The law of adaptive tracking is designed on the basis of local optimization in an analytical form, which allows you to create a block diagram and perform the synthesis of the settings of the adaptive controller. The results of modeling the processes of controlled and uncontrolled movement of profilers with adjustable buoyancy in stratified seawater conditions are presented.

Keywords: terminal control, profiler, control law, adaptive controller, tracking control, reference process, local optimization, model, synthesis.

Введение

Морские автономные профилографы класса *Argo* [1] являются основными элементами в глобальной сети сбора данных о вертикальных распределениях термохалинных параметров океанской среды. Оснащенные спутниковой связью и регуляторами плавучести (buoyancy engine), такие профилографы выполняют функции подвижных платформ сбора данных, способны погружаться и всплывать со средней скоростью, текущее значение которой зависит от стратификации водной среды и не превышает 0,1 м/с. При этом, другие более скоростные режимы движения профилографов *Argo* не предусмотрены условиями их эксплуатации. Это ограничивает возможности применения подобных подвижных платформ в целях оперативной океанографии [2], например, для синхронных измерений термохалинных параметров морской воды на заданном горизонте глубины с помощью рассредоточенной группировки автономных профилографов. Таким образом, возникает задача о морской интеллектуальной автономной подвижной платформе сбора данных профильных измерений со спутниковой связью, способной совершать сложные траекторные движения, контролировать своё состояние и адаптироваться к изменениям внешней среды. Решение этой задачи предлагается строить на основе терминального управления [3 - 5].

Целью работы является разработка и исследование методом компьютерного моделирования системы терминального управления процессом крупномасштабных профильных измерений, обеспечивающей с высокой точностью синхронное движение группы профилографов как подвижных платформ сбора данных по назначенным траекториям на заданную глубину за требуемое время в условиях стратификации окружающей морской воды.

1. Функциональная схема системы терминального управления профилографом

В соответствии с концепцией терминального управления [3] разработана функциональная схема системы автоматического управления автономным морским профилографом, выполняющим профильные измерения в стратифицированной водной среде, которая изображена на рис. 1.

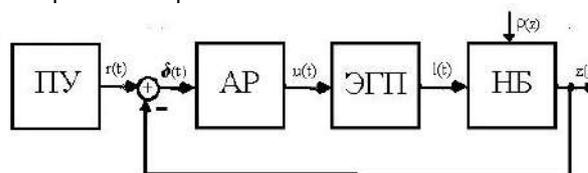


Рис. 1. Функциональная схема системы терминального управления профилографом

На первый суммирующий вход системы терминального управления от программного устройства (генератора траектории) ПУ подаётся сигнал управления $r(t)$, обеспечивающий движение по назначенной траектории объекта управления – ныряющего буя с регулируемой плавучестью НБ, на основе которого построен профилограф. На второй суммирующий вход подаётся сигнал отрицательной обратной связи, пропорциональный текущей глубине погружения $z(t)$. Далее сигнал ошибки терминального управления (рассогласования)

$$\delta(t) = r(t) - z(t) \tag{1}$$

подаётся на вход адаптивного регулятора АР, формирующего управляющий сигнал $u(t)$ для электрогидравлического привода ЭГП, перемещающего шток регулятора плавучести (РП) на величину $l(t)$, обеспечивающей необходимое значение выталкивающей силы, действующей на НБ с целью снижения влияния изменения плотности воды $\rho_e(z)$ на его вертикальное движение.

2. Математическое описание функциональных элементов системы терминального управления

Ныряющий буй как объект управления описывается нелинейным дифференциальным уравнением для стадии погружения [6]

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}^2(t) - bl(t) + \frac{\rho_g^0}{\rho_g(z)}g, \quad (2)$$

$$t = 0; z(0) = 0; \dot{z}(0) = 0, \quad (3)$$

где $z(t)$ – текущая глубина погружения; $l(t)$ – перемещение штока РП, a и b – параметры, зависящие от конструкции корпуса НБ; ρ_g^0 – плотность морской воды на поверхности; $\rho_g(z)$ – плотность морской воды на глубине z ; g – ускорение свободного падения на широте проведения измерений.

Электрогидропривод регулятора плавучести описывается дифференциальным уравнением

$$T_g \dot{l}(t) + l(t) = k_g u(t), \quad t > 0, \quad (4)$$

$$t = 0; l(0) = 0, \quad -\frac{l^{\max}}{2} \leq l(t) \leq \frac{l^{\max}}{2}, \quad (5)$$

где T_g и k_g – постоянная времени и коэффициент усиления электрогидропривода; l^{\max} – максимальное перемещение штока РП.

Датчик глубины (давления) представлен безынерционным звеном с единичным коэффициентом передачи.

Траектория назначенного движения может быть представлена аналитической моделью в виде уравнения

$$r(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3, \quad c_0, c_1, c_2, c_3 = const, \quad t \in [0, t_f] \quad (6)$$

параметры которого находятся при помощи граничных условий для назначенной траектории.

Профиль стратификации плотности морской воды задаётся модулем библиотеки *Simulink*, формирующим функциональную зависимость $\rho_g(z)$, подобную реальным данным.

3. Постановка задачи адаптивного управления слежением

В соответствии с функциональной схемой, изображённой на рис.1, процесс терминального управления нелинейным объектом (2) с переменным параметром, зависящим от $\rho_g(z)$, формируется в результате слежения выходной переменной $z(t)$ за назначенной траекторией $r(t)$. Пренебрегая на начальной фазе исследований постоянной времени T_g гидропривода, поставим задачу об адаптивном управлении слежением: найти такое управление $u(z, \dot{z}, t)$ в форме обратной связи, которое обеспечит режим слежения выхода $z(t)$ за произвольным входным сигналом $r(t)$. При этом потребуем, чтобы возможное отклонение (1) было исчезающей функцией времени, поведение которой в процессе

управляемого движения соответствовало бы эталонному процессу, определяемому уравнением

$$\ddot{\delta} + h_1 \dot{\delta} + h_0 \delta = 0, \quad h_0, h_1 > 0, \quad (7)$$

где коэффициенты h_0 и h_1 выбираются такими, чтобы длительность и характер затухания эталонного процесса соответствовали заданным техническим условиям.

Степень приближения, ведомого и ведущего процессов, будем оценивать в ходе функционирования системы значением функционала – критерия локальной оптимизации

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{z}^*(t) - \ddot{z}(t, u)]^2, \quad t \geq 0, \quad (8)$$

где $\ddot{z}^*(t)$ – ускорение, соответствующее эталонному процессу (7); $\ddot{z}(t, u)$ – ускорение ныряющего буя, вызванное управлением или каким-либо возмущением. Чем меньше величина $G(u)$, тем в большей степени процессы $z(t)$ и $r(t)$ в системе сближаются.

4. Конструирование закона управления

Для отыскания $\min G(u)$ в (8) воспользуемся алгоритмом скоростного градиента, который определяет процедуру изменения искомого управления $u(t)$ в соответствии с дифференциальным уравнением первого порядка – алгоритмом градиентного метода [7]

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad (9)$$

где λ – скорость, с которой управление $u(t)$ приближается к оптимальному значению u_{opt} .

Уравнение (9) можно с учётом (8) и (2) преобразовать к виду, определяющему искомым закон адаптивного слежения как решение дифференциального уравнения

$$\frac{du}{dt} = \lambda b [\ddot{z}^*(t) - \ddot{z}(t, u)] \quad (10)$$

с начальными условиями (3), определяющими начальное состояние профилографа.

Далее определим значение ускорения $\ddot{z}^*(t)$, при котором в процессе управления слежением теоретически точно выполняется равенство

$$r(t) - z(t) = 0.$$

С учетом (1) и (7) имеем

$$\ddot{z}^*(t) = \ddot{r}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t). \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10) и выполняя интегрирование левой и правой частей полученного дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях, получаем искомым закон адаптивного управления слежением в виде

$$u(t) = K [h_0 \int_0^t \delta(\tau) d\tau + h_1 \delta(t) + \dot{\delta}(t)], \quad (12)$$

где $K = \lambda b$ – коэффициент усиления регулятора.

Структурная схема адаптивного регулятора, управляющего процессом слежения за траекторией выведения профилографа в назначенное терминальное состояние, приведена на рис. 2, где дифференциальная часть структуры

представлена устройством с постоянной времени T_d .

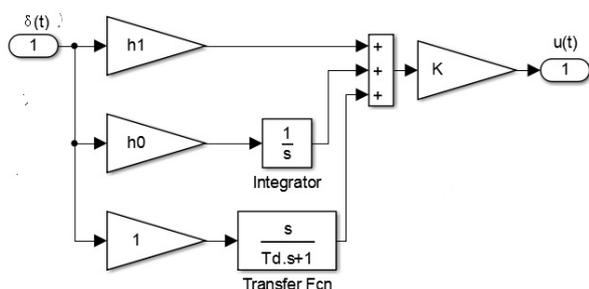


Рис. 2. Структурная схема моделирования адаптивного регулятора в среде Simulink

Как следует из рис. 2, структурная схема адаптивного регулятора, построенная по уравнению (12), полностью совпадает со схемой традиционного ПИД регулятора, параметры настройки которого можно выразить через соответствующие параметры адаптивного регулятора в виде соотношений:

$$k_p = h_1; k_i = h_0; k_d = 1.$$

Последний результат означает, что для реализации адаптивного закона управления слежением (12) можно использовать традиционный ПИД регулятор.

5. Синтез параметров адаптивного регулятора

В роли параметров настройки адаптивного регулятора выступают параметры h_0 и h_1 эталонного процесса (7), значения которых не зависят от параметров моделей функциональных элементов системы терминального управления и вычисляются по формулам [8]

$$h_1 = 2\zeta / \tau; h_0 = 1 / \tau^2,$$

где ζ и τ – коэффициент затухания и постоянная времени эталонного процесса (7).

Коэффициент K вычисляется по формуле [8]

$$K = \lambda b,$$

где $\lambda = \frac{30}{b^2 t_p}$ – постоянная градиентного метода,

определяющая скорость процесса локальной оптимизации; $t_p = 10 t_{pa}$ – желаемое время установления эталонного процесса (7); t_{pa} – время адаптации; b – коэффициент усиления динамической модели профилографа (2).

6. Моделирование системы терминального управления

Для исследования процессов профильных измерений параметров стратифицированной морской среды, выполняемых при помощи системы терминального управления, а также процессов, определяющих показатели качества применяемой системы адаптивного слежения, разработана в среде MATLAB & Simulink компьютерная модель, состоящая из двух взаимодействующих блоков. Первый блок выполнен в форме m-файла, содержащего скрипт программы, обеспечивающей ввод исходных данных, расчёт параметров аналитической модели (6) назначенной траектории

движения профилографа в терминальное состояние и расчёт параметров настройки адаптивного регулятора. Второй блок выполнен в виде S-модели, обеспечивающей построение назначенной траектории движения профилографа, формирование профиля текущей плотности морской воды как функции глубины, построенной по подобным реальным данным, решение нелинейного дифференциального уравнения с переменным параметром, а также выдачу результатов моделирования в числовой и графической формах.

Исходные данные представлены граничными условиями начала и конца назначенной траектории

$$t_s = 0 \text{ с}; z(t_s) = 0 \text{ м}; \dot{z}(t_s) = 0 \text{ м/с.}$$

$$t_f = 200 \text{ с}; z(t_f) = 200 \text{ м}; \dot{z}(t_f) = 0 \text{ м/с.}$$

К исходным данным так же относится желаемое время $t_p = 0,2$ с переходной характеристики следящей системы; параметры гидропривода – $T_g = 0,003$ с и $k_g = 10$ м/В; конструктивные параметры профилографа – $a = 2,042 \text{ м}^{-1}$, $b = 982,1 \text{ м/Вс}^2$; ускорение свободного падения – $g = 9,821 \text{ м/с}^2$, а также плотность морской воды на океанской поверхности – $\rho_g^0 = 1022 \text{ кг/м}^3$.

Исследование динамики поведения системы терминального управления проводилось методом моделирования параллельных процессов с одновременным стартом погружения, управляемого и неуправляемого профилографов в морской среде, вертикальная структура которой содержит 8 границ раздела сред с различной плотностью от 1022 кг/м^3 до 1040 кг/м^3 . При этом, неуправляемый профилограф был сбалансирован при помощи регулятора плавучести таким образом, что его скорость погружения в однородной среде составляла 1 м/с . Управляемый профилограф с аналогичной конструкцией корпуса по закону (12) переводился в терминальное состояние с учётом ограничения на управляющий сигнал $u(t)$.

Результаты приведены на рис. 3. В момент времени $t = 200$ с зафиксировано достижение управляемым профилографом глубины $z = 200,0$ м при вертикальной скорости $\dot{z} = 0,00005 \text{ м/с}$ и плотности морской воды $\rho_g = 1039 \text{ кг/м}^3$.

В то же время, неуправляемый профилограф достиг глубины $z = 196,6$ м при скорости $\dot{z} = 0,97 \text{ м/с}$.

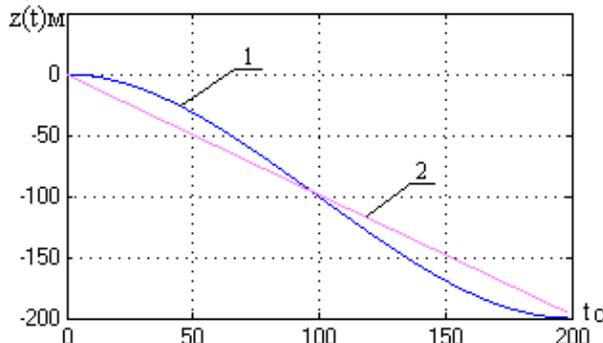


Рис. 3. Траектории управляемого (1) и неуправляемого (2) погружения профилографа

Заключение

Применение терминального управления позволяет организовать крупномасштабные синхронные профильные измерения слоистой структуры океанской среды на обширных площадях. При этом измеряемый параметр (например, плотность), принадлежащий элементарному слою, будет зависеть не только от глубины, но и от географических координат. Для организации таких измерений на борт каждого автономного профилографа, участвующего в эксперименте, достаточно передать по спутниковой связи небольшое количество данных, необходимых для реализации конкретного терминального управления, включая параметры настройки регулятора.

Дальнейшие исследования предполагают создание бортовой универсальной вычислительной платформы с соответствующим программным обеспечением для формирования адаптивных законов управления скоростными режимами движения морских автономных профилографов как подвижных платформ сбора

данных со спутниковой связью в процессе профильных измерений, выполняемых одним или группой профилографов. При этом потребуются применение более быстродействующих и, следовательно, более энергоёмких регуляторов плавучести по сравнению с известными, которые используются в профилографах класса *Argo*, рассчитанных на многолетние сроки автономной работы.

Скорость профилирования ограничена, как показано в [6], значением вертикальной скорости профилографа до 0,12 м/с, что обусловлено инерционными свойствами применяемых датчиков температуры морской воды и требованиями стандарта *WOCE* к точности измерений этого гидрологического параметра.

Повышение скоростей профилирования в целях оперативной океанографии и, в частности, для обнаружения и измерения внутренних волн, возникающих в океанских глубинах, возможно в случае, когда не требуется измерение температуры морской воды, а измеряется только профиль её плотности, например, как показано в [9].

Литература

1. Сайт Международной программы Argo. URL: <http://www.argo.ucsd.edu>. 29.06.2019.
2. Коротаев Г.К. Оперативная океанография – новая ветвь современной океанологической науки // Вестник российской академии наук, 2018, том 88, № 7, с. 579–588.
3. Батенко А.П. Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.
4. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами // Известия РАН. 1998. Вып. 6. С. 33–45.
5. Краснодарец Л.А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН Серия ТиСУ. 2008. №2. С. 141–153.
6. Краснодарец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.
7. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах. СПб.: Изд-во СПб университета, 2001. 244с.
8. Краснодарец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Синтез и моделирование системы управления // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 5. С. 70–82.
9. Краснодарец Л.А. Метод определения вертикального профиля плотности морской воды на основе измерений параметров движения неуправляемого автономного зонда // Системы контроля окружающей среды. Науч. Техн. журнал.– Севастополь, 2017.– №10. – С. 8 – 15.

References

1. Sait Megdunarodnoy programmi Argo. URL: <http://www.argo.ucsd.edu>. 29.06.2019.
2. Korotaev G.K. Operativnaya okeanografiya – novaya vetv sovremennoy okeanologicheskoi nauki // Vestnik rossiyskoi akademii nauk, 2018, tom 88, № 7, s. 579–588.
3. Batenko A.P. Sistemi terminalnogo upravleniya. M.: Radio i svyaz, 1984. 160 s.
4. Krutko P.D. Algoritmi terminalnogo upravleniya lineinimi dinamicheskimi sistemami // Izvestiya RAN. 1998/ Vip.6. S.33-45.
5. Krasnodubets L.A. Terminalnoe upravlenie v morskikh nabludatelnykh sistemakh s podvignimi platformami sbora dannikh // Izv. RAN Seriya TiSU. 2008. №2. S.141-153.
6. Krasnodubets L.A., Zaburdaev V.I., Alchakov V.V. Upravlenie morskimi buyimi– profilemerami kak metod povisheniya reprezentativnosti termokhalinnikh izmerenii. Modeli dvigeniya // Morskoi gidrofizicheskii gurnal. 2012. №4. S. 69–79.
7. Antonov V.N., Terekhov V.A., Tukin I.U. Adaptivnoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh. SPb. Izd-vo CPb unsversiteta, 2001. 244 s.
8. Krasnodubets L.A., Zaburdaev V.I., Alchakov V.V. Upravlenie morskimi buyimi– profilemerami kak metod povisheniya reprezentativnosti termokhalinnikh izmerenii. Sintez I modelirovanie sistemi upravleniya // Morskoi gidrofizicheskii gurnal. 2012. №5. S. 70–82.
9. Krasnodubets L.A. Metod opredeleniya vertikal'nogo profilya plotnosti morskoy vody na osnove izmereniy parametrov dvizheniya neupravlyayemogo avtonomnogo zonda // Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy. Nauch. Tekhn. zhurnal.– Sevastopol', 2017.– №10. – S. 8 – 15.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 62-83:629.584

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
СТАБИЛИЗАЦИИ СУДНА НА КУРСЕ****Яна Богдановна Волянская**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрической инженерии судовых и роботизированных комплексов

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 электрической инженерии судовых и роботизированных комплексов

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

54000, 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

Валерий Анатольевич Шевченко

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов

Национальный университет «Одесская морская академия»

65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8

e-mail: vash4891@gmail.com

Сергей Юрьевич Труднев

кандидат технических наук, доцент, декан мореходного факультета

ФГБОУВО «КамчатГТУ»

683980, Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35

e-mail: trudnev@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрен принцип построения системы управления авторулевым судна, обеспечивающей повышение точности стабилизации судна на заданном курсе. Цель достигается с помощью усовершенствования алгоритма функционирования авторулевого. Предложена структурная схема и модель двуканальной системы управления, позволяющая: выделить точку приложения основного возмущения на корпус судна; провести оценку воздействия внешних возмущений; сформировать передаточную функцию корректирующего звена положительной обратной связи с помощью дополнительного канала управления. Модель двуканальной системы управления курсом судна разработана средствами Matlab/Simulink. Результаты математического моделирования подтвердили эффективность функционирования системы с каналом оценки и компенсации основного возмущения. Установлено, что повышение эффективности стабилизации курса судна обусловлено упреждающим воздействием системы управления на рулевое устройство судна, сформированным каналом положительной обратной связи по оцененному возмущению. Показано, что влияние второго канала управления позволяет снизить "рыскание" судна и тем самым снизить расход топлива и потери ходового времени.

Ключевые слова: авторулевой, быстродействие, ветро-волновые возмущения, двуканальная система управления, курсовой угол, морское судно, точность стабилизации курса.

**RESEARCH OF POSSIBILITIES TO INCREASE THE EXACTNESS OF SHIP
STABILIZING ON A COURSE****Yana B. Volyanskaya**

the Associate Professor, Candidate of Technical Science

the Associate Professor of department of electrical engineering of ship and robotized complexes

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 engineering of ship and robotized complexes

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Heroiv Ukrainy Ave., 9, Nikolaev, 54000, Ukraine
e-mail: vffogres@gmail.com

Oleh 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

Valerii A. Shevchenko

the Associate Professor, Candidate of Technical Science,
the Associate Professor of department of electrical equipment and automation of ships
Odessa National Maritime Academy
Didrikhson Str., 8, Odessa, 65029, Ukraine
e-mail: vash4891@gmail.com

Sergey Yu. Trudnev

the Associate Professor, Candidate of Technical Science
Dean of the Marine Faculty
Kamchatka State Technical University
Kluhevskaja Str., 35, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683980, Russian Federation
e-mail: trudnev@mail.ru

Abstract

The article discusses the principle of constructing a control system for an autopilot of a ship, ensuring an increase in the accuracy of stabilization of the ship on a given course. The goal is achieved by improving the autopilot functionality algorithm. A block diagram and a model of a dual-loop control system have been proposed, which allows: to single out the point of application of the main perturbation on the ship's hull; assess the effects of external disturbances; to generate the transfer function of the corrective element of positive feedback with the help of an additional control loop. The model of dual-loop ship heading control system was developed by means of Matlab / Simulink. The results of mathematical modeling have confirmed the effectiveness of the system with the loop of evaluation and compensation of the main disturbance. It has been established that the increase in the efficiency of stabilization of the ship's course is due to the preemptive effect of the control system on the steering device of the ship, formed by a loop of positive feedback on the estimated disturbance. It is shown that the influence of the second control loop reduces the yaw of the ship and thereby reduce fuel consumption and loss of running time.

Key words: autopilot, speed, wind-wave disturbances, dual-loop control system, course angle, sea ship, course stabilization accuracy.

Introduction

Ship's navigation safety and operational characteristics improvement are important tasks of modern maritime transport. Such tasks require continuous development of ships' navigation control systems. One of the key components of a ship's navigation control system is the course control system (autopilot).

The course control system of a modern marine ship must comply with international requirements (IMO Res. A.342 (IX), IMO Res. MSC. 64 (67) Annex 3, IMO Res. A694 (17), IMO Res. A.822 (19) and ISO11674 (2006) / 16329 (2003) for High Speed Crafts, IEC 62065 Track Control System).

According to the requirements the main tasks of the autopilot are: automatic course keeping, course changing with set angular velocity or given radius, ship's track control using Electronic Chart Display and Information System (ECDIS).

Autopilot effective operation leading to reducing ship's yawing and, as follows, reduces propulsion energy losses and fuel consumption. Thus, the development of autopilots and track control systems which provides accurate course changing and stabilization in varying weather and load condition is an important task.

