

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

100110100110111110011001000110001010011101001000110001101010111101000010010010100100110
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010011101010101101001101001
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 1 (39) Т. 1 2018



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 (39) Т.1 2018 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. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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

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

Огай С. А. к.т.н., доцент ректор, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н. преподаватель, Флоридский

Международный Университет, Майами, США

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

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

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

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

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

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

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

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

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

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

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

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

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

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 (39) V. 1 2018 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, Chief Researcher Krylov State Research Centre

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008,

Эл № ФС72-3345

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

О журнале	стр 8
К 70-летию Игоря Григорьевича Захарова	10
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Дадыкин А. В., Захаров И.Г. Актуальные проблемы и тенденции развития кораблей классов фрегат и корвет	14
Федулов С.В. Адаптация эффективных технических решений германской подводной лодки XXI серии в отечественных проектах	20
Беликов С.С., Горбунов Д.В. Перспективные направления развития вспомогательного флота России	26
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Крыжевич Г.Б., Петров А.А. Критерий вязкого разрушения конструкций морской техники	30
Овчинников К.Д. Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью средств вычислительной гидромеханики	38
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Нго Ж.В., До Т.М., Сахно К.Н. Математическое описание области компенсационных возможностей трасс трубопроводов судовых систем	43
Во Ч.К., Сахно К.Н. Разработка технологии сборки труб с соединениям	50
Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел	57
Нго Ж.В., Сахно К.Н. Компенсация отклонений трасс трубопроводов судовых систем	63
Мальцев М.И., Рубан А.Р. Технология формирования корпуса судна из листового композиционного материала	71
Кушнер Г.А., Мамонтов В.А., Халывкин А.А., Шахов В.В. Экспериментальное исследование поперечных колебаний валопровода судна проекта ВКМ-3	77
Горелик Б.А., Колобкова И.Е. О формах организации машиностроительного производства на судостроительных предприятиях	81
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Ищенко А.Д., Роечко В.В., Малыгин И.Г. Пожарная опасность и особенности тушения пожаров энергетических установок и помещений судов	88
Берёза И.Г., Брюшковская Т.С., Балакирева К.А., Аванесова Т.П. Использование природных сорбентов в судовом водоочистном оборудовании	95
Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. Контроль состояния двигателя фирмы «CATERPILLAR» CAT 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам	100
Туркин А.В., Туркин В.А., Самойленко А.Ю. Моделирование рабочих процессов малооборотного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота\	106
Туркин А.В., Туркин В.А., Иванченко А.А. Применение лазерных технологий для оценки токсичности отработавших газов судовых энергетических установок	111
Виноградов С.В., Чунг Хуан Хоанг, Конг Доан Нгуен Моделирование теплообменника термоэлектрического генератора для использования в судовых энергетических установках	117
Покусаев М.Н., Горбачев М.М. Разработка управляемых демпферов крутильных колебаний машинно-двигательных комплексов судов	123

Покусаев М.Н., Хмельницкий К.Е., Хмельницкая А.А. Разработка малого опытового бассейна для проведения испытаний подвесных лодочных моторов маломерных судов	129
Булгаков В.П., Рубан И.Н. Влияние вибрации на кавитационный износ цилиндрической втулки среднеоборотных двигателей	135

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Кондратьев С.И., Файвисович А.В. Прогнозирование влияния волновой нагрузки на рост трещин в конструктивных элементах судна	140
---	-----

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Хасанов З.М., Хасанов О.З., Вишневский А.А. Моделирование процессов теплопереноса при исследовании термонапряженного состояния сопряженно деформируемых тел топливо-регулирующей аппаратуры <i>(на английском языке)</i>	148
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях	153
---	-----

Ветчинкин А.С., Зуев В.А., Стариченков А.Л. Формирование траектории движения на плоскости ...	164
--	-----

Макшанов А.В. Слежение за маневрирующими объектами в распределенной морской системе наблюдения <i>(на английском языке)</i>	168
--	-----

Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Лукомская О.Ю., Фахми Ш.С., Выдрин Е.О., Фирстов А.А. Применение трilinearной модели в задачах повышения качества управления внутренними водными пассажирскими перевозками	174
---	-----

Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением	185
--	-----

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Башуров Б.П., Зеленков Г.А., Лопатин М.С. Критерии исследования робастной устойчивости и неустойчивости поведения интервальных полиномов	195
---	-----

Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В., Модина М.В. Прогнозирование движения судна с помощью иерархических систем нечеткой логики <i>(на английском языке)</i>	205
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки	209
---	-----

Комашинский В.И., Таранцев А.А., Лосев М.А. Моделирование системы экстренной доставки грузов для объектов Северного морского пути	215
--	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Головкин С.В., Романенко Н.Г. Разработка моделей работы судовых двигателей внутреннего сгорания на основе их степени работоспособности с применением нечеткой логики	224
---	-----

Пономарёва Е.В., Синельников А.В., Хохлова О.А., Кулёмина К.В. Профориентированная обучающая система по механике для студентов «морского» профиля	231
--	-----

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Бушланов В.П., Новиков В.Г. Вычислительная технология расчёта термодинамического равновесия паров углеводородов нефти и инертных газов в танке нефтеналивного судна на основе пакета ASPEN HYSYS 2006 <i>(на английском языке)</i>	238
---	-----

Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Кармазин А.С., Крятов А.Ю., Суринов С.Н. Определение характеристик автономного обитаемого аппарата на основе 3-D моделирования	244
---	-----

CONTENTS

	page
About journal	8
For Igor Zakharov's 70-th anniversary	10
SHIP BUILDING	
Alexander V. Dadykin, Igor G. Zakharov Actual trends and problems