The goal of this research is ship's course stabilization accuracy improvement by upgrading an

autopilot configuration in order to take into account wind-wave disturbances.

Research findings

Today most of automated course control systems (ACCS) operation is based on the use of a ship's mathematical model [1–5]. Obviously if ship's dynamics mathematical model (MM) is more accurate then it's allows to synthesize ACCS more effective and as follows to decrease losses, steering gear load and fuel consumption for propulsion.

At present, ship's movement control theory allows to use different MM [3, 4] which describes adequately ship's movement physical processes. Usually marine ship mathematical model is based on six degrees of freedom rigid body movement mathematical model [2, 4, 5]. International Maritime Organization (IMO) had developed and adopted resolution A.751(18), regulating the necessity of ship's dynamics MM use when solving navigational safety practical tasks [6]. Simplified Nomoto-models [1–3, 6, 7] are recommended by authorities to use in marine autopilots. Second order Nomoto model [4, 6–8] can be described by equation:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2 \omega / dt^2) + (T_1 + T_2) (d\omega / dt) + \omega + H(\omega) = K \cdot \alpha_r + KT_3 (d\alpha_r / dt) \quad (1)$$

where ω – angular velocity (speed) of the ship; $H(\omega) = v_1|\omega| + v_2\omega^3$ – the nonlinear function of the angular velocity; $T_1, T_2, T_3, K, v_1, v_2$ – the parameters of the mathematical model; α_r – rudder angle.

Equation (1) parameters estimation are presented in [9], where is taken into account that $d\psi(t)/dt = K_1 \cdot \omega(t)$. In this formula are indicated: $\psi(t)$ –course angle; K_1 – ship design factor.

Modern autopilots configuration (NAVipilot xxx Series from Furuno, AP3xxx from Navis Engineering OY, PT500D from Yokogawa, NautoPilot 5000,

NP2025PLUS from Raytheon, PilotStar D, Saura SA-10, Navitron, etc.) allows to adjust its operation modes flexibly, taking into account various factors and external influence, using various sensors. As example it is shown on Fig. 1 "NAVIPILOT 4000" autopilot block diagram.

Most well-known ACCS [1–4, 10–13] use the PID-regulation algorithms and are based on the stabilization principle "by deviation". But there is a class of control

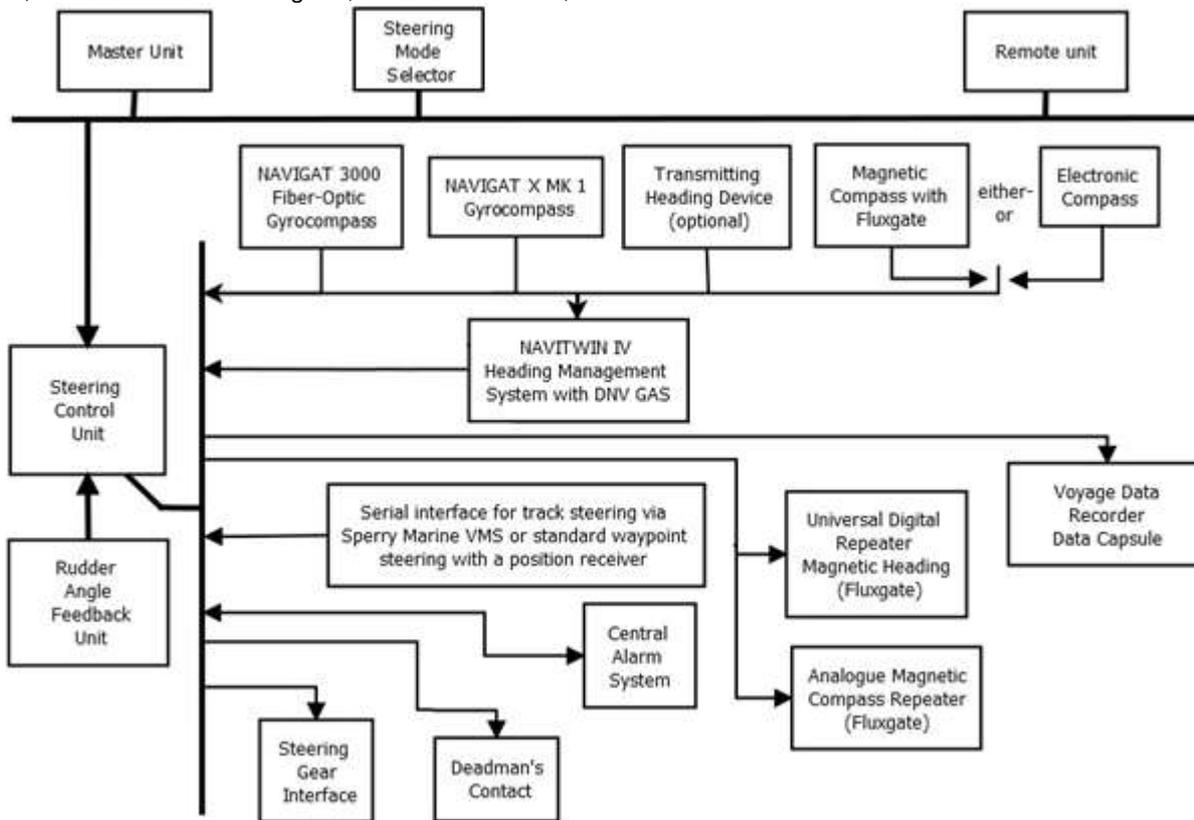


Fig. 1. Block diagram of the "NAVIPILOT 4000" autopilot

systems based on the principles of dual-loop (combined) control. However, this principle is almost not applied in the ACCS due to the difficulty of external disturbances measurement.

The most sufficient external load (wind, wave) acting on the ship is complex and forms the main disturbing effect on the course stabilization system (CSS). Preliminary, in general form, we will consider the CSS operation features based on the application of two-loop control principle.

Let's assume that main disturbance $I(s)$ at any point of time and its application point to controllable parameter $Y(s)$ stabilization system are known. By adding to any stabilization system disturbance invariance properties it is possible to improve system's static and dynamic properties without losing its stability [7, 8]. One of the requirements of the invariance theory is the presence of two disturbance measurement loops. Thus the main tasks are disturbance measurement, processing and inputting (second loop) in stabilization system. But in control systems practical implementation it is impossible to achieve absolute invariance. It should be noted that real two loop control

systems, as a rule, are providing the compensation of just one chosen disturbance.

Let the perturbation $I(s)$ act on the control object $W_o(s)$ in a closed system ($X(s)$ – is the master signal of the system, $Y(s)$ – is the initial coordinate). The system contains elements described by transfer functions: $W_p(s)$ – PID-regulator, $W_o(s)$ – control object, $W_{fb}(s)$ – feedback sensor. In cases where it is possible to provide additional loop with disturbance information, turning $+ I(s)$ into $- I(s)$ the influence of this disturbance can be completely compensated, as follows from the expression:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{X(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s) - I(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{fb}(s)} + \frac{I(s) \cdot W_c(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{fb}(s)}, \quad (2)$$

if for (2) the condition $I(s) \cdot W_o(s) = I(s) \cdot W_c(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)$ is set, then the

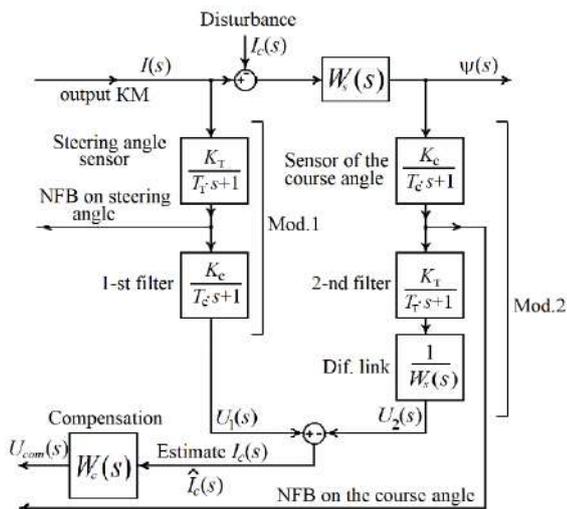


Fig. 4. The section of the structural diagram (see Fig. 2), providing estimation of the main disturbance

It should be noted that the estimated value of the main disturbance will always have a dynamic error, which in the best case is determined by the inertia of the second-order aperiodic link $1/((T_c \cdot T_T) \cdot s^2 + (T_c + T_T) \cdot s + 1)$.

The disturbance, which is estimated with the use of the structural diagram shown in Fig. 4, is determined by the expression:

$$\hat{I}_c(s) = I_c(s) \cdot \frac{K_T}{(T_T \cdot s + 1)} \cdot \frac{K_C}{(T_C \cdot s + 1)} \quad (4)$$

The expression (4) includes the component $1/W_s(s)$, according to (3).

It's obvious that:

- the $\hat{I}_c(s)$ estimation resulting accuracy depends on the accuracy of the technical implementation of the expression $1/W_s(s)$;

- in a system with a course angle sensor and an observation, the estimation will be rough, since the inertia of such a measuring channel is quite high and comparable with the inertia of the steering gear;

- the compensating link transfer function $W_c(s) = W_i^{-1}(s)$ cannot be precisely implemented,

since $W_i(s) \approx \frac{1/k_T}{2 \cdot T_{\mu 1}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1}$, which will

require finding the derivatives of the signal.

Therefore, we accept

$$W_c(s) = \frac{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1}{0,05 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1} \cdot k_T, \quad (5)$$

which, in turn, is also simplified based on an approximate mathematical model of the ship's steering gear.

A ship's mathematical model based on expression (1) can be presented in MatLab/Simulink application (Fig. 5). This model includes non-linearity $H(\omega) = v_1 / \omega / \omega + v_2 \omega^3$ with the use of blocks: Product, Gain 2, Gain 5, Gain 6, Add and Abs.

Fig. 3 system modeling, was carried out using the scheme created in MatLab/Simulink (see Fig. 6), using the methodology described in [17–20].

The main disturbance $I_c(t)$ was modeled, according to recommendations [2, 21, 22], as a periodic function consisting of an algebraic sum of two harmonic effects (SineWave blocks in Fig. 6) of different amplitude (I_{1v} and I_{2v}) and frequency (ω_{1v} and ω_{2v}) with phase shift φ_{v2} :

$$I_c(t) = I_{1v} \sin(\omega_{1v} t) - I_{2v} \sin(\omega_{2v} t + \varphi_{v2}), \quad (6)$$

at the same time, intensive yaw is simulated (associated excitement with an angle between the vector of the velocity of propagation of the wave front

and the diametral plane of the ship is about 40-50 degrees). When an adaptive autopilot is operating (Fig. 1) in this mode, despite the zero static error, the maximum deviation from the course is more than 2°.

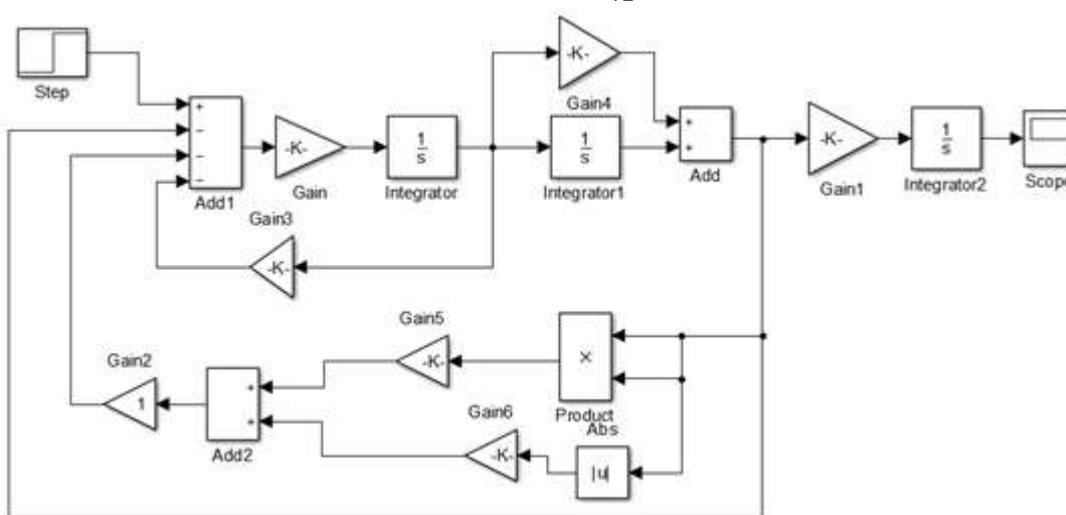


Fig. 5. The implementation of the expression (1) in MatLab / Simulink (Subsystem i Subsystem 4, shown in Fig. 6)

For simulation was used the icebreaker vessel model with the length of the vessel at the design waterline $L_{wl} = 70,5$ m, volumetric displacement $W = 2864$ m³, the total power of the SPP $N = 4600$ kW, with the ship speed interval $V = 2 \dots 20$ kn. The parameters of model (2) are based on the results of identification [6, 7, 9, 16] (see Table 1.)

Table 1

Identified parameters					
K	v_1	v_2	T_1	T_2	T_3
0,031	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-6,1 \cdot 10^{-4}$	31	15	5

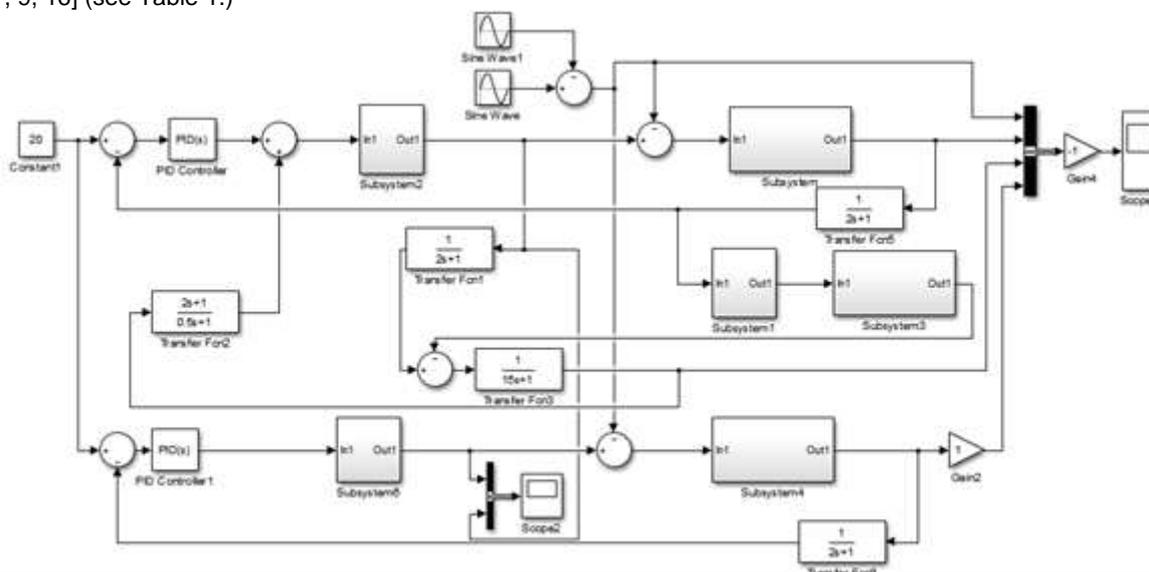


Fig. 6. Ship's ACCS model with the implementation of the principle of two-loop control based on the indirect determination of the main disturbance

The steering gear's dynamics operation are described by the transfer function of an aperiodic link with a time constant $T_i = 3.5$ s, since it takes into account the maximum permissible rudder shifting speed, approximately 4–5 %/s [2, 21] at an angle not exceeding 35°.

The existing control system is trying to work out this disturbance using the PID controller (the parameters of the PID controller are selected using the synthesis of a closed system so that the resulting processes of changing the course angle ψ correspond to the system tuning to the technical optimum according to the task).

Fig. 7, graph. 1, shows the processes of time variation of the periodic disturbance $l_c(t)$, obtained according to expression (6) and leading to changes in

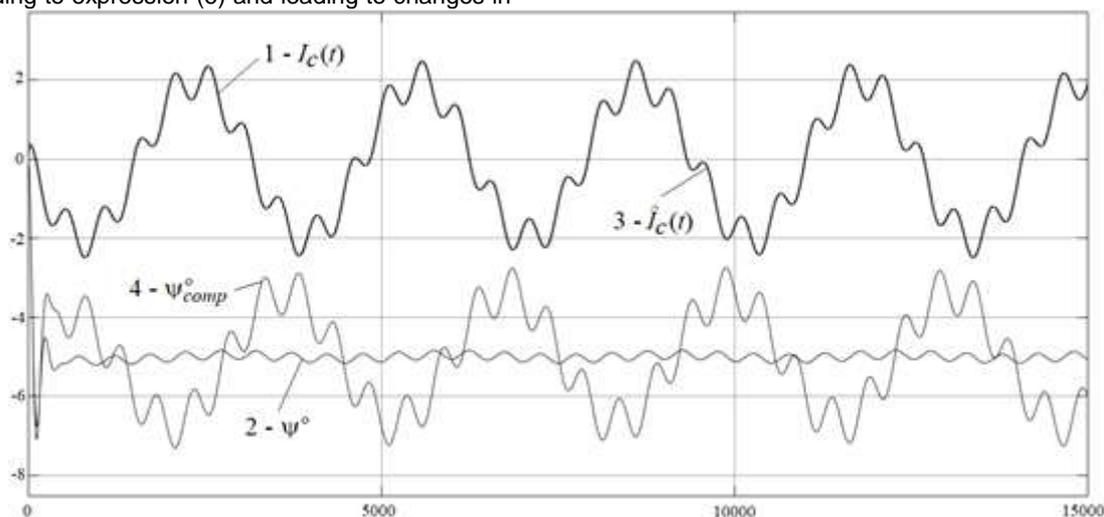


Fig. 7. Results of system modeling (see Fig. 2 and Fig. 3), taking into account the effect of the main disturbance compensation

Analyzing the simulation result, we can conclude that the stabilization of the conditional exchange angle ψ at a given CSS level with a deviation of $\pm 2^\circ$ (Fig. 7, graph. 4) with the classical system with the PID controller is almost not performed. It is clear that the use of an adaptive autopilot under such conditions will

require additional actions by the master to reconfigure it.

Using the proposed estimation $l_c(t)$ and adding the additional compensation loop for the resulting disturbance (see Fig. 3 and Fig. 4), the dynamics of the system, even without changing the autopilot PID

controller, is significantly improved. This is illustrated in graph. 2 shown in Fig. 7.

The estimated value of $I_c(t)$ by the system, shown in Fig. 7, graph. 3 practically coincides with graph. 1, since the estimate lags behind in time, only 13–17 seconds, and in amplitude – by 3–4 %. Graph. 2 – shows the change in the course angle in the proposed dual-loop, partially-invariant to the perturbation of the form (6) system of the course stabilization.

Conclusions

From the analysis of the results of mathematical modeling of the proposed system for stabilizing the marine ship's course angle, it can be determined that such a system is effective and allows to significantly improve the quality control ship's course.

According to the simulation results, subject to the resulting disturbance to the ship (swell 4-5 points on the scale of the World Meteorological Organization), using the classical stabilization system "on deviation" and the "technically optimal" PID controller of the autopilot, the maximum dynamic deviation is 2° with zero static deviation.

Under similar load conditions, but with the work of the proposed dual-loop, partially-invariant to perturbation stabilization system of the course, we obtain the maximum dynamic deviation close to 0,35°, which is caused by the increase in speed of the autopilot due to the preemptive effect on the steering device feedback perturbation. Of course, the proposed control system requires further experimental studies.

Литература

1. Острецов Г. Э., Клячко Л. М. Методы автоматизации управления движением корабля. Москва: Физматлит, 2009, 120 с.
2. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Москва: ТрансЛит, 2007, 376 с.
3. Антонов В. А., Письменный М. Н. Теоретические вопросы управления судном. Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2007, 78 с.
4. Юдин Ю. И., Сотников И. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ. Мурманск, 2006, 95 с.
5. Снопков В. И. Управление судном. СПб.: Професионал, 2004, 536 с.
6. Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Идентификация математической модели судна. Москва: Моркнига, 2015, 141 с.
7. Ayulia Sitio Agisjaihc. An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. IPTEK, The Journal for Technology and Science, 2010, 21, 2. pp. 307–309.
8. Седова Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления курсом судна. Транспортное дело России. Спецвыпуск, 2006. № 7. С. 58–61.
9. Golikov V. V., Golikov V. A., Volyanskaya Ya., Mazur O., Onishchenko O. A simple technique for identifying vessel model parameters. Earth and Environmental Science, 2018, 167, pp. 135–139.
10. Vichuzhanin V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction. Central European Journal of Engineering, 2012, 2, 3. pp. 392–398.
11. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, 3 (8(81)), pp. 10–21.
12. Wen-Hsien Ho, Chen-Huei Hsieh, Jyh-Horng Chou Optimal course handling control for nonlinear ship maneuvering system. International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC, International, 2010, 6. 10, pp. 114–117.
13. Шушляпин Е. А., Карапетьян В. А., Безуглая А. Е., Афонина А. А. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах. Труды СПИИРАН, 2017, 4(53), С. 178–200.
14. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci, 2010, 20, 2, pp. 271–280.
15. Yaohua Hu, Suwu Xu. Generalized predictive controller design for ship track keeping. ICCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2010, 9, 5, pp. 236–239.
16. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models. Norwegian University of Science and Technology, 2009, pp. 100–107.
17. Zan Y. Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink. Open Mechanical Engineering Journal, 2014, 8, pp. 820–827.
18. Волянська Я. Б., Волянський С. М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 2016, 23 (99), С. 39–44.
19. Volyanskaya Ya. B., Golikov V. V., Mazur O. N., Onishchenko O. A., Shevchenko V. A. The system of stabilization of the course of a ship, partly invariant to wind-wave loads. Automation of technological and business processes, 2018, 2 (2018), 10, pp. 57–63.
20. Pipchenko A. D., Shevchenko V. A. Vessel heading robust automatic controller for varying conditions. Marine Intellectual Technologies, 2018, 4 (42), 4, pp. 208–214.
21. Подпорин С. А. Диссертация на соискание науч. степени канд. техн. наук по спец. 05.22.13 – Навигация и управление движением. Одесса, ОНМА, 2009, 181 с.
22. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Заичко С. И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. Одесса, ФЕНИКС, 2005, 272 с.

References

1. Ostretsov G. E., Klyachko L. M. Automation methods of ship motion control, Moscow, Fizmatlit, 2009, 120 p.
2. Vaguschenko L. L., Tsyimbal N. N. Automatic ship motion control systems, Moscow, TransLit, 2007, 376 p.
3. Antonov V. A., Pismennyiy M. N. Theoretical issues of ship management, Vladivostok, MGU im. adm. G. I. Nevelskogo, 2007, 78 p.

4. Yudin Yu. I., Sotnikov I. I. Mathematical models of plane-parallel movement of the ship. Classification and critical analysis, Murmansk, 2006, 95 p.
5. Snopkov V. I. Ship management, SPb, Professional, 2004, 536 p.
6. Yudin Yu. I., Pashentsev S. V. Identification of the mathematical model of the ship, Moscow, Morkniga, 2015, 141 p.
7. Ayulia Sitio Agisjaihc An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver, IPTEK, The Journal for Technology and Science, 2010, 21, 2, pp. 307–309.
8. Sedova N. A. Intelligent ship course control system Transportnoe delo Rossii. Special edition, 2006, 7, pp. 58–61.
9. Golikov V. V., Golikov V. A., Volyanskaya Ya., Mazur O., Onishchenko O. A simple technique for identifying vessel model parameters, Earth and Environmental Science, 2018, 167, pp. 135–139.
10. Vichuzhanin V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction, Central European Journal of Engineering, 2012, 2, 3, pp. 392–398.
11. Budashko V., Nikolskiy V., Onishchenko O., Khniunin V. Decision support system for the design of combined propulsion complexes, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, 3 (8 (81)), pp. 10–21.
12. Wen-Hsien Ho, Chen-Huei Hsieh, Jyh-Horng Chou Optimal course handling control for nonlinear ship maneuvering system. International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC, International, 2010, 6, 10, pp. 114–117.
13. Shushlyapin E. A., Karapetyan V. A., Bezuglaya A. E., Afonina A. A. Non-linear regulators to keep the ship on a given path during "strong" maneuvers, Trudy SPIIRAN, 2012, 4 (53), рз. 178–200.
14. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci, 2010, 20, 2, pp. 271–280.
15. Yaohua Hu, Suwu Xu Generalized predictive controller design for ship track keeping, ICCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2010, 9, 5, pp. 236–239.
16. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models, Norwegian University of Science and Technology, 2014, pp. 100–107.
17. Zan Y. Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink, Open Mechanical Engineering Journal, 2014, 8, pp. 820–827.
18. Volyanska Ya. B., Volyanskiy S. M. Features of the construction of automatic control systems for marine robotics objects, Electrotechnical and computer systems, 2016, 23 (99), pp. 39–44.
19. Volyanskaya Ya. B., Golikov V. V., Mazur O. N., Onishchenko O. A., Shevchenko V. A. The system of stabilization of the course of a ship, partly invariant to wind-wave loads. Automation of technological and business processes, 2018, 2 (2018), 10, pp. 57–63.
20. Pipchenko A. D., Shevchenko V. A. Vessel heading robust automatic controller for varying conditions. Marine Intellectual Technologies, 2018, 4 (42), 4, pp. 208–214.
21. Podporin S. A. Thesis for the competition of scientific. degree of candidate tech. sciences on spec. 05.22.13 – Navigation and traffic control. Odessa, ONMA, 2009, 181 p.
22. Vagushchenko L. L., Vagushchenko A. L., Zaichko S. I. On-board automated systems for driving accuracy Odessa, PHOENIX, 2005, 272 p.

УДК 05.13.06

АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ПОЛУЧЕННОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ТЕРМИНАЛОВ ПО РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЕВРОПЕ

Никита Вячеславович Першин

Главный морской инспектор ПАО «Газпром»
196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д 156 лит. А
тел. (952) 056-76-56 e-mail: nikita.pershin@mail.ru

Аннотация

В настоящее время активно развивается обеспечение энергией потребителей за счет сжиженного природного газа.

Необходимое количество сжиженного природного газа, полученного терминалом по его регазификации может быть определено по объему резервуаров и производительности терминалом по регазификации сжиженного природного газа, что дает возможность планировать и управлять процессами транспортно-логистического комплекса.

Вопросы автоматизации управления транспортно-логистическим комплексом требуют изучения статистических характеристик объекта.

В данной работе проведен статистический анализ производительности для 13 терминалов по регазификации сжиженного природного газа Европы.

Ключевые слова: Сжиженный природный газ, переработка, транспортная схема, танкера-газовозы, дисперсия, математическое ожидание, коэффициент вариации, автоматизированная система управления, терминал по регазификации сжиженного природного газа.

ANALYSIS OF ENERGY AMOUNT RECEIVED FROM REGASIFICATION TERMINALS OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN EUROPE

Nikita V. Pershin

Chief Marine Inspector of PJSC Gazprom
196105, St. Petersburg, Moskovsky Prospect, 156 lit. A
tel. : (952) 056-76-56 e-mail: nikita.pershin@mail.ru

Abstract

At present, power supply to consumers at the expense of liquefied natural gas is actively developing.

The required amount of liquefied natural gas obtained by the terminal for its regasification can be determined by volume of reservoirs and the output capacity of a terminal for the regasification of liquefied natural gas, which makes it possible to plan and manage the processes of a transport and logistics complex.

The issues of automating the management of a transport and logistics complex require the study of the statistical characteristics of the object.

In this paper, a statistical analysis of performance of 13 terminals for regasification of liquefied natural gas in Europe was carried out.

Keywords: Liquefied natural gas, processing, transport scheme, gas tanker carriers, dispersion, mathematical expectation, coefficient of variation, automated control system, terminal for regasification of liquefied natural gas.

Введение

В настоящее время активно развивается обеспечение энергией потребителей за счет сжиженного природного газа (СПГ). При этом, под СПГ понимается природный газ, переведенный после специальной подготовки в жидкое состояние с целью его транспортирования, хранения и использования [1].

Под СПГ-терминалом понимается специальный регазификационный терминал, который состоит из причала, сливной эстакады, резервуаров для хранения, испарительной системы, установок обработки газов испарения из резервуаров и узла учета [2].

Необходимое количество СПГ, полученного терминалом по регазификации СПГ (СПГ-терминал) может быть определено по объему резервуаров и производительности СПГ-терминалов, что дает возможность планировать

и управлять процессами транспортно-логистического комплекса.

Вопросы автоматизации управления транспортно-логистическим комплексом требуют изучения статистических характеристик объекта. Вопросам производительности заводов по производству СПГ посвящена работа [3]. Вместе с тем, представляет интерес анализ количества полученной энергии СПГ-терминалов.

В данной работе проведен статистический анализ для 13 СПГ-терминалов Европы. Данный анализ позволяет определить актуальность развития транспортной системы, обеспечивающий доставку СПГ, приблизительно оценить требуемые объемы доставляемого СПГ, а также предъявить требования к имеющемуся и планируемому к постройке флоту танкеро-газовозов.

1. Процесс получения энергии от СПГ-терминалов

Процесс от добычи природного газа до его доставки потребителям с помощью танкеро-газовозов показан на Рис. 1.



Рис. 1 Процесс от добычи природного газа до его доставки потребителям с помощью танкеро-газовозов

Для обеспечения транспортных перевозок необходимо получить статистику отгрузки СПГ на СПГ-терминалах. Автором по имеющимся данным расхода энергии на СПГ-терминалах требуется их статистическая обработка для получения информации по доставке СПГ с помощью танкеро-газовозов.

Все этапы доставки природного газа потребителям рассматриваются как транспортно-логистическая система (ТЛС) в виде единого комплекс-объекта управления.

В качестве показателя потребности снабжения регионов за счет СПГ удобно рассмотреть получаемую энергию от СПГ-терминала.

Энергия, получаемая от СПГ-терминалом в Европе, измеряется в Гигаватт-час за день [4].

В соответствии с российской стандартизацией энергия, полученная от СПГ-терминалов, измеряется в МДж [5].

Количество принятой энергии в резервуары СПГ-терминала от танкера-газовоза рассчитывается следующим образом [6]:

$$E_j = V_{СПГ} \cdot \rho \cdot GCV_{СПГ} + E_{ОГ}, \quad (1)$$

где, E_j - количество полученной энергии от СПГ в j -ом резервуаре, МДж;

$V_{СПГ}$ - объем жидкой фазы СПГ j -ом резервуаре, m^3 (определяется по градировочным таблицам);
 ρ - плотность СПГ, kg/m^3 , вычисляются по ГОСТ Р 56851-2016 [7];

$GCV_{СПГ}$ - высшая массовая теплота сгорания, МДж/кг, вычисляется по ГОСТ 31369 – 2008 [8];

$E_{ОГ}$ - количество энергии вытесненного газа, МДж вычисляются по следующему выражению:

$$E_{ОГ} = \frac{273,15}{273,15 + T_{ОГ}} \cdot \frac{P_{ОГ}}{1,01325} \cdot V_{ОГ} \cdot GCV_{ОГ}, \quad (2)$$

где, $V_{ОГ}$ - объем отпарного газа в j -ом резервуаре, m^3 . При этом, под отпарным газом понимается газообразная смесь, состоящая преимущественно из метана и азота с примесью этана, водорода, гелия, кислорода, диоксида углерода, которая образуется в емкостях со СПГ, вследствие внешнего теплопритока, в процессе производства, хранения и транспортировки СПГ [9];

$T_{ОГ}$ - температура отпарного газа, в $^{\circ}C$, измеряется с помощью датчиков температуры;

$GCV_{ОГ}$ - высшая объемная теплота сгорания, МДж/ m^3 , вычисляется по ГОСТ 31369 – 2008 [8];

$P_{ОГ}$ - абсолютное давление отпарного газа, кПа, вычисляются с помощью датчиков давления.

Основываясь на выражениях (1), (2) можно сделать вывод, что энергия содержащаяся в резервуарах СПГ-терминала зависит от ряда случайных факторов ($V_{СПГ}$, ρ , $GCV_{СПГ}$, $V_{ОГ}$, $T_{ОГ}$, $GCV_{ОГ}$) и является случайной величиной (СВ). С другой стороны, энергия, которую использует потребитель после преобразования СПГ также является СВ, измеряемой в Гигаватт-час за день.

Очевидно, что бесперебойная работа обеспечивается при достаточности накопленной энергии в резервуарах. Проведем оценку потребляемой энергии от СПГ-терминалов в Европе, находящихся в разных странах и климатических зонах. Расположение СПГ-терминалов представлено на Рис. 2.



Рис.2 Расположение рассматриваемых СПГ-терминалов Европы

В дальнейшем под производительность СПГ-терминала будем понимать, количество полученной энергии, выдаваемой потребителю. Под объемом резервуара – определенную накопительную емкость резервуара для СПГ.

2. Расчет математических оценок случайной величины

При анализе СПГ-терминалов рассмотрим следующее:

1. Точечные и интервальные оценки математического ожидания (МО), дисперсии (Д), среднеквадратического отклонения (СКО), коэффициента вариации (v), суточного потребления энергии за год наблюдения на СПГ-терминалах, в которых за рассматриваемый период объем резервуаров и производительность не менялись.

2. Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, v, суточного потребления энергии за год наблюдения на СПГ-терминалах, в которых за рассматриваемый период объем резервуаров изменялся, а производительность не менялась.

3. Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, v, суточного потребления энергии за год наблюдения на СПГ-терминалах, в которых за рассматриваемый период объем резервуаров не изменялся, а производительность изменялась.

4. Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, v, суточного потребления энергии за год наблюдения на СПГ-терминалах, в которых за рассматриваемый период объем резервуаров и производительность изменялись.

5. Построение тренда временного ряда (количества потребляемой энергии от СПГ в Европе) за 2012-2018 года для исследования динамики для всех рассматриваемых СПГ-терминалов имеющих статистических данные за указанный период.

Вычисления точечных оценок производятся по следующим выражениям [10]:

$$MO_r = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{i=365} E_{ir}, (3)$$

$$D_r = \frac{1}{365 - 1} \sum_{i=1}^{i=365} (E_{ir} - MO_r)^2, (4)$$

$$CKO_r = \sqrt{D_r}, (5)$$

$$v_r = \frac{\sqrt{D_r}}{MO_r}, (6)$$

где, E_{ir} – полученная энергия от СПГ-терминалов за i-ый день рассматриваемого года. Оценки рассчитываются за каждый из рассматриваемых годов.

Вычисления интервальных оценок будут производиться по следующим выражениям [10, 11]:

$$MO_\theta = MO_r \pm \frac{t(1-\frac{1-Y}{2}; N-1)CKO_r}{\sqrt{N}}, (7)$$

$$CKO_{\theta_{1,2}} = \frac{\sqrt{N-1}}{\sqrt{\chi^2_{1,2}}} CKO_r, (8)$$

$$D_\theta = CKO_\theta^2, (9)$$

$$v_\theta = \frac{v_r}{1 \pm k\sqrt{1+2v_r^2}}, (10)$$

где, θ – индекс интервального значения математической оценки;

$t(1-\frac{1-Y}{2}; N-1)$ – критическое значение, определяемое по таблицам Стьюдента для доверительной вероятности (Y) 0,95 и N-1 степеней свободы;

N – объем выборки за один год наблюдений, равно 365;

χ_1^2 и χ_2^2 – критические значения, определяемые по таблицам χ^2 для вероятностей $\frac{1-Y}{2}$ и $1 - \frac{1-Y}{2}$;

K – коэффициент определяемый по выражению:

$$K = \frac{t}{\sqrt{2(N-1)}}, (11)$$

Результаты расчетов по одному СПГ-терминалу, в которых за рассматриваемый период объем резервуаров и производительность либо менялись, либо нет, приведены в таблицах 1-4 [12]. Для остальных 9 имеются аналогичные расчеты, ограничения объема статьи не позволяют привести их. При этом общие выводы по анализу количества полученной энергии будут сформулированы по всем рассматриваемым СПГ-терминалам.

Таблица 1

Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, μ на СПГ-терминалах, на которых за рассматриваемый период объем резервуаров и производительность не менялись.

Терминал / год	Статистические оценки	Точечные и интервальные оценки	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	
South Hook LNG terminal	МО Гигаватт-час за день	Г	74.30	142.75	255.32	349.66	288.35	232.39	296.86	
		θ	70.00 - 78.59	133.29 - 152.22	240.83 - 269.80	338.18 - 361.15	271.19 - 305.51	217.09 - 247.69	282.27 - 311.45	
	Д Гигаватт-час за день	Г	1738.85	8451.74	19797.64	12446.24	27786.36	22096.00	20086.71	
		θ	1511.50 - 2021.95	7346.70 - 9827.73	17209.1 - 23020.79	10818.92 - 14472.55	24153.35 - 32310.10	19207.00 - 25693.33	17460.41 - 23356.91	
	СКО Гигаватт-час за день	Г	41.70	91.93	140.70	111.56	166.69	148.65	141.73	
		θ	38.88 - 44.97	85.71 - 99.13	131.18 - 151.73	104.01 - 120.30	155.41 - 179.75	138.59 - 160.29	132.14 - 152.83	
	μ Гигаватт-час за день	Г	0.56	0.64	0.55	0.32	0.58	0.64	0.48	
		θ	0.51 - 0.62	0.59 - 0.71	0.50 - 0.61	0.30 - 0.35	0.53 - 0.64	0.58 - 0.71	0.44 - 0.52	
	Производительность СПГ-терминала	Гигаватт-час за день	650.00							
	Объем резервуара	куб.м	751.68							

Таблица 2

Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, μ на СПГ-терминалах, на которых за рассматриваемый период объем резервуаров изменялся, а производительность не менялась.

Терминал / год	Статистические оценки	Точечные и интервальные оценки	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	
Zeebrugge LNG Terminal	МО Гигаватт-час за день	Г	73.71	32.80	32.92	72.72	36.54	45.25	63.20	
		θ	65.20 - 82.21	29.63 - 35.96	30.33 - 35.51	64.04 - 81.40	33.98 - 39.09	39.49 - 51.01	57.76 - 68.65	
	Д Гигаватт-час за день	Г	6834.16	946.82	632.51	7112.53	615.79	3132.53	2799.67	
		θ	5940.60 - 7946.79	823.03 - 1100.97	549.81 - 735.48	6182.58 - 8270.48	535.28 - 716.05	2722.96 - 3642.52	2433.62 - 3255.47	
	СКО Гигаватт-час за день	Г	82.67	30.77	25.15	84.34	24.82	55.97	52.91	
		θ	77.08 - 89.14	28.69 - 33.18	23.45 - 27.12	78.63 - 90.94	23.14 - 26.76	52.18 - 60.35	49.33 - 57.06	
	μ Гигаватт-час за день	Г	1.12	0.94	0.76	1.16	0.68	1.24	0.84	
		θ	0.99 - 1.30	0.84 - 1.07	0.69 - 0.86	1.02 - 1.35	0.62 - 0.76	1.08 - 1.45	0.75 - 0.94	
	Производительность СПГ-терминала	Гигаватт-час за день	444.50							
	Объем резервуара	куб.м	382.00 (01.01.17-31.12.18)			374.00 (01.01.12-31.12.16)				

Таблица 3

Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, и на СПГ-терминалах, на которых за рассматриваемый период за рассматриваемый период объем резервуаров не изменялся, а производительность изменялась.

Терминал/год	Статистические оценки	Точечные и интервальные оценки	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	
Fos Cavaou LNG Terminal	МО Гигаватт-час за день	Г	136.49	124.64/ 56.74	100.81	79.37	89.49	112.36	127.72	
		θ	129.88 - 143.10	116.49 - 132.79/ 54.47 - 59.01	94.70 - 106.92	74.79 - 83.94	83.51 - 95.48	107.19 - 117.54	121.42 - 134.03	
	Д Гигаватт-час за день	Г	4118.69	6275.69/ 486.33	3520.36	1973.43	3375.73	2525.75	3752.73	
		θ	3580.18 - 4789.23	5455.26 - 7297.54/ 422.63 - 565.36	3060.08 - 4093.49	1715.41- 2294.71	2934.36 - 3925.32	2195.51- 2936.95	3262.07- 4363.69	
	СКО Гигаватт-час за день	Г	64.18	79.22/ 22.05	59.33	44.42	58.10	50.26	61.26	
		θ	59.83 - 69.20	73.86 - 85.43/ 20.56 - 23.78	55.32 -63.98	41.42 - 47.90	54.17 -62.65	46.86 - 54.19	57.11 - 66.06	
	и Гигаватт-час за день	Г	0.47	0.64/ 0.39	0.59	0.56	0.65	0.45	0.48	
		θ	0.43 - 0.52	0.58 - 0.71/ 0.36 -0.43	0.54 - 0.65	0.51 - 0.62	0.59 - 0.72	0.41 - 0.49	0.44 - 0.53	
	Производительность СПГ-терминала	Гигаватт-час за день	300.00 (12.01.17-31.12.18)			265.60 (01.01.2012-11.01.2017)				
	Объем резервуара	куб.м	330.00							

Таблица 4

Точечные и интервальные оценки МО, Д, СКО, и на СПГ-терминалах, на которых за рассматриваемый период за рассматриваемый период объем резервуаров не изменялся, а производительность изменялась.

Терминал/год	Статистические оценки	Точечные и интервальные оценки	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	
Fos tonkin LNG terminal	МО Гигаватт-час за день	Г	42.46	56.85	63.49	77.96/ 50.11	77.16	93,57	93,27	
		θ	38.86 - 46.06	52.75 - 60.96	58.96 - 68.03	74.65 - 81.27/ 48.03 - 52.19	73.08 - 81.24	89,85 - 97,28	88,69 - 97,85	
	Д Гигаватт-час за день	Г	1223.75	1587.87	1940.61	1034.25/ 409.30	1572.14	1301,14	1981,98	
		θ	1063.75 - 1422.98	1380.26 - 1846.39	1686.88 - 2256.55	899.04 - 1202.65/ 355.74 - 475.88	1366.59- 1828.09	1131,01- 1512,97	1722,842 304,65	
	СКО Гигаватт-час за день	Г	34.98	39.85	44.05	32.16/ 20.23	39.65	36,07	44,52	
		θ	32.62 -37.72	37.15 - 42.97	41.07 - 47.50	29.98 - 34.68/ 18.86 - 21.81	36.97-42.76	33,63- 38,90	41,51 - 48,01	
	и Гигаватт-час за день	Г	0.82	0.70	0.69	0.41/ 0.40	0.51	0,39	0,48	
		θ	0.74 - 0.93	0.64 - 0.78	0.63 - 0.77	0.38 - 0.45/ 0.37 - 0.44	0.47 - 0.56	0,36 - 0,42	0,44 - 0,52	
	Производительность СПГ-терминала	Гигаватт-час за день	80.00 (01.04.15-31.12.18)			150.00 (01.01.12-31.03.15)				
	Объем резервуара	куб.м	95.90 (01.04.04.2015-31.12.18)			147.20 (01.01.15-31.03.15) 139.70 (01.01.14-31.12.14) 156.20 (01.01.13-31.12.12) 167.10 (01.01.12-31.01.12)				

Результаты показывают:

1. Производительность СПГ-терминалов соответствует потребностям потребителей, ни в одном случае не было падения генерации энергии СПГ из-за отсутствия газа;

2. Имеется неравномерность потребления, вызванная наличием выходных и праздничных дней;

3. Максимальное и минимальное значение СВ для 13 СПГ-терминалов, колеблется от 0 до 650.4 Гигаватт-час за день;

4. Максимальные и минимальные значения математических оценок СВ рассматриваемых СПГ-терминалов составляют для МО 12.1-349.7, Д 27.3-27786.4, СКО 5.2-166.7, ν 0.2-2.2.

Анализ данных по всем рассматриваемым СПГ-терминалам приведен в таблице 5.

Таблица 5

**Анализ данных для СПГ-терминалов Европе за 2012-2018 гг.
(измерения приведены в Гигаватт-час).**

№	Терминал/год	СВ наим.	СВ наиб.	МО _Г наим.	МО _Г наиб.	Д _Г наим.	Д _Г наиб.	СКО _Г наим.	СКО _Г наиб.	ν _Г наим.	ν _Г наиб.
1	South Hook LNG terminal	50.6	650.4	74.3	349.7	1738.9	27786.4	47.7	166.7	0.3	0.6
2	Isle of Grain LNG Terminal	0.0	598.0	28.5	102.7	27.3	10703.3	5.2	103.5	0.2	1.4
3	Revithoussa LNG Terminal	0.0	145.2	17.7	43.7	240.9	1074.3	15.5	32.8	0.7	1.3
4	Cartagena LNG Terminal	0.0	171.1	16.3	71.5	239.2	490.3	15.5	22.1	0.3	1.0
5	Huelva LNG Terminal	0.0	319.1	48.4	124.6	976.9	2512.7	31.3	50.1	0.3	0.7
6	Mugardos LNG Terminal	0.0	276.6	27.9	45.4	104.4	420.7	10.2	20.5	0.3	0.7
7	Rotterdam Gate Terminal	4.0	385.4	12.1	81.1	198.2	11213.1	14.1	105.9	1.1	2.2
8	Sines LNG Terminal	4.3	210.2	35.2	113.7	134.3	1745.3	11.6	41.8	0.3	0.5
9	Zeebrugge LNG Terminal	3.0	518.4	32.8	73.7	615.8	7112.5	24.8	84.3	0.8	1.2
10	Barcelona LNG Terminal	14.8	381.2	81.4	157.1	1074.9	3301.3	32.8	57.5	0.3	0.5
11	Bilbao LNG Terminal	20.6	222.2	45.6	110.2	247.7	1125.6	15.7	33.6	0.3	0.4
12	Fos Cavaou LNG Terminal	0.0	300.0	56.7	136.5	486.3	6275.7	44.4	79.2	0.4	0.7
13	Fos tonkin LNG terminal	0.0	203.1	42.5	93.6	409.3	1981.9	10.1	44.5	0.4	0.8

**3. Зависимость изменения
производительности СПГ-терминалов Европы
за 2012-2018 годы**

Для анализа процессов за промежуток времени с 2012-2018 годы целесообразно рассмотреть количество полученной энергии по годам для всех рассматриваемых СПГ-терминалов. Для этого воспользуемся следующими выражениями:

$$E_{об} = NMO_{Г} \quad (12)$$

$$E_{обГ} = \sum E_{об} \quad (13)$$

где, $E_{об}$ – сумма полученной энергии на одном из рассматриваемых СПГ-терминалов за один год.

$E_{обГ}$ – сумма полученной энергии всех рассматриваемых СПГ-терминалов за определенный год.

Результаты расчета приведены в таблице 6

Таблица 6

Полученная энергия от СПГ-терминалов в Европе за 2012-2018 гг. в Гигаватт/час за день по годам и суммарно за каждый год.

№	Терминал/год	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
1	South Hook LNG terminal	27119.50	52103.75	93191.80	127625.90	105247.80	84822.35	108353.90
2	Isle of Grain LNG Terminal	37475.10	16373.00	13153.00	10876.00	10459.00	10413.10	28060.20
3	Revithoussa LNG Terminal	11518.70	15958.20	8881.90	6485.70	6586.80	6523.90	13999.86
4	Cartagena LNG Terminal	5964.50	7246.20	9125.40	13460.70	9793.50	13276.20	26112.90
5	Huelva LNG Terminal	43012.91	45472.39	36648.30	26697.00	17652.40	23111.80	34870.00
6	Mugardos LNG Terminal	11792.70	11636.50	11623.90	14385.80	10167.40	13698.50	16583.60
7	Rotterdam Gate Terminal	29598.90	8365.10	4902.90	9525.00	4423.80	7127.10	7274.00
8	Sines LNG Terminal	41499.90	39026.79	18205.80	16189.10	12855.80	19513.60	22320,70
9	Zeebrugge LNG Terminal	26902.40	11970.50	12015.90	26543.40	13336.10	16516.00	23069,40
10	Barcelona LNG Terminal	51937.20	57337.30	34165.20	33585.50	29715.50	16516.00	54360,91
11	Bilbao LNG Terminal	31544.10	29189.10	17031.00	21177.10	16987.10	29129.60	40231,69
12	Fos Cavaou LNG Terminal	49818.81	44748.40	36794.99	28968.90	32665.60	41012.60	46618,60
13	Fos tonkin LNG terminal	15499.10	20751.80	23175.50	25949.50	28163.50	34151.40	34042,70
Е _{обГ}		383683,82	360179.03	318915.59	361469.60	298054.30	315812.15	455898.46

На основании таблицы 6 построим график зависимости производительности СПГ-терминалов по годам (Рис.3).

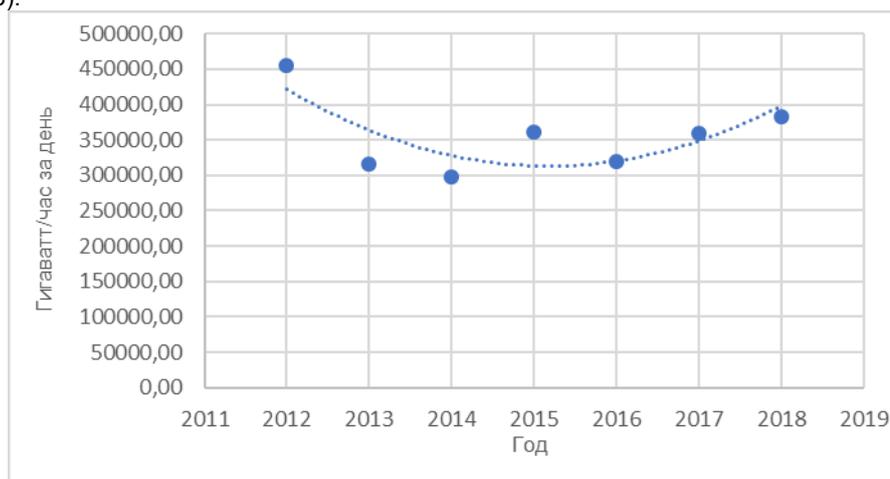


Рис.3. График зависимости производительности СПГ-терминалов по годам

На рис. 3 проведена зависимость изменения производительности СПГ-терминалов по годам, аппроксимация зависимости степенной функции имеет вид $y = 10728x^2 - 4 \cdot 10^7 + 07x + 4 \cdot 10^7 + 10$. Анализ данных показывает уменьшение

производительности СПГ-терминалов с 2012 по 2014 годы и процесс нарастания до 2018 года. Эти данные соответствуют состоянию мировой экономики в данный период времени [13].

Выводы

В результате обработки статистических данных получены интервальные оценки моментов распределения СВ, а также установлена взаимосвязь расхода энергии, полученной от СПГ-терминалов, с состоянием мировой экономики.

Полученные результаты обработки статистических данных для 13 рассматриваемых СПГ-терминалов в Европе позволяют сделать следующие выводы:

1. Интегральные показатели указывают на соответствие зависимости СПГ от внешних факторов, в данном случае экономических;

2. После выхода из мирового кризиса имеется тенденция увеличения потребляемой энергии от СПГ-терминалов;

3. С учетом возрастания потребности получения энергии от СПГ-терминалов существует

необходимость увеличения количества единиц флота танкеров-газовозов и увеличения производительности заводов по производству СПГ.

4. Анализ неравномерности количества потребляемой энергии с учетом различных свойств перевозимого СПГ позволяет сформулировать требования к производительности СПГ-терминалов, избыточности объемов хранения СПГ, производительности заводов по производству СПГ, грузместимости имеющегося и планируемого к постройке флота танкеров-газовозов для бесперебойной работы всей ТЛС.

Проведенный анализ позволяет предъявить требования к числу и способу подачи танкеров-газовозов на СПГ-терминалы и разработать эффективные алгоритмы функционирования автоматической системы управления перевозками.

Литература

1. ГОСТ Р 57433-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Использование природного газа в качестве моторного топлива. Термины и определения. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2017. – 2 с.
2. Официальный сайт «Neftegaz» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru>.
3. Баранов Л.А. Анализ производительности завода по производству сжиженного природного газа как объекта автоматизированной системы управления перевозками / Л.А. Баранов, Н. В. Першин// Наука и техника транспорта. – 2019. - № 2. – 21-32 с.
4. ГОСТ 8.417-2002. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин – М.: Стандартиформ, 2010. – 7 с.
5. Чертов А.Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие. – М: Высш. шк., 1990. – 74 с.
6. LNG Custody transfer handbook GIIGNL (5th edition). 2017. – p. 11-12, p. 69.
7. ГОСТ Р 56851-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Газ природный сжиженный. Метод расчета термодинамических свойств. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2016. – 3-5 с.
8. ГОСТ 31369 - Стандарт 2008 (ИСО 6976:1995). Межгосударственный стандарт. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2019. – 6-7 с.
9. ГОСТ Р 56835-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Газ природный сжиженный. Газ отпарной производства газа природного сжиженного. Определение компонентного состава методом газовой хроматографии. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2016. – 3 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей (издание четвертое, стереотипное). М: Изд-во НАУКА, 1969. –210-251, 317-330 с.
11. Лагин Г.Ф. Биометрия: учебное пособие для биол. спец. ВУЗов – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Высш. шк., 1990. – 109 с.
12. Официальный сайт «Aggregate LNG Storage Inventory» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alsi.gie.eu/#/>
13. Официальный сайт «Финмаркет новости экономики» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.finmarket.ru.

Reference

1. GOST R 57433-2017. National standard of the Russian Federation. Use of natural gas as a motor fuel. Terms and definitions. - M.: Standartinform Publishing House, 2017. - 2 p.
2. Official site «Neftegaz» [Electronic resource]. - Access mode: <https://neftegaz.ru>.
2. Baranov L.A. Analysis of the performance of the plant for the production of liquefied natural gas as an object of an automated transportation management system / L.A. Baranov, N. V. Pershin // Science and Transport Technique. - 2019. - № 2. - 21-32 p.
4. GOST 8.417-2002. Interstate standard. State system for ensuring uniformity of measurements. Units of magnitude - M.: Standartinform, 2010. – p.7.
5. Chertov A.G. Physical quantities (terminology, definitions, designations, dimensions, units): Ref. allowance. - M: Higher. school., 1990. – p. 74.
6. LNG Custody transfer handbook GIIGNL (5th edition). 2017. - p. 11-12, p. 69
7. GOST R 56851-2016. National standard of the Russian Federation. Natural liquefied gas. The method of calculating thermodynamic properties. - M.: Standartinform Publishing House, 2016. – p. 3-5.

8. GOST 31369 - Standard 2008 (ISO 6976: 1995). Interstate standard. Natural gas. Calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe index based on the composition. - M.: Standartinform Publishing House, 2019. – p. 6-7.
9. GOST R 56835-2015. National standard of the Russian Federation. Natural liquefied gas. Gas for stripping production of natural liquefied gas. Determination of component composition by gas chromatography. - M.: Publishing House Standardinform, 2016. – p. 3.
10. Wentzel E.S. Probability theory (fourth edition, stereotyped). M: Science Publishing House, 1969. – p. 210-251, p.317-330.
11. Lagin G.F. Biometrics: a textbook for biol. specialist. Universities - 4th ed., Pererab. and add. - M: Higher. school, 1990. – p. 109.
12. Official site "Aggregate LNG Storage Inventory" [Electronic resource]. - Access mode: <https://alsi.gie.eu/#/>
13. Official site Finmarket Economy News [Electronic resource]. - Access mode: www.finmarket.ru.

УДК 629.5.061.11

ШВАРТОВКА СУДНА С КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ

Людмила Серафимовна Грошева

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники
Волжский государственный университет водного транспорта
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

Владимир Иванович Мерзляков

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники
Волжский государственный университет водного транспорта
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

Валерий Иванович Плющаев

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники
Волжский государственный университет водного транспорта
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru

Аннотация

В России строится пассажирское судно, имеющее уникальный набор двигателей – два гребных колеса и азимутальное подруливающее устройство. Традиционный руль отсутствует. Управление судном осуществляется изменением соотношения частот вращения гребных колес, что предъявляет повышенные требования к квалификации судоводителя, особенно при выполнении швартовых операций. Указанный набор двигателей придает судну уникальные свойства – позволяет реализовать движение судно лагом в любом направлении. Это позволяет существенно упростить процесс швартовки судна. В данной работе рассматривается возможность автоматизации процесса швартовки колесного судна. Предложен алгоритм управления, обеспечивающий автоматический режим подхода судна к причальной стенке, исследованы динамические характеристики судна при реализации данного алгоритма. Определена область работоспособности предложенного алгоритма при изменении силы и направления ветра. Полученные результаты будут использованы при проектировании системы управления строящегося колесного судна «Золотое кольцо».

Ключевые слова: судно, колесный движительно-рулевой комплекс, подруливающее устройство, швартовые операции, способы измерения расстояния.

MOORING SHIP WITH PROPELLER STEERING COMPLEX

Lyudmila S. Grosheva

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radio Electronics
Volga State University of Water Transport
603005, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

Vladimir I. Merzlyakov

PhD in Engineering Science, Senior Lecturer of the Department of Radio Electronics
Volga State University of Water Transport
603005, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

Valery I. Plyushchaev

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Radio Electronics
Volga State University of Water Transport
603005, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vir@vgavt-nn.ru

Abstract

In Russia, a passenger ship is being built that has a unique set of propulsion units - two propellers and an azimuth thruster. The traditional rudder is missing. The vessel is controlled by changing the ratio of twin-propeller rotational speeds, which imposes increased requirements on the navigator's qualifications, especially when performing mooring operations. The specified set of propulsion units gives the ship unique properties — it allows the vessel to move broadside in any direction. This allows significantly simplifying the process of mooring a vessel. In this paper, a possibility of automating the process of mooring of a propelled vessel is reviewed. A control algorithm that provides an automatic mode of approaching vessel the mooring berth is proposed, the dynamic characteristics of the vessel during the implementation of this algorithm are investigated. The area of the proposed algorithm efficiency is determined when changing the strength and direction of the wind. The results will be used in the design of the control system of the "Golden Ring" propeller vessel under construction.

Key words: vessel, propeller steering complex, thruster, mooring operations, methods of measuring distance.

Одними из самых сложных операций, выполняемых судоводителем, являются швартовка и отшвартовка судна [1,2]. В этих операциях максимально используются возможности рулевых устройств, движителей судна и подруливающих устройств. Часто при выполнении этих операций определяющее влияние оказывают внешние условия – течение и ветер. Самым распространенным видом швартовых операций является постановка судна к причалу бортом. При этом для гашения остаточной инерции судна выполняется навал на причал. Сила навала определяется инерционными свойствами судна, внешними условиями (ветер, течение) и энергоемкостью отбойных устройств причала. Если энергия навала будет больше допустимой, судно и причал могут получить повреждения. Для уменьшения силы навала для винтового судна рекомендуется подходить к причалу под углом 15-20 градусов с минимальной скоростью, перед касанием корпуса судна и причала погасить инерцию, затем при помощи машин прижать корму к причалу.

На строящихся судах проекта ПКС180 используется не встречающаяся ранее комбинация движителей – два гребных колеса с независимыми приводами, расположенные в кормовой части судна, и азимутальное подруливающее устройство, установленное в носовой части судна. Традиционный руль отсутствует [3-6].

Как показывают результаты моделирования, судно с таким набором движителей, может двигаться по любой, наперед заданной траектории, в том числе и лагом [7]. Таким образом, для судов с КДРК может быть предложен более безопасный способ швартовки – подход к причалу под углом в 90° (лагом) с гашением скорости подхода до нуля в момент касания стенки причала.

На рис. 1 приведены результаты моделирования движения судна лагом под углом 90° относительно первоначального курса при разных начальных скоростях движения судна (частота вращения колеса составляет 0.05 1/с для траектории 1 на рис. 1а и 0,1 1/с для траектории 2). На рисунке линиями изображено положение корпуса судна. Для реализации движения лагом выключается одно из колес (режим свободного вращения), система управления обеспечивает уравновешивание вращающихся моментов, создаваемых работающим гребным колесом и подруливающим устройством и, изменяя направление и вектор тяги подруливающего устройства, обеспечивает перемещение судна лагом в заданном направлении (в данном случае под углом 90° относительно первоначального курса).

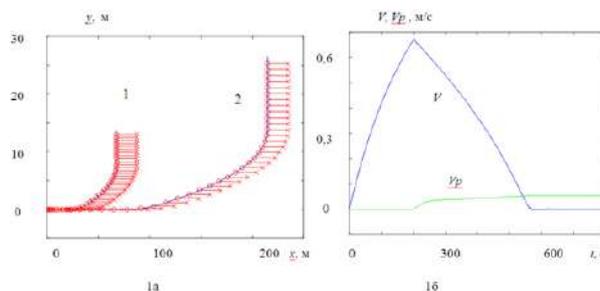


Рис. 1. Траектория движения (1а) и изменения продольной V и поперечной Vp составляющих скорости судна (1б)

При включении подруливающего устройства продольная составляющая скорости снижается до нуля, поперечная скорость возрастает и стабилизируется на уровне 1.8 км/ч (рис. 1 для скорости вращения гребных колес 0,05 1/с).

На рис. 2 представлены зависимости поперечной составляющей скорости судна и длины участка выхода судна на заданную траекторию от частоты вращения гребного колеса.

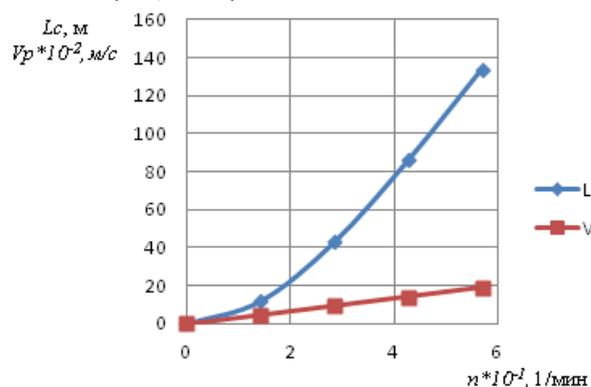


Рис. 2. Зависимости достигаемой поперечной составляющей скорости судна Vp и длины Lc участка выхода судна на заданную траекторию от частоты вращения гребного колеса n

При проведении швартовки система управления должна погасить поперечную скорость судна до нуля при подходе к причальной стенке, при этом обеспечивая заданную ориентацию корпуса судна относительно причальной стенки.

Цель данной работы – синтез алгоритма управления судна с КДРК, обеспечивающего автоматический режим подхода судна к причальной стенке и подбор технических средств, обеспечивающих процесс швартовки.

В процессе подхода к причалу можно выделить несколько этапов:

- задание желаемой скорости движения судна при следовании к точке причаливания (задает судоводитель);

– задание точки причаливания (что позволяет системе управления рассчитать траекторию движения к причальной стенке) и линии причаливания (что позволяет системе управления рассчитать положение корпуса судна в момент причаливания). Указанные операции выполняются судоводителем с использованием электронной системы отображения картографической информации (например, картплоттера), путем задания двух меток или маршрутных точек на причальной стенке;

– расчет траектории движения судна к причальной стенке (вычисляется системой управления на основании данных, полученных с картплоттера – текущих координат судна, координат причальной стенки, текущей скорости судна);

– следование судна по заданной траектории к причальной стенке (система управления обеспечивает движение с заданной скоростью и заданной ориентацией корпуса судна);

– причаливание (снижение до нуля поперечной скорости с сохранением заданной ориентации корпуса).

На последнем этапе требуются технические средства контроля за положением корпуса судна относительно причальной стенки. Для этих целей не могут быть использованы штатные судовые навигационные приемники ГЛОНАСС/GPS, поскольку погрешность определения координат превышает 4 м [8].

В настоящее время предлагаются следующие виды измерителей:

- лазерные;
- ультразвуковые;
- использующие радиосигналы.

Лазерные и ультразвуковые измерители имеют высокую точность измерений, но в тоже время они обладают рядом недостатков, затрудняющих применение на водном транспорте [9].

Для определения расстояния до причала может быть использован метод на основе измерения времени распространения радиосигнала от передатчика до приемника. Наиболее подходящим по точности является ультраширокополосная технология (UWB) совместно с методом SDS-TWR (симметричное двухстороннее двухступенчатое измерение расстояний). Она предназначена для измерения расстояний от 0 до 20 метров с точностью 10 см. Приемопередатчики используют частоты 3,5-6,5 ГГц, максимальная мощность 50 мВт. Такая технология реализована в виде платы Nanotron swarm bee ER Development Kit Plus Board [10,11,12]. Эти платы являются основой измерительных модулей, размещаемых на судне и причале. Кроме информации о расстоянии между модулями, можно получить данные о скорости и ускорении по каждому измерительному модулю за счет встроенного 3-х координатного акселерометра [12].

Данное оборудование может быть использовано в системе автоматизации процесса швартовки для определения местоположения судна относительно причальной стенки на заключительном этапе швартовки.

При подходе к причальной стенке поперечная составляющая скорости должна

снизиться до нуля. На рис. 3 представлены зависимости пути Y_c и времени T_c торможения судна при движении лагом от частоты вращения гребного колеса при различных режимах управления гребным колесом.

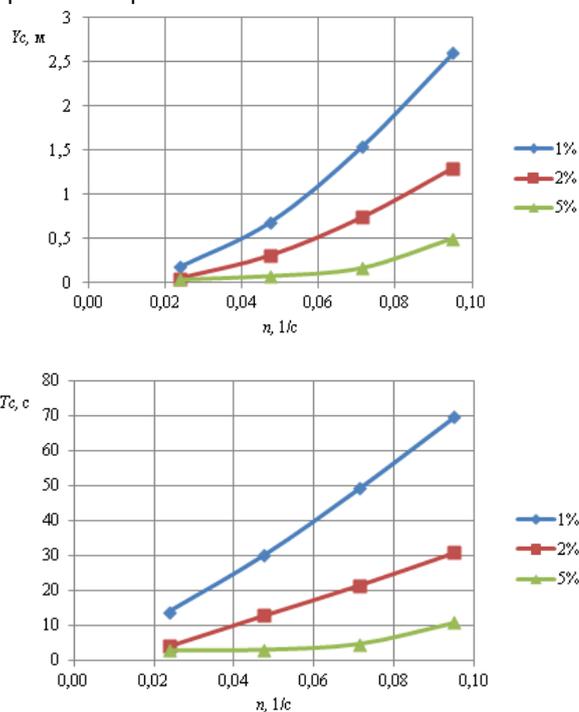


Рис. 3. Зависимости пути Y_c и времени T_c торможения судна при движении лагом от частоты вращения гребного колеса

Снижение оборотов гребного колеса производится на фиксированный шаг (на графиках представлены зависимости для трех значений шага – 1, 2 и 5 процентов от максимального значения оборотов гребного колеса $n_{max} = 28.5$ об/мин).

Как видно из графиков, тормозной путь судна в поперечном направлении не превышает нескольких метров (без учета внешних воздействий), а время торможения 70 секунд.

Судно имеет размеры 81,6 * 13,8 * 9,5 м, осадку всего 1.2 м. Площадь боковой проекции судна составляет 680 м², а площадь поперечной проекции 113 м², центр парусности судна смещен относительно центра масс на несколько метров. Поэтому серьезное влияние на процесс швартовки оказывает ветер.

Мощность привода подруливающего устройства около 100 кВт. Как показывают расчеты, движение лагом для такого судна возможно лишь в диапазоне частот вращения гребных колес от 0 до 0.2 * n_{max} . При больших частотах вращения гребного колеса подруливающее устройство не может обеспечить равенство моментов вращения, создаваемых гребным колесом и подруливающим устройством (не обеспечивается стабилизация корпуса судна).

На рис. 4 представлены вращающие моменты, создаваемые гребным колесом M_k и подруливающим устройством $M_{пу}$ при движении судна лагом (без ветра и с боковым ветром).

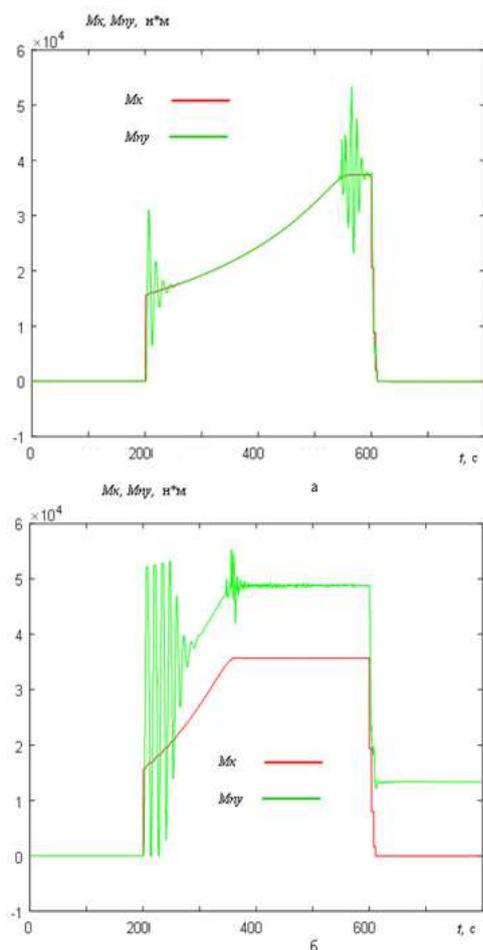


Рис. 4. вращающие моменты, создаваемые гребным колесом и подруливающим устройством при движении судна лагом:
а – без ветра; б - с боковым ветром

При $t = 200$ с выключается правое гребное колесо и появляется вращающий момент, создаваемый левым колесом. Система управления по заданному алгоритму устанавливает параметры подруливающего устройства (тягу и направление выброса струи) необходимые для уравнивания момента, создаваемого гребным колесом (на рисунке хорошо виден переходный процесс «настройки» подруливающего устройства). В интервале $200 - 600$ с судно движется лагом по траектории, представленной на рис. 1. При $t = 600$ с начинается торможение. Частота вращения колеса ступенчато снижается, подруливающее устройство продолжает осуществлять стабилизацию положения корпуса судна.

Как отмечалось выше, ветер может оказывать существенное влияние на процесс швартовки [13]. На рис. 4б приведены зависимости вращающих моментов M_x и M_y при наличии бокового ветра. Подруливающему устройству необходимо компенсировать вращающий момент не только гребного колеса, но и вращающий момент, создаваемый ветром.

При изменении направления и силы ветра его вращающий момент может меняться в очень широких пределах и сделать невозможной автоматическую швартовку. Моделирование позволило определить область работоспособности предложенного алгоритма для судна «Золотое кольцо». Результаты расчетов представлены на рис. 5.

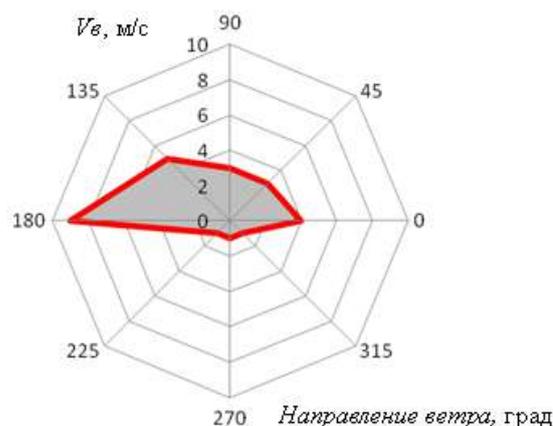


Рис. 5. Область работоспособности алгоритма автоматической швартовки в зависимости от силы и направления ветра.

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

- наличие азимутального подруливающего устройства на судне с КДРК позволяет реализовать движение судна лагом по любой наперед заданной траектории и автоматизировать процесс швартовки;
- для судна «Золотое кольцо» выбрано подруливающее устройство недостаточной мощности (около 100 кВт), что обеспечивает стабилизацию положения корпуса судна и его движение лагом по произвольной траектории только в малом диапазоне частот вращения гребных колес (до $0.2 \cdot n_{max}$);
- большая парусность, малая осадка, недостаточная мощность подруливающего устройства позволяют обеспечить автоматическую швартовку в довольно узком диапазоне изменений силы ветра и его направления.

Литература.

1. Антонов В.А. Теоретические вопросы управления судном : учебное пособие / В.А. Антонов, М.Н. Письменный. — Владивосток : МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2007. — 78 с.
2. Цурбан А. И. Швартовные операции морских судов / А. И. Цурбан, А. М. Оганов. -М. : Транспорт, 1987. - 176 с. : ил.
3. Пат. № 2225327 Российская Федерация, МПК В63Н1/04, В63Н05/03. Колесный движительно-рулевой комплекс/ Фальмонов Е.В.; заявитель и патентообладатель Фальмонов Евгений Васильевич. – № 2001132474/11, ; заявл. 30.11.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7. – 11 с.
4. Уникальный туристический теплоход, или Как развивать отрасль в современных условиях [Текст] / Д. Н. Галкин [и др.] // Речной транспорт (XXI век). - 2016. - № 2 (78). - С. 21-23.

5. От "Суры" к "Золотому кольцу" / Д. Н. Галкин, Ю. А. Малый // Речной транспорт (XXI век). - 2015. - № 2 (73). - С. 32-33.
6. Veth Compact Grid [Электронный ресурс.] - Режим доступа: http://www.vethpropulsion.com/products/bow_thrusters/compact-grid_en.html. Загл. с экрана. (21.05.2019).
7. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Управление судном с колесным движительно-рулевым комплексом при выполнении швартовых операций. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2017. – №4. – С.21-30.
8. Количество наблюдаемых КА при доступной навигации [Электронный ресурс.] - Режим доступа: <http://glonass-svoevp.ru/Func/plotnosti/?lang=ru&sat=GLO&mode=ka> Загл. с экрана. (21.05.2019).
9. Лебедева С.В., Мерзляков В.И. Автоматизация процесса измерения расстояний между объектами в системах швартовки судов. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. № 56. С. 49-55.
10. Swarm ProductFamily. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://nanotron.com/EN/pr_protect-php, свободный. – Загл. с экрана. (21.05.2019)
11. Swarmbee ER Module Embedded Ultra Wide Band Radio Location Awarenessand Concurrent Wireless Communication. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.wless.ru/files/Nanoloc/SWARM/swarm_bee_ER_PB_V1_0.pdf, свободный. – Загл. с экрана. (21.05.2019).
12. BN01SWBEP - swarm bee ER Development Kit Plus Board [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://shop.top-electronics.eu/swarm-bee-er-development-kit-plus-board-p-17601.html>. Загл. с экрана. (21.05.2019).
13. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Расчет сил ветрового воздействия на корпус судна с колесно-двигательным рулевым комплексом. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – Выпуск 55. С. 11-20.

References

1. Antonov V.A. Pis'mennyy M.N Teoreticheskie voprosy upravleniya sudnom: uchebnoe posobie. Vladivostok: MGU im. adm. G.I. Nevel'skogo, 2007, 78 p.
2. Tsurban A. I. Oganov A. M. Shvartovnye operatsii morskikh sudov, M.: Transport, 1987, 176 p.
3. Pat. № 2225327 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V63N1/04, V63N05/03. Kolesnyy dvizhitel'no-rulevoy kompleks. Fal'monov E.V., zayavitel' i patentoobladatel' Fal'monov Evgeniy Vasil'evich, № 2001132474/11, zayavl. 30.11.2001, opubl. 10.03.2004, Byul. № 7, 11 p.
4. Galkin D. N. i dr. Unikal'nyy turisticheskiy teplokhod, ili Kak razvivat' otrasl' v sovremennykh usloviyakh. Rechnoy transport (XXI vek), 2016, № 2 (78), pp. 21-23.
5. Galkin D. N., Malyy Yu. A. Ot "Sury" k "Zolotomu kol'tsu". Rechnoy transport (XXI vek), 2015, № 2 (73), pp. 32-33.
6. Veth Compact Grid [Internet resource].: http://www.vethpropulsion.com/products/bow_thrusters/compact-grid_en.html. (Accessed: 21.05.2019).
7. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Upravlenie sudnom s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom pri vypolnenii shvartovykh operatsiy. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2017, №4, pp.21-30.
8. Kolichestvo nablyudaemykh KA pri dostupnoy navigatsii [Internet resource] <http://glonass-svoevp.ru/Func/plotnosti/?lang=ru&sat=GLO&mode=ka>. (Accessed: 21.05.2019).
9. Lebedeva S.V., Merzlyakov V.I. Avtomatizatsiya protsesssa izmereniya rasstoyaniy mezhdub"ektami v sistemakh shvartovki sudov. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta, 2018, № 56, pp. 49-55.
10. Swarm ProductFamily. [Internet resource]. https://nanotron.com/EN/pr_protect-php, (Accessed: 21.05.2019).
11. Swarmbee ER Module Embedded Ultra Wide Band Radio Location Awarenessand Concurrent Wireless Communication. [Internet resource]. http://www.wless.ru/files/Nanoloc/SWARM/swarm_bee_ER_PB_V1_0.pdf, (Accessed: 21.05.2019).
12. BN01SWBEP - swarm bee ER Development Kit Plus Board [Internet resource] <https://shop.top-electronics.eu/swarm-bee-er-development-kit-plus-board-p-17601.html> (Accessed: 21.05.2019).
13. Bychkov V.Ya., Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Raschet sil vetrovogo vozdeystviya na korpus sudna s kolesno-dvizhitel'nym rulevym kompleksom. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2018, Vypusk 55. pp. 11-20.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.073

**ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК СУДОХОДНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ****Александр Аркадьевич Исаев**

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

Екатерина Сергеевна Мегей

аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Аннотация

Констатируется отсутствие среди ученых и специалистов единого научно обоснованного подхода к формированию на судоходном предприятии системы обеспечения конкурентоспособности (реализации) морских перевозок. По мнению авторов, одной из основных причин возникновения такой ситуации является недоиспользование учеными и специалистами последних научных достижений глубинной психологии. В частности, теории принятия решения о покупке, которая опирается на эмоциональную теорию продаж и квалиметрию. Сформирована система обеспечения реализации морских перевозок судоходного предприятия состоящая из трех основных элементов: 1) производственные подразделения, создающие интегрированный транспортный продукт; 2) департамент мониторинга факторов потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта; 3) руководитель предприятия. Описаны функции, которые выполняет каждый из элементов системы обеспечения реализации морских перевозок. Разработан механизм функционирования системы обеспечения реализации морских перевозок, который включает в себя следующие основные элементы: расчет показателя потребительской значимости интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов; расчет показателя потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов; выявление проблемных характеристик интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия с позиции их конкурентоспособности; формирование соответствующего управленческого воздействия на производственную структуру, отвечающую за данную проблемную характеристику интегрированного транспортного продукта и др.

Ключевые слова: морские перевозки, судоходное предприятие, система обеспечения конкурентоспособности морских перевозок.

**FORMATION OF THE SYSTEM ENSURING THE COMPETITIVENESS OF
MARITIME TRANSPORT OF A SHIPPING ENTERPRISE****Alexander A. Isaev**

Dr.Sci.(Economics), Professor, Department of International Marketing and Trade
Vladivostok State University of Economics and Service
690014, Vladivostok, st. Gogol, 41
e-mail: isaevalex@list.ru

Ekaterina S. Megey

Graduate student, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelsky
690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Abstract

It is stated that among scientists and specialists there is no uniform, scientifically grounded approach to the formation of a competitiveness (implementation) ensuring system for maritime transport at a shipping enterprise. According to the authors, one of the main causes of this situation is the under-utilization by scientists and specialists of the latest scientific achievements of depth psychology. In particular, purchase decision-making theory, which relies on the emotional sales theory and qualimetry. A system has been formed to ensure implementation of the maritime transportation of a shipping enterprise consisting of three main elements: 1) production units that create an integrated transport product; 2) department for monitoring factors of the market attractiveness of an integrated transport product; 3) head of the enterprise. Functions have been described that each of the system elements fulfills for ensuring implementation of maritime transport. Mechanism of the system functioning for ensuring implementation of maritime transport has been developed, which includes the following main

elements: computation of the use value indicator of integrated transport product of a shipping company and its competitors; computation of the consumer attractiveness indicator of the integrated transport product of the shipping company and its competitors; identification of problem characteristics of the integrated transport product of the shipping company from the standpoint of their competitiveness; formation of an appropriate management impact on the production structure that is responsible for this problem characteristic of the integrated transport product, etc.

Key words: maritime transport, shipping company, system ensuring the competitiveness of maritime transport.

Введение

Обеспечение конкурентоспособности морских перевозок является одной из основных целей деятельности судоходного предприятия. Однако до настоящего времени среди ученых и специалистов отсутствует единый научно обоснованный подход к формированию на судоходном предприятии системы обеспечения конкурентоспособности перевозок. Речь идет о системе управления факторами потребительной привлекательности морских перевозок, целью функционирования которой является обеспечения конкурентоспособности перевозок, осуществляемых данным предприятием. При этом авторы согласны с трактовкой М. Портера понятия «конкурентоспособность экономического объекта» как способности последнего «противостоять конкурентам с помощью сравнительного преимущества в чем-либо» [4].

По мнению авторов, одной из основных причин возникновения такой ситуации является недоиспользование учеными и специалистами последних научных достижений глубинной психологии. В частности, речь идет о теории принятия решения о покупке, которая опирается на эмоциональную теорию продаж и квалиметрию [2].

Согласно теории принятия решения о покупке, на выбор покупателем той или иной транспортной услуги оказывают влияние потребительские характеристики не только «основного продукта» (собственно перевозка грузов), но и «дополнительных продуктов», производимых судоходным предприятием в условиях развитого рынка. В последнем случае речь идет о сопутствующих перевозке грузов продуктах деятельности предприятия (страхование груза, расчет ставок в режиме on-line, выбор удачного месторасположения центра продаж транспортных услуг предприятия, подбор профессиональной команды менеджеров по продаже перевозок и т.д.).

Таким образом, опирающаяся на теорию принятия решения о покупке система обеспечения конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта деятельности данного судоходного предприятия, по сути, является системой управления потребительскими характеристиками такого продукта с целью принятия покупателем решения о выборе покупателем интегрированного транспортного продукта в пользу интегрированного транспортного продукта данного предприятия. То есть в качестве цели управления тут выступает принятию покупателем решения о покупке в пользу данного интегрированного транспортного продукта (отсюда термин «система DTB-управления», от слов «decision to buy»).

Причем следует учитывать, что покупатель выбирает такой интегрированный транспортный продукт, потребительная привлекательность которого является самой высокой на данном рынке.

1. Система обеспечения конкурентоспособности морских перевозок

Предлагаемая Е.С. Мереж система обеспечения реализации морских перевозок судоходного предприятия состоит из трех основных элементов (рис.1):

- 1) производственные подразделения, создающие интегрированный транспортный продукт;
- 2) руководитель предприятия.
- 3) департамент мониторинга факторов потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта;



Рис. 1. Функциональная схема системы обеспечения конкурентоспособности морских перевозок

В свою очередь каждый из элементов системы обеспечения реализации морских перевозок выполняет следующие функции.

1. Производственные структуры, создающие интегрированный транспортный продукт.

Основные функции производственной структуры, создающей интегрированный транспортный продукт, следующие:

- выявление основных и дополнительных потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта на основании изучения потребностей покупателя;
- оценка коэффициента значимости (весомости) каждой из потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта;
- оценка потребительной значимости основных и дополнительных характеристик интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;
- оценка потребительной значимости интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;

- расчет потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;
- создание конкурентоспособного интегрированного транспортного продукта.

2.Руководитель предприятия.

Основные функции руководителя предприятия в части обеспечения конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта следующие:

- изучение информации о проблемных характеристиках интегрированного транспортного продукта с позиции их конкурентоспособности;
- формирование соответствующего управленческого воздействия на производственную структуру, контролирующую данную потребительскую характеристику интегрированного транспортного продукта.

3.. Департамент мониторинга факторов потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта.

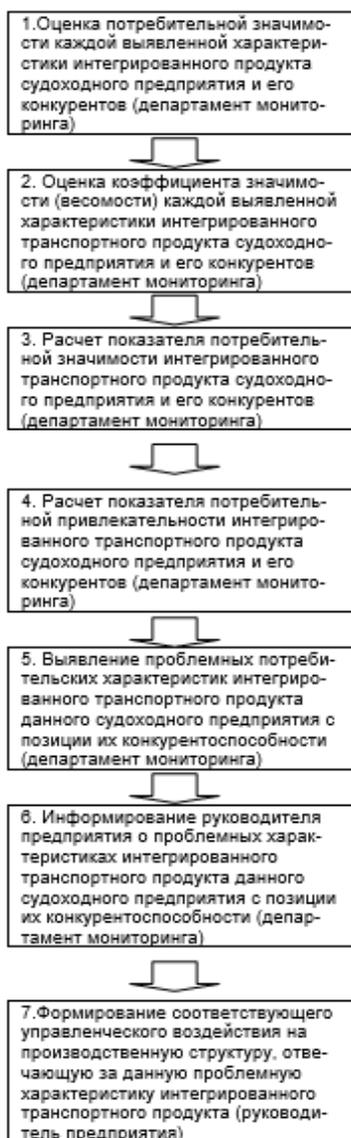


Рис. 2. Механизм функционирования системы обеспечения конкурентоспособности морских перевозок

Основные функции департамента мониторинга факторов потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта следующие:

- выявление основных и дополнительных характеристик интегрированного транспортного продукта;
- оценка коэффициента значимости (весомости) каждой из потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта;
- оценка потребительной значимости основных и дополнительных характеристик интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;
- оценка потребительной значимости интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;
- расчет потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта данного предприятия и предприятий-конкурентов;
- выявление проблемных характеристик интегрированного транспортного продукта с позиции их конкурентоспособности;
- доведение информации о проблемных элементах интегрированного транспортного продукта с позиции их конкурентоспособности до руководителя предприятия.

Причем следует подчеркнуть, что методический подход к оценке конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта опирается на эмоциональную теорию продаж и квалитметрию [1].

Согласно известному закону психологии, человек совершает те или иные действия (включая приобретение товаров и услуг) лишь в том случае, если такие действия ведут к удовлетворению соответствующих потребностей. В свою очередь удовлетворение (или неудовлетворение) тех или иных потребностей всегда сопровождается возникновением у человека соответствующих чувств (эмоций). В этой связи на рациональном уровне человек всегда выберет такую модель поведения, которая приведет его к возникновению наиболее сильных положительных чувств (эмоций). Таким образом, характер чувств (эмоций) выступает в качестве мотивационной (или демотивационной) системы при выборе человеком той или иной модели поведения в контексте удовлетворения соответствующей потребности.

Такой взгляд на роль чувств (эмоций) в процессе выбора человеком той или иной модели поведения в контексте удовлетворения соответствующей потребности разделяет большинство современных психологов. В частности, о том, что «эмоции образуют основную мотивационную систему», пишет К. Е. Изард в «Эмоциях человека» [5].

Согласно эмоциональной теории продаж, в контексте удовлетворения конкретной потребности покупатель всегда выбирает такие интегрированные транспортные продукты, которые при одной и той же цене наиболее полно удовлетворяют его потребности, т.е. вызывают у него более сильные положительные чувства (эмоции) в сравнении с продуктами конкурентов. Таким образом, чтобы победить на рынке, производитель должен, прежде всего, выявить потребности

покупателя в наиболее важных характеристиках интегрированного транспортного продукта, а затем предложить покупателю такой продукт, который позволяет удовлетворить эти потребности лучше, чем конкуренты (разумеется, при одной и той же цене).

В этой связи нулевой этап создания на предприятии системы обеспечения реализации морских перевозок предусматривает реализацию трех главных задач:

1) выявление потребности покупателя в основных и дополнительных характеристиках интегрированного транспортного продукта;

2) формирование производственных подразделений, нацеленных на создание интегрированного транспортного продукта, обладающего выявленными основными и дополнительными характеристиками;

3) закрепление всего массива выявленных основных и дополнительных потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта за соответствующими производственными подразделениями предприятия.

Таким образом, каждое производственное подразделение будет нести ответственность за качество тех продуктов, производителями которых является данное подразделение.

2. Механизм функционирования системы обеспечения реализации морских перевозок

Механизм функционирования системы обеспечения реализации морских перевозок включает в себя семь основных элементов (рис. 2). Рассмотрим каждый из этих элементов более подробно.

1. Оценка потребительной значимости каждой выявленной характеристики интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов (департамент мониторинга).

При этом под «потребительной значимостью потребительской характеристики» понимается степень удовлетворения данной потребности покупателя соответствующей потребительской характеристикой интегрированного транспортного продукта.

Данный элемент предусматривает оценку по десятибалльной системе потребительной значимости каждой потребительской характеристики интегрированного продукта судоходного предприятия и его конкурентов на основании мнения экспертов.

Ранее Е.С. Мегей уже были выявлены основные и дополнительные характеристики каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного транспортного продукта [3].

2. Оценка коэффициента значимости (весомости) каждой выявленной характеристики интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов (департамент мониторинга).

При этом под «коэффициентом значимости (весомости) характеристики интегрированного транспортного продукта» понимается относительная значимость (весомость) данной

характеристики интегрированного транспортного продукта для целевой группы покупателей.

Данный элемент предусматривает оценку величины коэффициента значимости (весомости) (K_i) каждой выявленной характеристики интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов при условии, что $\sum K_i = 1,0$.

Данный этап позволяет подвергнуть коррекции величины потребительной значимости всех выявленных характеристик интегрированного транспортного продукта с учетом их значимости (весомости) для покупателя.

3. Расчет показателя потребительной значимости интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов (департамент мониторинга).

При этом под «потребительной значимостью интегрированного транспортного продукта» понимается степень удовлетворения выявленных потребностей покупателя всей совокупностью потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта.

Данный элемент предусматривает расчет показателя потребительной значимости интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов по формуле: $ПЗИП = \sum K_i \times П_i$, где $ПЗИП$ – показатель потребительной значимости данного интегрированного продукта, балл.; K_i – удельная значимость («вес») данной потребности покупателя; $П_i$ – степень удовлетворения данной потребности покупателем соответствующей характеристикой интегрированного продукта, балл.

4. Расчет показателя потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов (департамент мониторинга).

При этом под «потребительной привлекательностью интегрированного транспортного продукта» понимается отношение потребительной значимости интегрированного транспортного продукта к цене перевозки.

Данный элемент предусматривает расчет показателя потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов по формуле: $ППИП = ПЗИП / Ц$, где $ППИП$ – общий показатель потребительной привлекательности данного интегрированного продукта, балл./руб.; $ПЗИП$ – показатель потребительной значимости данного интегрированного продукта, балл.; $Ц$ цена перевозки как интегрированного продукта, руб.

Расчет показателя потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходного предприятия и его конкурентов позволяет выявить конкурентоспособные транспортные продукты на данном рынке морских перевозок, т.е. речь идет о продуктах с максимальным показателем потребительной привлекательности.

5. Выявление проблемных потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия с позиции их

конкурентоспособности (департамент мониторинга).

Данный элемент предусматривает:

- сравнение показателя потребительской привлекательности интегрированного продукта данного судоходного предприятия с показателями потребительской привлекательности интегрированных транспортных продуктов предприятий-конкурентов;

- сравнение показателя потребительской значимости интегрированного продукта данного судоходного предприятия с показателями потребительской значимости интегрированного продукта конкурентов;

- сравнение показателей потребительской значимости каждой из потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия с показателями потребительской значимости каждой из потребительских характеристик интегрированного транспортного продукта конкурентов.

Данный элемент позволяет выявить, во-первых, конкурентоспособность (неконкурентоспособность) интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия на конкретном рынке морских перевозок на основании расчета показателя потребительской привлекательности; во-вторых, проблемные потребительские характеристики интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия в сравнении с такими же характеристиками предприятий конкурентов.

6. Информирование руководителя предприятия о проблемных потребительских характеристиках интегрированного транспортного продукта с позиции их конкурентоспособности (департамент мониторинга).

Данный элемент предусматривает доведение департаментом мониторинга информации о проблемных элементах интегрированного транспортного продукта с позиции их конкурентоспособности до руководителя предприятия.

7. Формирование соответствующего управленческого воздействия на производственную структуру, отвечающую за данную проблемную характеристику интегрированного транспортного продукта (руководитель предприятия)

Данный элемент предусматривает формирование соответствующего управленческого воздействия со стороны руководителя предприятия на производственную структуру, отвечающую за данную проблемную характеристику интегрированного транспортного продукта.

Заключение

В заключении хотелось бы отметить, что предлагаемый подход к формированию и функционированию системы обеспечения конкурентоспособности морских перевозок носит универсальный характер и может быть использован при перевозке различных объектов.

Литература

1. Исаев А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект //Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. 2017. Т.9, № 2. С. 83-89.
2. Исаев А.А. Продажи и эмоции. М.- Берлин: Директ-Медиа, 2017. 83 с.
3. Исаев А.А., Мегей Е.С., Лентарев А.А. Факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38), Т. 3. С. 144-150.
4. Портер М. Конкуренция. М.: Издательский дом «Вильямс», 2000. 495 с.
5. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.

References

1. Isaev A. A. Ocenka konkurentosposobnosti produkci: metodologicheskij aspekt. Territorija novyh vozmozhnostej. Vestnik VVSU [Assessment of product competitiveness: methodological aspect]. Territory of new opportunities. Vestnik VVSU. 2017. Vol.9, № 2, pp..83-89.
2. Isaev A. A. Prodazhi I emotsii [Sales and emotions]. Moscow-Berlin. Direct-Media, 2017. 83 p.
3. Isaev A. A., Megey E. S., Lentarev A.A. Factori konkurentosposobnosti kabotajnih gruzovih morskih perevozok [Factors of competitiveness of coastal sea freight shipping]. Marine intellectual technologies. 2017. № 4 (38), Vol.9, pp.144-150.
4. Porter, M. Konkurencija [On competition]. Moscow, Vil'jams Publ., 2000. 495 p.
5. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ДК 539.3

О ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ И ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ТРАДИЦИОННЫХ И НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Георгий Дмитриевич Федоровский

кандидат физико-математических наук,
действительный член Международной академии холода,
старший научный сотрудник кафедры теории упругости математико-механического факультета,
Санкт-Петербургский государственный университет
198904, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., д. 28
e-mai: g.fedorovsky@spbu.ru

Аннотация

Анализируются проблемы экспериментального и теоретического изучения, моделирования и прогнозирования определяющих функциональных свойств материалов и наноматериалов. Рассматриваются и обсуждаются закономерности взаимосвязей свойств, их зависимости от параметров структуры и технологий изготовления.

Показано, что специальные аналитические преобразования, базирующиеся на концепции горизонтального и вертикального масштабирования (2D скейлинга), позволяют инвариантным образом преобразовывать параметры свойств к различным формам, в частности, к s-образной, полноценно отражающей фазовые преобразования структуры при воздействиях, в том числе при сильных структурных переходах.

Рассмотрены экспериментальные данные по одноосному деформированию образцов эпоксидного полимера при температурно-временных воздействиях в области существенных структурных переходов.

Получены новые физико-математические модели свойств и их взаимосвязей: параметров теплового расширения, температурно-временного соответствия и механической податливости материала, оптимальные и удобные для описания и вычисления определяющих функций, эффективного планирования экспериментов. Проведено сравнение этих моделей с моделями для других материалов и свойств.

Ключевые слова: математическое моделирование определяющих свойств материалов; моделирование взаимосвязи свойств; концепция горизонтального и вертикального масштабирования; тепловое расширение; температурно-временное соответствие; податливость

ON THE PHYSICO-MATHEMATICAL MODELLING OF THE DETERMINING FUNCTIONAL PROPERTIES AND INTERRELATIONSHIP OF PROPERTIES OF TRADITIONAL AND NANOSTRUCTURAL MATERIALS

Georgy D. Fedorovsky

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
A Full Member of the International Academy of Refrigeration,
Senior Researcher, Department of Theory of Elasticity, Faculty of Mathematics and Mechanics,
St. Petersburg State University
198904, St. Petersburg, Petrodvorec, Universitetsky Ave, 28
e-mail: g.fedorovsky@spbu.ru

Abstract

Some applied and fundamental problems of the optimal experimental, theoretical, numerical study and prediction of the determining functional properties of various homogeneous and heterogeneous, isotropic and anisotropic materials and nanomaterials are analyzed. The laws of interrelation of properties, dependence on parameters of structure and manufacturing technologies are considered.

It is shown that application of separate analytical transformations allows to bring many interrelations to the invariant, not always ideal, s-shaped form reflecting the phase transformations of the structure under impacts. The application efficiency of horizontal and vertical scaling is noted.

The experimental data of the author on the uniaxial deformation of polymer samples of a network structure under temperature effects in a wide range are considered. Based on these data, new linear and nonlinear analytical models of the interrelationships of the coefficient of thermal expansion and the coefficient of reduction of the temperature-time correspondence, mechanical and optical compliance, and other defining characteristics of the material are constructed. Universal relationships of the determining properties of other materials in the initial and nanostructured states are noted.

Key words Experimental, analytical and numerical study, modeling of the interrelation between the defining functional properties of materials and nanomaterials; coefficients of thermal expansion and temperature-time conformity; mechanical and optical compliance; horizontal and vertical scaling.

Введение

Экспериментальное и теоретическое изучение определяющих функциональных свойств различных гомогенных и гетерогенных, изотропных и анизотропных материалов и наноматериалов, установление закономерностей взаимосвязи свойств, зависимости от параметров структуры и технологий изготовления относятся к наиболее актуальным прикладным и фундаментальным проблемам физико-химии и механики деформируемых сред [1–18 и др.].

Выявление взаимосвязей свойств особенно важно в связи с тем, что они позволяют находить по ним сложно, трудоемко или с недостаточной точностью измеряемые функциональные свойства - по данным других, более оптимально измеряемых свойств [1,4,7,10,17]. Например, для прозрачных полимерных материалов – устанавливать напряжения и деформации по эффективно измеряемым параметрам оптического двупреломления [10].

Важнейшими функциональными характеристиками материалов в области статического, динамического и циклического деформирования являются параметры структуры, плотность, жёсткость (модуль упругости) или податливость, характеристики текучести, прочности и длительного разрушения, тепловая и химическая деформации, температуры фазовых переходов, текучести и сверхтекучести, теплоемкость и теплопроводность, электрическое сопротивление, магнитная проницаемость и сверхпроводимость, параметры оптического двупреломления, температурно- и напряженно-временного соответствий, граничного и внутреннего трения и износа, величины вязкости разрушения (трещиностойкости), и многие другие линейные и нелинейные свойства материалов и их наследственной «памяти» на воздействия [4, 7-10,12,15,16].

В работах различных исследователей и автора физико-математические модели определяющих свойств и их взаимосвязей традиционно устанавливаются по данным опытов, путем обработки преимущественно методом выравнивания (линеаризации) по методике наименьших квадратов, посредством логарифмирования, подстановки или комбинированными методами, описанными во многих известных справочниках и используемыми в стандартных компьютерных программных комплексах. При моделировании применяются степенные полиномы целой степени (прямая линия, параболы 2-го и 3-го и других порядков, логарифмические, показательные и экспоненциальные функции, степенные произвольной степени, дробно-линейные, ряд Фурье и другие, как и их комбинации. В широком интервале изменения спектра воздействий на среды, материальные функции могут иметь вид, или, в определенных преобразованных координатах (фазовых пространствах), могут быть

приведены к информативной s-образной (сигмоидной) форме - логистической функции описания. При математической идентификации сигмоиды по экспериментальным данным применяются вышеупомянутые способы приближения. Для обычно «неидеальной» сигмоиды, ветви (участки) которой соответствуют разным структурным (физическим, фазовым) состояниям материалов, перспективным является сплайновое приближение. Например, при применении для «интеллектуальных» металлических и полимерных материалов с «памятью формы» соответствовать аустенитному, переходному и мартенситному состояниям металла, как и стеклообразному, переходному и высокоэластическому состояниям полимера [1,2,4,10,15].

Для описания и установления взаимосвязи двух или более s-образных или иных кривых различных свойств во времени ряда традиционных и наноструктурных материалов, автором был развит и апробирован способ, базирующийся на горизонтальном и вертикальном масштабировании свойств [2,4]. При моделировании определяющих характеристик нанообъемных материалов (металлов и фуллерен-полимерных композитов) с разным исходным и последующим структурным состоянием, полученным нанотехнологией (прессованием, или изменением объемного содержания наполнителя) [2] используется исходная и конечная функции деформирования и прочности. По исходной функции путем применения простых (с одним аргументом) или сложных (с двумя) масштабов удаётся получить фиктивную функцию, а, затем, конечную, коррелирующую с экспериментальными данными. Суть метода и его разновидности будет рассмотрена ниже. Демонстрируется дальнейшее развитие подхода и оптимизация построения новых математических моделей для определения и описания изменений и взаимосвязи свойств материалов при температурно-временных воздействиях в области сильных структурных переходов на примере моделирования свойств оксидного связующего. Для численных расчётов и математического моделирования используются стандартные программные комплексы «Excel» и «Mathcad».

1. Об исследовании взаимосвязей характеристик тепловой деформации с модулем упругости и другими свойствами материалов

В работах [4-9,11,13,15,18] рассмотрены экспериментальные данные и различные физико-математические модели взаимосвязи коэффициента тепловой деформации с модулем упругости, температуры плавления и иными параметрами стёкол, металлов, сплавов, полимеров и других материалов. Для ряда неорганических стёкол показано согласие с экспериментом теории Баркера [18] о линейной зависимости величины модуля продольной

упругости от обратной величины квадрата коэффициента термического расширения при одноосной деформации. Рассмотрены другие модели [5, 6]. Обсуждена природа связи между гармоническими (линейными) и нелинейными (ангармоническими) свойствами различных твердых тел. В ряде случаев теории Баркера и Перепелкина приводят к значительным отклонением от экспериментальных данных, в частности для полимеров.

2. Анализ данных о тепловой и термомеханической деформациях, температурно-временном соответствии ползучести полимерного материала

Рассмотрим экспериментальные данные отверждённого эпоксидного компаунда [15], полученные при испытаниях свободных или растягиваемых, отожжённых образцов-стержень (тонких двойных плоских лопаток) в широком интервале изменения температуры T и лабораторного времени t . В этом интервале полимер проявляет существенные структурные переходы от стеклообразного до высокоэластического состояний (рис. 1).

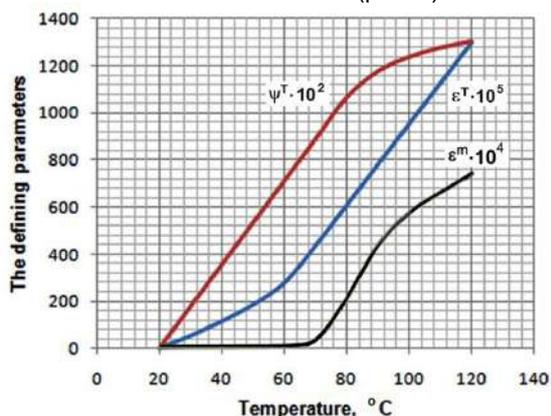


Рис. 1. Связь параметров ϵ^T , ψ^T и ϵ^m с температурой T

Здесь $\epsilon^T(T)$ тепловая, $\epsilon^m(T)$ – механическая, а $\epsilon^f(T) = \epsilon^T(T) + \epsilon^m(T)$ – полная деформации; $\psi^T(T) = \lg g^T(T)$ – функция смещения; $g^T(T)$ – масштаб обобщенного по температуре времени $\xi^T(T, t) = g^T(T) \cdot t$. Обобщенная функция ползучести (податливости) $P(\xi^T)$ в области линейной термовязкоупругости приведена на рис. 2. Функция $\psi^T(T)$ была установлена по данным испытаний ползучести при деформировании $\epsilon^m(T, \sigma, t) = P(T, t) \cdot \sigma$ в условиях постоянных уровней температур T и растягивающих напряжений σ .

Термомеханическую деформацию $\epsilon^m(T)$ можно измерять при параметрах $t = 1$ мин и $\sigma = 1$ МПа. Обозначим её в форме приведенной, безразмерной податливости:

$$\epsilon^m(T) = P(T) \cdot \sigma = \tilde{P}(T), \quad (1)$$

т.к. P имеет размерность МПа⁻¹ – обратную напряжению. Податливость $P(T)$ является «обратной» функцией по отношению к функции релаксации (модуля «упругости»). Их значения в широком интервале изменения температуры и времени, изменяются на три порядка. ξ^T изменяется в интервале 0-10¹³ мин. «Среднее» переходное состояние соответствует $T = 70$ °C и $\xi^T = 10^9$ мин.

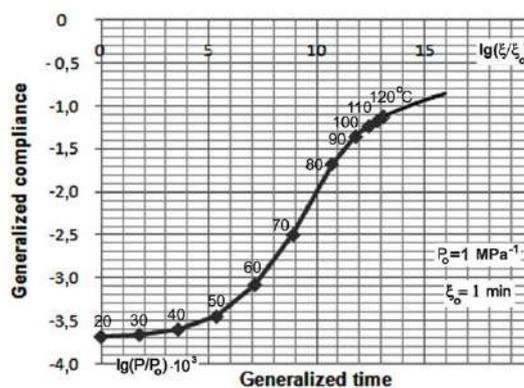


Рис. 2. Связь обобщенной функции ползучести P с трансформированным временем ξ^T

Следует отметить, что получение (измерение) определяющих параметров ϵ^T , ψ^T и P полимера является длительным и затратным исследованием, особенно двух последних параметров, которые по стандартной методике [17] измеряют совместно. Относительно просто и экономично измеряется только ϵ^T . Известен [18] подход по определению параметров ψ^T и P по данным измерения термомеханической деформации $\epsilon^m(T)$ в двух относительно коротких опытах при различных скоростях изменения температуры, путем их обработки по теории наследственной термовязкоупругости. ψ^T и P можно определять также по данным измерения $\epsilon^m(T)$ в значительной серии коротких опытов, проводимых при различных уровнях постоянной температуры и напряжения σ . Ниже, путем применения концепции масштабирования будут построены модели взаимосвязи параметров ϵ^T с ψ^T и P , что

может позволить существенно оптимизировать нахождение ψ^T и P .

3. Исследование взаимосвязи определяющих параметров полимера и построение физико-математических моделей

Модифицируя методики горизонтального и вертикального масштабирования, предложенные в [2] для временных процессов деформирования и разрушения наноматериалов, совместим все точки кривых $\varepsilon^T(T)$ и $\psi^T(T)$ на рис. 1 посредством горизонтального и вертикального трансформирований шкалы температуры (абсцисс) и шкалы определяющих параметров (ординаты) одного из параметров. Для совмещения $\psi^T(T)$ с $\varepsilon^T(T)$ нужно повернуть функцию $\psi^T(T)$ на 180 град относительно некоторых осей параллельных оси ординат и оси абсцисс и произвести дополнительное горизонтальное и вертикальное ее трансформирование.

Таким образом, можно рассмотреть следующее уравнение:

$$\varepsilon^T(T) = g_v^{\varepsilon\psi}(T) \cdot \{ \psi^T(T_3) - \psi^T[g_h^v(T) \cdot T] \}, \quad (2)$$

где $g_h^v(T)$ - горизонтальный, а $g_v^{\varepsilon\psi}(T)$ - вертикальный безразмерные масштабы.

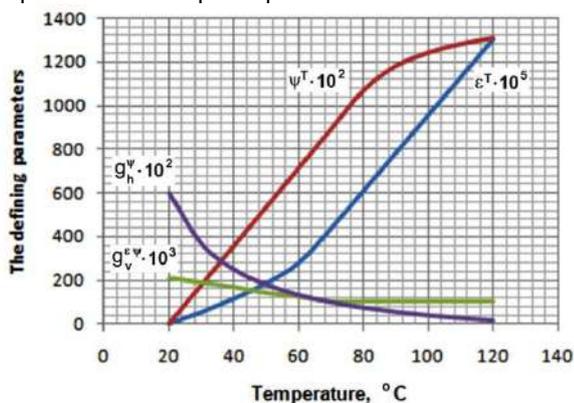


Рис. 3. Взаимосвязи при различных температурах

T параметров ε^T , ψ^T и g_h^v , $g_v^{\varepsilon\psi}$

Все входящие в это соотношение параметры являются определяющими, включая и новые параметры – масштабы (рис. 3).

Аналитические выражения для масштабов:

$$g_h^v(T) = (T_1 - T) / T, \quad (3)$$

(простая дробно-линейная (гиперболическая) функция) [12].

$$g_v^{\varepsilon\psi}(T) = [H(T - T_2) - H(T)](a + bT) - H(T - T_2)c. \quad (4)$$

$T_1 = 140$, $T_2 = 70$, $T_3 = 120$ °C; а, б и с - постоянные.

Обращает на себя внимание существенное (на порядки) различие величин определяющих параметров на рис. 3.

Вид некоторых определяющих функций существенно изменяется, становится s-образным при их дифференцировании по T . Например, коэффициента температурного расширения $\alpha^T(T) = d[\varepsilon^T(T)] / dT$ и функции $\zeta^T(T) = d[\psi^T(T)] / dT$ на рис. 4, на котором более заметны и различимы структурные переходы в полимере при изменении температуры.

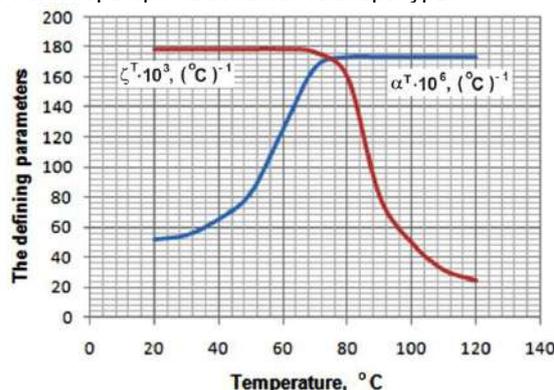


Рис. 4. Вид $\alpha^T(T)$ и $\zeta^T(T)$.

Введением горизонтального масштаба типа (3) можно развернуть кривую $\zeta^T(T)$ относительно вертикальной оси, а сделав вертикальное преобразования подобное (4) достигнуть соответствия с $\alpha^T(T)$.

Другой путь моделирования предоставляет логарифмирование характеристик, например, $lg[\alpha^T(T)]$ и $lg[\varepsilon^m(T)] = lg[\tilde{P}(T)]$ (рис. 5). Этот подход позволяет связать эти две s-образные функции третьей s-образной кривой: вертикальным масштабом $lg g_v^{lg \alpha^T, lg \varepsilon^m}(T)$, и прийти к формуле сложения, а не умножения, как (2):

$$lg[\alpha^T(T)] = lg[g_v^{lg \alpha^T, lg \varepsilon^T}(T)] + lg[\varepsilon^m(T)]. \quad (5)$$

Достаточно лишь вертикальные масштабы. Нетрудно заметить, что логарифмы функций α^T , ε^m и g^T являются возрастающими s-образными кривыми, а связывающие их масштабы $g_v^{\alpha^T \varepsilon^m}$ и $g_v^{\alpha^T g^T}$ - убывающими. Это связано с тем, что концы всех функций имеют одинаковые аргументы T . Поэтому, в отличие от моделей [2] подхода (2) и не требуются горизонтальные масштабы и фиктивные функции.

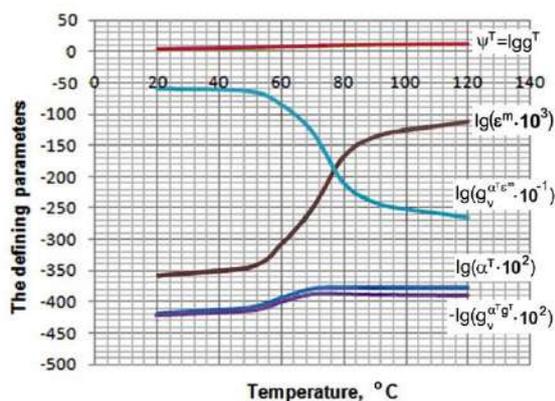


Рис. 5. Взаимосвязи логарифмов

параметров α^T , ϵ^m , g^T и $g_v^{\alpha^T \epsilon^m}$, $g_v^{\alpha^T g^T}$ при различных температурах T

Для получения численных значений и графических изображений достаточно использования «Excel». Математические модели удобно получать с применением «Mathcad», сверять их с экспериментальными данными, по которым по методу наименьших квадратов проведена аналитическая аппроксимация по представленным выше математическим моделям. Для s-образных функций с сильными изменениями рис. 5 с сингулярными (переходными) точками при $T = 70^\circ\text{C}$ (температуры стеклования) автором применён эффективный алгоритм с четырьмя постоянными u_i , например:

$$\lg \epsilon^m = u_0 + u_1 \text{atg}(u_2 + u_3 T). \quad (6)$$

Следует отметить удивительную эффективность подобного алгоритма для аппроксимации

обобщенной кривой $P(\xi^T)$ рис. 2, имеющей изменения на три порядка по оси ординат и 16 по оси абсцисс:

$$\lg(P/P_0) = p_0 + p_1 \text{atg}[p_2 + p_3 \lg(\xi^T/\xi_0)]. \quad (7)$$

Раньше в латвийском Институте механики полимеров для описания такой кривой использовалось не 4 постоянных, а $2 \times 16 + 1 = 33$, при использовании соответствующего количества экспонент (время релаксации).

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта СПбГУ (Мероприятие 3, id 26130576).

Литература

1. Валиев Р.З., Жилиев А.П., Лэнгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения / Под ред. Александра А.П. и Валиева Р.З.; перев. с англ. Баженовой Ю.В., Кураповой О.Ю., Мартюшевой А.А. – СПб.: Эхо-Вектор, 2017. – 479 с.
2. Fedorovsky G.D. The chronomechanics of deformation and strength of nanomaterials // *Material Physics and Mechanics*, 2017, Vol. 31, No 1/2. – P. 78-81.
3. Голубь П. Д., Новочихина Т. И., Насонов А. Д., Мелихов Ю. Ф. Коэффициенты термического расширения, упругости и ангармонизма в полимерах // *Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета*, 2016. - № 3 (11). – 5 с.

В случае «неправильных» s-образных функций использовался вышеописанный, например типа (5) способ, с применением функций Хевисайда.

Применение таких разнообразных выражений для исходных определяющих параметров позволяет построить для них дифференцированную систему взаимосвязей друг с другом. Осуществить перекрестную обработку, выполнить осреднение результатов по полученным дополнительным данным.

Следует отметить, что выполненные расчеты по (1)–(10) показали высокую эффективность и точность предложенных моделей, что подтверждено сравнением с экспериментальными данными.

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Развиваемая автором теория вертикального и горизонтального масштабирования является эффективным методом для математического (аналитического и численного) моделирования определяющих функциональных свойств и их взаимосвязи материалов, непосредственно и эффективно аппроксимировать данные опытов.

2. Она позволяет осуществлять приближения с точностью адекватной погрешностям эксперимента (3-6 %).

3. При описании определяющих свойств позволяет учесть влияние параметров структуры и технологий изготовления, в том числе наноматериалов [2], устанавливая изменённые определяющие свойства наноматериала при изменении его структуры, например по соотношению типа (5), вводя вертикальный масштаб, зависящий от параметра изменения структуры или технологического параметра.

4. Получать различные, дополняющие друг друга модели взаимосвязей свойств материалов, в том числе несимметричного s-образного вида, позволяющего описать разные структурные состояния материала при умеренных и сильных температурно-силовых и иных воздействиях.

5. Повышать точность и упрощать модели путем применения метода сплайнов и логарифмирования.

6. Позволяет осуществить выбор оптимальной схемы измерения и вычисления определяющих параметров и достигать кардинального снижения затрат и времени.

4. Федоровский Г.Д. О взаимосвязях определяющих термомехановременных свойств упруговязкопластических сред по эндохронной концепции. Моделирование времени в естествознании и социогуманитарных науках: философский, теоретический и практический аспекты: сб. научн. тр. / под ред. Чуракова В.С. (серия «Библиотека времени»). Вып.12) — Шахты: ЮРГУС, 2015. — С. 27-35.
5. Сандитов Д.С., Сыдыков Б.С. Модуль упругости и коэффициент теплового расширения стеклообразных твердых тел // Физика твердого тела, 2014, том 56, вып. 5. — С. 970-972.
6. Рябухин А.Г. Линейный коэффициент термического расширения металлов // Известия Челябинского научного центра 1999, вып. 3. — С. 15-17.
7. Физические величины: Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский Ф.М. и др.; Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
8. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. - Справочное издание. - М.: Metallurgia, 1989. - 384 с.
9. Мазурин О.В. Стеклование. — Л.: Наука, 1986. — 158 с.
10. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Пивторак В.А. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие / Ред. Бородинский Л.Е., Гусачая Р.И. - Киев: Наукова думка, 1981. — 584 с.
11. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. - Рига: Зинатне, 1978. - 224 с.
12. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига: Зинатне. 1975. - 416 с.
13. Кан К.Н. Вопросы теории теплового расширения полимеров. - Ленинград: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1975. — 80 с.
14. Перепелкин К.Е. Связь между модулем упругости и термическим расширением гетеродесмических полимерных структур // Физика твердого тела, 1969. - Т. 11, № 12. - С. 3529–3533.
15. Федоровский Г.Д., Грибова Т.В. Влияние температуры на вязкоупругие свойства эпоксидного связующего. — Научно-технический сборник «Вопросы судостроения». Серия «Технология судостроения». Выпуск 4 «Свойства судостроительных стеклопластиков и методы их контроля». - Ленинград: ЦНИИ «РУМБ», 1974. — С. 33-42.
16. Малкин Ф.Я., Сабсай О.Ю., Громаковская Н.Е. Определение вязкоупругих характеристик полимеров из термомеханических кривых // Механика полимеров. — 1974, № 4. — С. 755 (Деп. ВИНТИ № 1252-74, Рига — 1974. — 15 с.).
17. Марковец М.П. О зависимости между твердостью и другими механическими свойствами металлов. "Исследование в области измерения твердости". Труды метрологических институтов СССР.— М.-Л.: Изд-во стандартов, 1967, Вып. 91 (151).— 76 с.
18. Barker R.E. An approximate relation between elastic moduli and thermal expansivities // J. Appl. Phys. — 1963. — V. 34, № 1. — P. 107-116.

References

1. Valiev R.Z, Zhilyaev A.P, Langdon T.J. Volumetric nanostructured materials: fundamental principles and applications, Ed. Alexandrov A.P. and Valiev R.Z; Trans. from English. Bazhenov Yu.V., Kurapov O.Yu., Martyusheva A.A. - St. Petersburg: Echo-Vector, 2017. — 479 p.
2. Fedorovsky G.D. The chronomechanics of deformation and strength of nanomaterials // Material Physics and Mechanics, 2017, Vol. 31, № 1/2. — P. 78-81.
3. Golub P.D, Novochikhina T.I., Nasonov A.D., Melikhov Yu.F. Coefficients of Thermal Expansion, Elasticity and Anharmonicity in Polymers // Auditorium. Electronic scientific journal of the Kursk State University, 2016. - № 3 (11). - 5 p.
4. Fedorovsky G.D. On the interrelationships of the determining thermomechanical properties of elastoviscoplastic media according to the endochronic concept. Modelling of time in natural sciences and sociohumanitarian sciences: philosophical, theoretical and practical aspects: Coll. scientific papers / Ed. Churakov V.S. (series "Library of time." Issue 12). - Shahti: JURGUS, 2015. - P. 27-35.
5. Sanditov D.S., Sydykov B.S. The modulus of elasticity and the coefficient of thermal expansion of glass-like solids. // Physics of the Solid Body, 2014, Vol. 56, № 5. - P. 970-972.
6. Ryabukhin A.G. Linear coefficient of thermal expansion of metals // News of the Chelyabinsk Scientific Center 1999. Issue 3. - P. 15-17.
7. Physical quantities: Handbook / Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky F.M. and etc.; Ed. Grigoryev I.S, Meilikhov E.Z - Moscow: Energoatomizdat, 1991. - 1232 p.
8. Zinoviev V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures. - Reference edition. - Moscow: Metallurgy, 1989. - 384 p.
9. Mazurin O.V. Glass transition. - L.: Science, 1986. - 158 p.
10. Kasatkin B.S, Kudrin A.B, Pivtorak V.A. Experimental methods of studying deformations and stresses. Reference Guide / Ed. Borodyansky L.Ye., Gusyachay R.I. - Kiev: Naukova dumka, 1981. — 584 p.
11. Inbinder S.B., Tyunina E.L, Introduction to the theory of friction polymers. - Riga: Zinatne, 1978. - 224 p.
12. Urzhumtsev Yu.S., Maksimov R.D. The forecasting of deformability of polymeric materials. Riga: Zinatne. 1975. - 416 p.
13. Kahn K.N. Questions of the theory of thermal expansion of polymers. - Leningrad: Leningr. state publishing house. The state, 1975. - 80 p.
14. Perepyolkin K.E. Relationship Between the Modulus of Elasticity and Thermal Expansion of Heterodesmic Polymer Structures // Physics of the Solid Body, 1969. - Vol. 11, №. 12. - P. 3529-3533.

-
15. Fedorovsky G.D, Gribova T.V. Effect of temperature on the viscoelastic properties of epoxy binder. - Scientific and technical collection "Issues of shipbuilding". Series "Technology of shipbuilding". Issue 4 "Properties of shipbuilding fiberglass and methods of their control." - Leningrad: Central Research Institute "RUMB", 1974. - P. 33-42.
 16. Malkin F.Ya., Sabsay O.Yu., Gromakovskaya N.E. Determination of the viscoelastic characteristics of polymers from thermomechanical curves // Mechanics of polymers. - 1974, № 4. - P. 755 (Dep., VINITI № 1252-74, Riga - 1974. - 15 p.).
 17. Markovets M.P. On the relationship between hardness and other mechanical properties of metals. "Research in the field of hardness measurement". Proceedings of the metrological institutes of the USSR. - Moscow-Leningrad: Izd-vo standards, 1967, Issue 91 (151). - 76 p.
 18. Barker R.E. An approximate relation between elastic moduli and thermal expansivities // J. Appl. Phys. – 1963. – V. 34, № 1. – P. 107-116.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 539.3

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ СИЛОВЫХ ПОДВОДНЫХ
КАБЕЛЕЙ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ****Илья Алексеевич Керестень**

Инженер 2 кат. учебной научно-исследовательской лаборатории "Вычислительная механика"
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
e-mail: keresten@compmechlab.com

Елена Владимировна Корнилова

Студентка магистратуры института передовых производственных технологий
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
e-mail: lena5966@gmail.com

Александр Александрович Михайлов

Начальник отдела лицензионно-программного обеспечения и международных проектов
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
e-mail: michailov@compmechlab.com

Аннотация

Статья посвящена численному определению эффективных коэффициентов жесткости силовых подводных кабелей. В качестве объекта исследования рассматриваются кабели различных характерных типов: трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA, одножильный кабель с одиночным бронированием ZS-YJQ41 и одножильный кабель с двойным бронированием – аналог GASLMLTV. Целью работы является определение эффективных свойств однородного материала кабеля, эквивалентного на макроуровне сечению кабеля, состоящего из гетерогенных изотропных материалов. Основными задачами работы являются три задачи о растяжении кабеля, об изгибе кабеля и о кручении кабеля.

В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов. Для достижения поставленной цели работы используется система автоматизированного проектирования SolidWorks и программная система конечно-элементного анализа ABAQUS. SolidWorks используется для разработки полномасштабных геометрических CAD моделей, а ABAQUS используется для подготовки и решения расчетных CAE моделей.

Новизна работы состоит в апробации методики расчета эффективных коэффициентов жесткости для силовых подводных кабелей: 2XS2YRAA, ZS-YJQ41 и аналога GASLMLTV. Результаты моделирования представлены в виде распределения перемещений кабелей различных типов, а также в виде таблицы с эффективными коэффициентами жесткости. Практическое значение работы состоит в возможности существенного сокращения вычислительных ресурсов для получения решений задач макроуровня, таких как: укладка кабеля, динамика системы "судно – подводный аппарат", буксировка, швартование и др.

Ключевые слова: Силовой подводный кабель, бронирование кабеля, эффективные коэффициенты жесткости, метод конечных элементов, компьютерный инжиниринг, композиционный материал, гетерогенная структура, механика кабеля, напряженно-деформированное состояние.

**FINITE ELEMENT DEFINITION OF EFFECTIVE STIFFNESS COEFFICIENTS
FOR POWER SUBMARINE CABLE WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE****Ilya A. Keresten**

2nd class engineer of educational scientific-research laboratory "Computational Mechanics"
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation
e-mail: keresten@compmechlab.com

Elena V. Kornilova

Master student of institute of advanced manufacturing technologies
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation
e-mail: lena5966@gmail.com

Alexander A. Michailov

Head of department of licensed software and international projects
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation
e-mail: michailov@compmechlab.com

Abstract

This article studies the numerical definition of effective stiffness coefficients for power submarine cable. As the object of the research, various distinctive types of cables are considered: three-core single armoured cable 2XS2YRAA, one-core single armoured cable ZS-YJQ41 and one-core double armoured cable – analogue GASLMLTV. The aim of the research is to define the effective properties of the homogeneous cable material, which are equivalent at macro-level to cable section, consisting of heterogeneous isotropic materials. The study includes the following problems: tension of the cable, bending of the cable and torsion of the cable.

The finite element method is chosen as the research method. To achieve the aim of the research, computer program for solid modeling SolidWorks and software suite for finite element analysis ABAQUS are used. SolidWorks is used to develop full-scale geometric CAD models while ABAQUS is used when working out and solving computational CAE models.

The novelty of the work consists in the approbation of the method of calculating the effective stiffness coefficients for power submarine cables: 2XS2YRAA, ZS-YJQ41 and analogue GASLMLTV. The simulation results are presented in the form of distribution of cable movements of different types, as well as in the form of a table with effective stiffness coefficients. The practical value of the research is the possibility of a significant reduction of computing resources to obtain solutions to macro-level problems, such as: mooring, cable laying, towing, dynamics of system "vessel – underwater vehicle".

Key words: Power submarine cable, cable armor, effective stiffness coefficients, finite element method, computer engineering, composite material, heterogeneous structure, cable mechanics, stress and strain state.

Введение

На сегодняшний день подводные силовые и оптоволоконные кабели очень распространены и имеют широкую область применения: от электроснабжения различных морских объектов, до функционирования телекоммуникационных сетей межконтинентальных линий. По статистике на 2015 год суммарная протяженность кабеля по всему миру на морском дне составила около 8 000 км, где 70% проложены в европейских водах [1]. В данной работе рассматриваются следующие силовые подводные кабели: 2XS2YRAA, который используется для энергоснабжения морских платформ и для перехода через реки и озера [2, 3]; ZS-YJQ41, который проложен в округе Пинтань и Восточно-Китайском море [4]; аналог GASLMLTV повышенной защищенности, который используется в условиях оживленного судоходства [5, 6].

Работы Немова А.С., Войнова И.Б., Боровкова А.И. и др. 2008 и 2010 года посвящены конечно-элементному определению обобщенных жесткостных характеристик кабелей сверхпроводящей обмотки катушки тороидального поля токамака ITER. В этих работах рассматриваются задачи по растяжению, изгибу, кручению и обжатию кабеля с иерархической структурой [7, 8]. Работы Д. Жанга, М. Остоя-Стажевского 2015 года и Ю. Ю и др. 2016 года посвящены конечно-элементному определению изгибной жесткости кабелей [9, 10]. В этих работах отдельное внимание уделяется особенностям контактного взаимодействия на границах раздела компонентов конструкции кабелей и упругопластическому поведению материалов. Работы К.Х. Леонга и др. 2016 года и Ф.Ф. Луза и др. 2018 года посвящены вопросам прочности и разрушения кабелей с гетерогенной структурой [11,12].

В механике кабелей также рассматриваются задачи теплопроводности кабелей с гетерогенной структурой. Работы М. Карахана и О. Календерли 2011 года и Д. Ху и др. 2019 года посвящены определению температурного состояния силовых кабелей и окружающей среды при их различном взаимном расположении [4, 13]. Статья Ц. Холука и др. 2014 года посвящена определению установившегося температурного состояния для многожильных кабелей 2 различными подходами, основанными на редуцировании сложной геометрии с использованием эквивалентных тепловых свойств [14].

Исследуются и вопросы электродинамики сплошной среды кабелей. Статья С. Дубицкого и др. 2016 года посвящена определению электромагнитного потенциала, плотности Джоулева тепла, температурного состояния при различном размещении кабельных линий для одножильного кабеля [15]. Статья Х.К. Дель Пино-Лопеса и др. 2018 года посвящена определению электромагнитного потенциала, магнитного потока, плотности тока для различных трехжильных кабелей [16].

В настоящей работе для описания напряженно-деформированного состояния силовых подводных кабелей используется прямое пространственное конечно-элементное моделирование [17-19]. Данный подход позволяет определить эффективные коэффициенты жесткости: модуль упругости, модуль сдвига, жесткость на изгиб, момент инерции на изгиб, коэффициент жесткости на кручение и момент инерции на кручение для линейных уравнений статического равновесия упругого каната [20, 21]. Эти эффективные характеристики можно использовать для инженерной оценки пространственного поведения кабеля под действием комбинированного нагружения.

Постановка задач теории упругости для определения эффективных коэффициентов жесткости кабеля

Обобщенные линейные уравнения статического равновесия упругого каната при его растяжении и кручении могут быть записаны в виде [20, 21]:

$$\begin{aligned} A\varepsilon + C\theta &= T, \\ C\varepsilon + B\theta &= M, \end{aligned} \tag{1}$$

где T и M – приложенные к кабелю сила и крутящий момент соответственно; ε и θ – продольные и угловые деформации кабеля; A , B и C – обобщенные коэффициенты жесткости кабеля.

Рассмотрим три задачи теории упругости о растяжении, изгибе и кручении. Постановка данных трех задач теории упругости представлена на рис. 1:

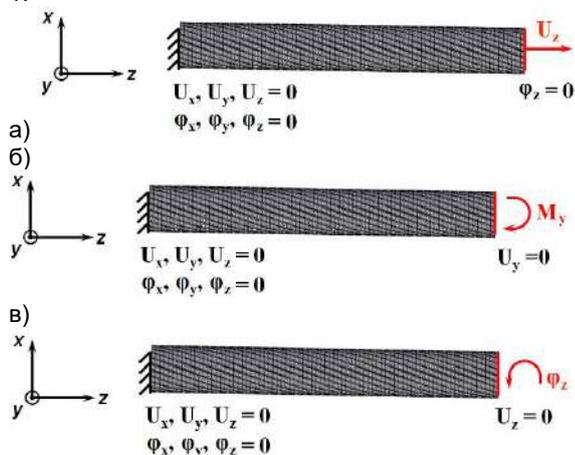


Рис. 1. Граничные условия: а) растяжение; б) изгиб; в) кручение

В результате решения задачи о растяжении кабеля можно определить эффективный модуль упругости кабеля E :

$$E = \frac{A}{S} = \frac{1}{S} \frac{F_z}{U_z} L, \tag{2}$$

где S – площадь поперечного сечения кабеля, F_z – реакция закрепленного торца кабеля под действием приложенного перемещения U_z свободного торца кабеля, а L – рассматриваемый участок кабеля.

Пренебрегая изменением площади поперечного сечения при растяжении можно определить эффективный модуль сдвига G :

$$G = \frac{E}{2}. \tag{3}$$

В результате решения задачи об изгибе кабеля можно определить эффективный момент инерции кабеля на изгиб I на основании уравнения изогнутой оси:

$$I = \frac{M_y L^2}{2EU_x}, \tag{4}$$

где M_y – изгибающий момент силы, а U_x – прогиб свободного торца кабеля.

В результате решения задачи о кручении кабеля можно определить эффективный момент инерции кабеля на кручение J :

$$J = \frac{B}{G} = \frac{1}{G} \frac{M_z}{\Phi_z} L, \tag{5}$$

где M_z – реакция закрепленного торца кабеля под действием приложенного поворота Φ_z свободного торца кабеля.

Описание конструкции силовых подводных кабелей

Конструкция и состав силовых подводных кабелей различаются исходя из их функционального назначения, требований защиты от потенциального враждебного вмешательства морского дна, глубин укладки и других факторов [1]. В данной работе рассматриваются распространенные типы силовых подводных кабелей: трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA с внешним диаметром около 65 мм [2, 3]; одножильный кабель с одиночным бронированием ZS-YJQ41 с внешним диаметром около 114 мм [4]; одножильный кабель с двойным бронированием – аналог GASLMLTV с внешним диаметром около 67 мм [5, 6].

Гетерогенная конструкция рассматриваемых кабелей включает в себя следующие компоненты: токопроводящая жила; экран по жиле; изоляция; экран по изоляции; полупроводниковый барьер; щит; компаунд; проволочная броня; скрепляющие ленты; жгуты.

По имеющимся конструктивно-геометрическим данным [2, 4, 6] были разработаны полномасштабные геометрические CAD модели участков кабелей с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Многие компоненты кабелей, представленные на рис. 2, укладываются повивом, образуя свивку кабеля. Шаг скрутки кабелей выбран равным около 8 диаметрам наружного повива бронирования исходя из нацеленности на минимальное расходование материала для изготовления, но с учетом требования к нераскручиваемости [22]. Разработанные геометрические модели кабелей, представленные на рис. 2, содержат 65, 224 и 163 различных компонентов соответственно.

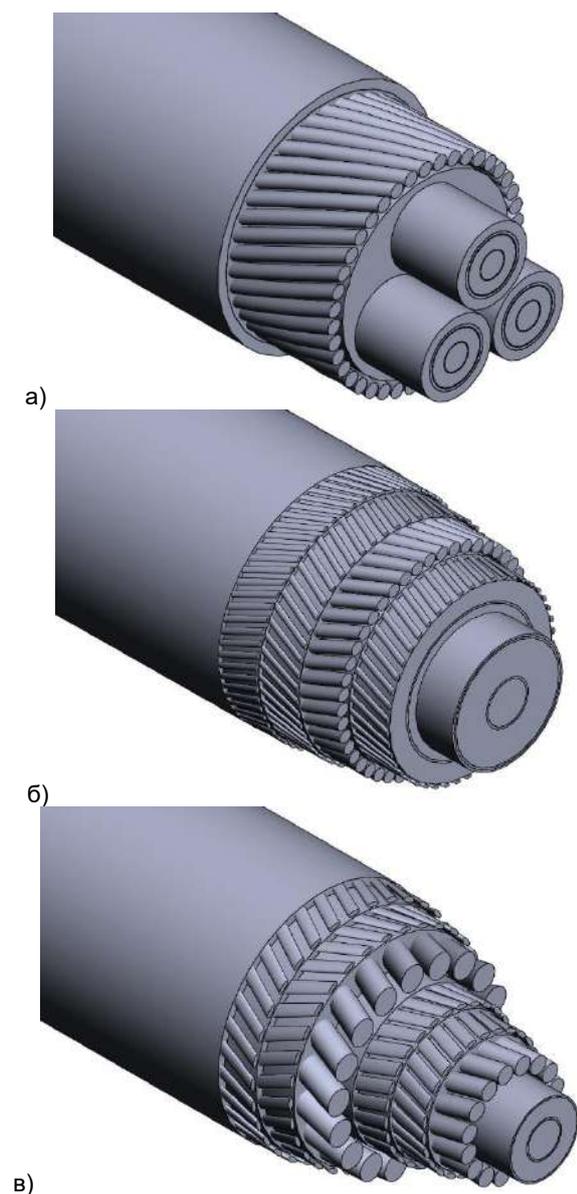


Рис. 2. Геометрическая модель кабеля: а) 2XS2YRAA; б) ZS-YJQ41; в) аналог GASLMLTV

Описание расчетных конечно-элементных моделей силовых подводных кабелей

Для вычисления эффективных коэффициентов жесткости E , G , EI , I , B и J на базе геометрических CAD моделей были разработаны расчетные CAE модели участков кабелей с использованием программной системы конечно-элементного анализа ABAQUS. При численном решении была использована неявная схема интегрирования [23]. Конечно-элементные модели рассматриваемых участков кабелей, сечения которых представлены на рис. 3, содержат около 250 000 – 500 000 конечных элементов.

В результате проведенного анализа сходимости выбран размер конечного элемента в плоскости сечения, равный около 1 мм и около 80 конечных элементов, приходящихся на шаг свивки кабеля. В рамках модели множественного пространственного контактного взаимодействия выбрана модель клеевого соединения, не

допускающая относительных перемещений на границах раздела компонентов конструкции кабелей:

$$U|_{r^-} = U|_{r^+}. \quad (6)$$

В качестве математической модели материалов принята упругая линейная модель, подчиняющаяся закону Гука. Свойства материалов компонентов конструкции кабелей представлены в табл. 1.

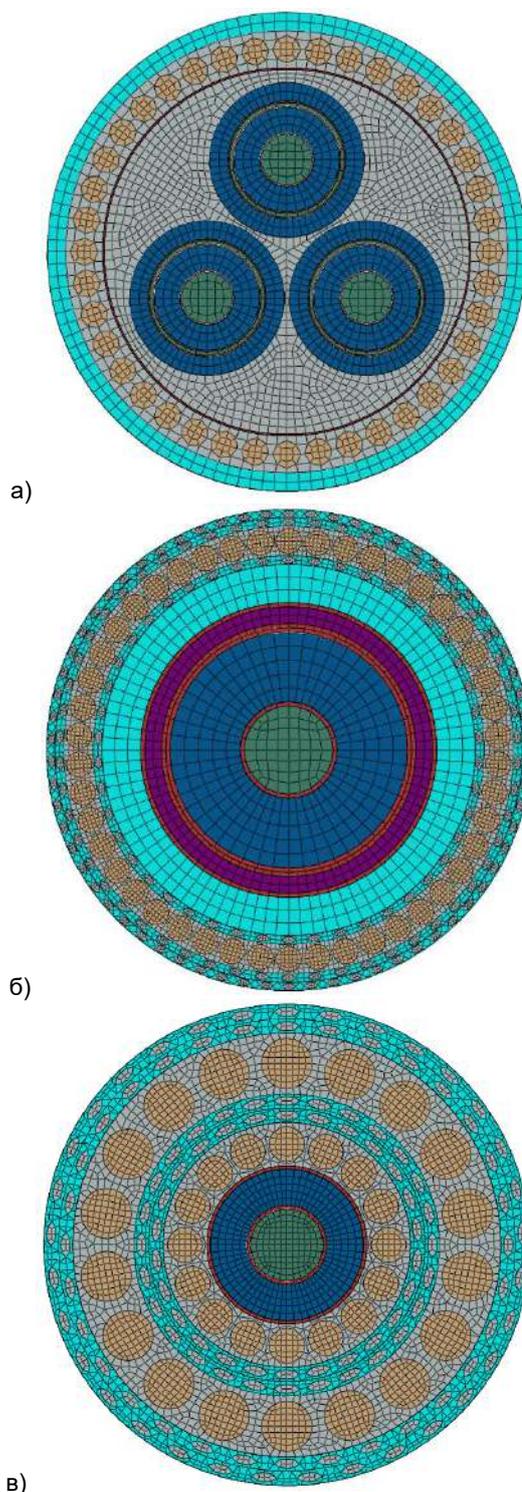
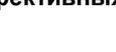


Рис. 3. Сечение конечно-элементной модели кабеля: а) 2XS2YRAA; б) ZS-YJQ41; в) аналог GASLMLTV

Таблица 1

Свойства материалов компонентов конструкции кабелей

№	Обозначение	Компонент	Материал	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³	Источник
1		Жила	Медь	125·10 ⁹	0.34	8 920	[24]
2		Экран по жиле, экран по изоляции, скрепляющие ленты	Полиэтилен высокой плотности	1.1·10 ⁹	0.43	950	[25]
3		Изоляция из сшитого полиэтилена	Полиэтилен низкой плотности	0.17·10 ⁹	0.45	920	[25]
4		Щит	Свинец	16·10 ⁹	0.42	11 340	[26]
5		Компаунд	Битум	0.2·10 ⁹	0.44	1 050	[27-29]
6		Проволочная броня	Оцинкованная сталь	210·10 ⁹	0.291	7 860	[26, 30]
7		Жгуты	Полипропилен	1.45·10 ⁹	0.41	910	[31]

Результаты численного определения эффективных коэффициентов жесткости кабеля

На базе расчетных CAE моделей было проведено моделирование серии задач (см. рис. 1) об определении напряженно-деформированного состояния статического равновесия участков кабелей с использованием программной системы ABAQUS. На рис. 4 представлено распределение компоненты вектора перемещений U_z для задачи о растяжении, на рис. 5 – распределение компоненты вектора перемещений U_x для задачи об изгибе, а на рис. 6 – распределение модуля вектора перемещений U для задачи о кручении.

Моделирование проводилось на 16-ядерном компьютере с процессором Intel Xeon с 512 Гб RAM. Время моделирования не превышало 5 часов.

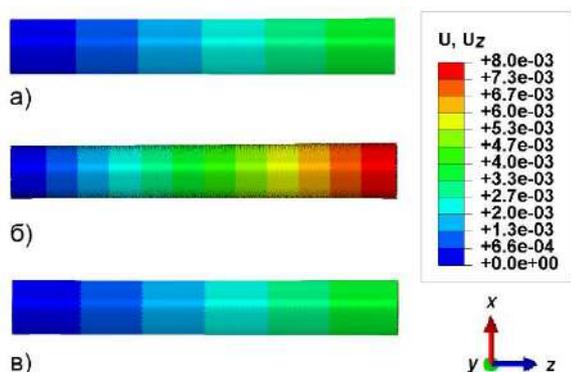


Рис. 4. Распределение компоненты вектора перемещений U_z для задачи о растяжении: а) 2XS2YRAA; б) ZS-YJQ41; в) аналог GASLMLTV

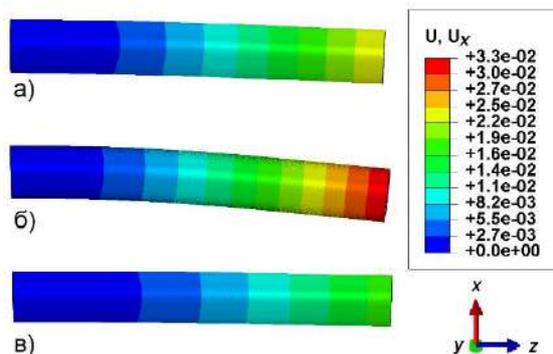


Рис. 5. Распределение компоненты вектора перемещений U_x для задачи об изгибе: а) 2XS2YRAA; б) ZS-YJQ41; в) аналог GASLMLTV

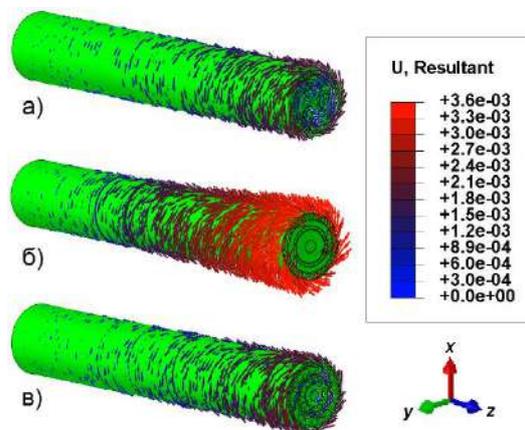


Рис. 6. Распределение модуля вектора перемещений U для задачи о кручении: а) 2XS2YRAA; б) ZS-YJQ41; в) аналог GASLMLTV

Представленные на рис. 4-6 результаты соответствуют граничным условиям, отсутствие относительных перемещений на границах разделов конструкции кабелей соблюдается. Во всех задачах заделанный торец рассматриваемого участка кабеля остается неподвижным. Для задачи о кручении кабеля перемещение нейтральной линии кабеля отсутствует.

По полученным численным результатам, в соответствии с формулами (2)-(5), можно определить эффективные коэффициенты жесткости кабелей:

Таблица 2

Эффективные коэффициенты жесткости кабелей

Эффективная характеристика кабеля	2XS2YRAA A	ZS- YJQ41	Аналог GASLMLT V
Модуль упругости E , Па	$8.9 \cdot 10^9$	$9.9 \cdot 10^9$	$32 \cdot 10^9$
Модуль сдвига G , Па	$4.5 \cdot 10^9$	$4.9 \cdot 10^9$	$16 \cdot 10^9$
Жесткость на изгиб EI , Н·м ²	$7.6 \cdot 10^3$	$99 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
Момент инерции на изгиб I , м ⁴	$8.5 \cdot 10^{-7}$	$101 \cdot 10^{-7}$	$6.4 \cdot 10^{-7}$
Жесткость на кручение B , Н·м ²	$8 \cdot 10^3$	$84 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$
Момент инерции на кручение J , м ⁴	$17.9 \cdot 10^{-7}$	$171 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$

Из сравнения результатов, представленных в табл. 2, видно, что трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA обладает наименьшим эффективным модулем упругости E , а также эффективной жесткостью на изгиб EI и эффективной жесткостью на кручение B , что объясняется меньшим диаметром по сравнению с одножильным кабелем с одиночным бронированием ZS-YJQ41 и меньшей защищенностью по сравнению с одножильным кабелем с двойным бронированием – аналогом GASLMLTV.

Более любопытно сравнение эффективных коэффициентов жесткости для одножильного кабеля с одиночным бронированием ZS-YJQ41,

обладающего большим диаметром и одножильного кабеля с двойным бронированием – аналога GASLMLTV, обладающего большей защищенностью. При растяжении аналог GASLMLTV обладает большей сопротивляемостью, т.к. большая объемная доля более жестких компонентов кабеля при двойном бронировании оказывает большее влияние, нежели увеличение диаметра. При этом при изгибе и кручении ZS-YJQ41 обладает большей сопротивляемостью, т.к. в этих случаях большая удаленность компонентов конструкции кабеля относительно нейтральной линии кабеля при увеличении диаметра оказывает большее влияние, нежели двойное бронирование.

Заключение

В работе рассмотрена задача об определении эффективных коэффициентов жесткости для кабелей с гетерогенной структурой. В качестве объекта исследования выбраны силовые подводные кабели: трехжильный кабель с одиночным бронированием 2XS2YRAA, одножильный кабель с одиночным бронированием ZS-YJQ41, одножильный кабель с двойным бронированием – аналог GASLMLTV. В статье представлена постановка задач теории упругости для растяжения, изгиба и кручения. Для рассматриваемых кабелей разработаны полномасштабные геометрические CAD модели и расчетные CAE модели, учитывающие гетерогенную микроструктуру и многочисленные межслойные контактные взаимодействия.

В результате численного моделирования серии задач теории упругости определено напряженно-деформированное состояние силовых подводных кабелей и определены эффективные коэффициенты жесткости для каждого типа кабеля. Полученные эффективные характеристики кабелей можно использовать для инженерной оценки пространственного поведения кабеля под действием комбинированного нагружения.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования эффективных характеристик при решении задач макроуровня для которых невозможно учесть микроструктуру конструкции кабеля, т.к. это привело бы чрезмерно большой размерности модели, и, как следствие, невозможности получения решения в силу ограниченности вычислительных и временных ресурсов. А именно, речь идет о рассмотрении кабеля с позиции обобщенной балочной теории с эффективными характеристиками. Результаты моделирования могут быть полезны для решения таких классов задач как: укладка кабеля, динамика системы “судно – подводный аппарат”, буксировка, швартование и др.

Литература

1. Taormina B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart M., Desroy N., Carlier A. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: knowledge gaps, recommendations and future directions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 96. P. 380-391.
2. Nexans Inc. Submarine Power Cables. – URL: https://www.nexans.ru/Germany/2013/SubmPowCables_FINAL_10jun13_engl.pdf (дата обращения: 08.08.2019).

3. Ventikos N.P., Stavrou D.I. Submarine power cables: Laying procedure, the fleet and reliability analysis // *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2013. Vol. 12. No. 1. P. 13-26.
4. Xu Z., Hu Z., Zhao L., Zhang Y., Yang Z., Hu S., Li Y. Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation // *Measurement*. 2019. Vol. 133. P. 479-494.
5. Hexatronic Group. Submarine cable systems. – URL: https://hexatronic.com/media/233536/hexatronic_submarine.pdf (дата обращения: 08.08.2019).
6. Vise S., Adnitt C., Stanisland R. Review of cabling techniques and environmental effects applicable to the offshore wind farm industry (BERR Technical Report). 2008. 164 p.
7. Немов А.С., Войнов И.Б., Боровков А.И. Расчетное определение жесткостных характеристик кабелей с иерархической структурой // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2008. № 6 (70). С. 21-27.
8. Nemov A.S., Voynov I.B., Borovkov A.I., Boso D.P., Schrefler B.A. Generalized stiffness coefficients for ITER superconducting cables, direct FE modeling and initial configuration // *Cryogenics*. 2010. Vol. 50. No. 5. P. 304-314.
9. Zhang D., Ostoja-Starzewski M. Finite element solutions to the bending stiffness of a single-layered helically wound cable with internal friction // *Journal of Applied Mechanics*. 2016. Vol. 83. No. 3. 8 p.
10. Yu Y., Wang X., Chen Z. A simplified finite element model for structural cable bending mechanism // *International Journal of Mechanics Sciences*. 2016. Vol. 113. P. 196-210.
11. Leong K.H., Latiff R.H.A., Yusof F., Ooi. C.C., Rahman M.R.A. Intermittent audio failure analysis of a remote speaker-microphone for a two-way radio // *J. Fail. Anal. and Preven.* 2016. Vol. 16. P. 75-85.
12. Luz F.F., de Menezes E.A.W., da Silva L.V., Cimini C.A. Jr., Amico S.C. Strength analysis of composite cables // *Lat. Am. j. solids struct.* 2018. Vol. 15. No. 4. 9 p.
13. Karahan M., Kalenderli Ö. Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method. *Heat Transfer – Engineering Applications*. 2011. P. 205-230.
14. Holyk C., Liess H.-D., Grondel S., Kanbach H., Loos F. Simulation and measurement of the steady-state temperature in multi-core cables // *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 116. P. 54-66.
15. Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N. Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity // *EnergyCon 2016 IEEE Int. Conference, Leuven, Belgium 4-8 Apr. 2016*. 6 p.
16. Del-Pino-López J.C., Hatlo M., Cruz-Romero P. On simplified 3D finite element simulations of three-core armored power cables // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 11. 14 p.
17. Сергерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 392 с.
18. Зенкевич О., Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 318 с.
19. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов. М.: Физматлит, 2010. 1024 с.
20. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 328 с.
21. Сергеев С.Т. Надежность и долговечность подъемных канатов. Киев: Техника, 1968. 238 с.
22. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 536 с.
23. Dassault Systems ABAQUS 6.13 Online documentation. – URL: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html> (дата обращения: 08.08.2019).
24. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1998. 400 с.
25. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паныматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: учеб-справ. пособие – 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2005. 248 с.
26. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов: учебник для ВУЗов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
27. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. М.: Химия, 1973. 432 с.
28. Ярцев В.П., Ерофеев А.В. Эксплуатационные свойства и долговечность битумно-полимерных композитов: учебное пособие для студентов. Тамбов: Изд-во. ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. 80 с.
29. Maher A., Bennet T. Evaluation of Poisson's Ratio for Use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) (Final Report). 2008. 60 p.
30. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник. М.: Атомиздат, 1968. 485 с.
31. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб (СН 550-82). Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2000. 63 с.

References

1. Taormina B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart M., Desroy N., Carlier A. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: knowledge gaps, recommendations and future directions // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. P. 380-391.
2. Nexans Inc. Submarine Power Cables. – URL: https://www.nexans.ru/Germany/2013/SubmPowCables_FINAL_10jun13_engl.pdf (date of access: 08.08.2019).
3. Ventikos N.P., Stavrou D.I. Submarine power cables: Laying procedure, the fleet and reliability analysis // *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2013. Vol. 12. No. 1. P. 13-26.
4. Xu Z., Hu Z., Zhao L., Zhang Y., Yang Z., Hu S., Li Y. Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation // *Measurement*. 2019. Vol. 133. P. 479-494.
5. Hexatronic Group. Submarine cable systems. – URL: https://hexatronic.com/media/233536/hexatronic_submarine.pdf (date of access: 08.08.2019).
6. Vise S., Adnitt C., Stanisland R. Review of cabling techniques and environmental effects applicable to the offshore wind farm industry (BERR Technical Report). 2008. 164 p.

7. Nemov A.S., Voynov I.B., Borovkov A.I. Raschetnoe opredelenie zhestkostnykh karakteristik kabelej s ierarhicheskoj strukturoj // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2008. № 6 (70). P. 21-27.
8. Nemov A.S., Voynov I.B., Borovkov A.I., Boso D.P., Schrefler B.A. Generalized stiffness coefficients for ITER superconducting cables, direct FE modeling and initial configuration // Cryogenics. 2010. Vol. 50. No. 5. P. 304-314.
9. Zhang D., Ostoja-Starzewski M. Finite element solutions to the bending stiffness of a single-layered helically wound cable with internal friction // Journal of Applied Mechanics. 2016. Vol. 83. No. 3. 8 p.
10. Yu Y., Wang X., Chen Z. A simplified finite element model for structural cable bending mechanism // International Journal of Mechanics Sciences. 2016. Vol. 113. P. 196-210.
11. Leong K.H., Latiff R.H.A., Yusof F., Ooi. C.C., Rahman M.R.A. Intermittent audio failure analysis of a remote speaker-microphone for a two-way radio // J. Fail. Anal. and Preven. 2016. Vol. 16. P. 75-85.
12. Luz F.F., de Menezes E.A.W., da Silva L.V., Cimini C.A. Jr., Amico S.C. Strength analysis of composite cables // Lat. Am. j. solids struct. 2018. Vol. 15. No. 4. 9 p.
13. Karahan M., Kalenderli Ö. Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method. Heat Transfer – Engineering Applications. 2011. P. 205-230.
14. Holyk C., Liess H.-D., Grondel S., Kanbach H., Loos F. Simulation and measurement of the steady-state temperature in multi-core cables // Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 116. P. 54-66.
15. Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N. Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity // EnergyCon 2016 IEEE Int. Conference, Leuven, Belgium 4-8 Apr. 2016. 6 p.
16. Del-Pino-López J.C., Hatlo M., Cruz-Romero P. On simplified 3D finite element simulations of three-core armored power cables // Energies. 2018. Vol. 11. No. 11. 14 p.
17. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov: Per. s angl. M.: Mir, 1979. 392 p.
18. Zenkevich O., Konechnye elementy i approksimaciya: Per. s angl. M.: Mir, 1986. 318 p.
19. Bate K.-Yu. Metody konechnykh elementov. M.: Fizmatlit, 2010. 1024 p.
20. Glushko M.F. Stal'nye pod"emnye kanaty. Kiev: Tekhnika, 1966. 328 p.
21. Sergeev S.T. Nadezhnost' i dolgovechnost' pod"emnykh kanatov. Kiev: Tekhnika, 1968. 238 p.
22. Belorussov N.I., Saakyan A.E., YAKovleva A.I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: spravochnik – 5-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1987. 536 p.
23. Dassault Systems ABAQUS 6.13 Online documentation. – URL: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html> (date of access: 08.08.2019).
24. Zolotorevskij V.S. Mekhanicheskie svojstva metallov. 3-e izd., pererab. i dop. M.: MISIS, 1998. 400 p.
25. Kryzhanovskij V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya YU.V. Tekhnicheskie svojstva polimernykh materialov: ucheb-sprav. posobie – 2-e izd., ispr. i dop. SPb.: Professiya, 2005. 248 p.
26. Livshic B.G., Kraposhin V.S., Lipeckij YA.L. Fizicheskie svojstva metallov i splavov: uchebnik dlya VUZov. M.: Metallurgiya, 1980. 320 p.
27. Gun R.B. Neftyanye bitумы. M.: Himiya, 1973. 432 p.
28. Yarcev V.P., Erofeev A.V. Ekspluatacionnye svojstva i dolgovechnost' bitumno-polimernykh kompozitov: uchebnoe posobie dlya studentov. Tambov: Izd-vo. FGBOU VPO «TGTU», 2014. 80 p.
29. Maher A., Bennet T. Evaluation of Poisson's Ratio for Use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) (Final Report). 2008. 60 p.
30. Chirkin V.S. Teplofizicheskie svojstva materialov yadernoj tekhniki: spravochnik. M.: Atomizdat, 1968. 485 p.
31. Instrukciya po proektirovaniyu tekhnologicheskikh truboprovodov iz plastmassovykh trub (SN 550-82). Gosstroj Rossii. M.: GUP CPP, 2000. 63 p.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание
190121 г. Санкт-Петербург, ул. 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 и акт к нему от каждого из авторов
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

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

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по 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**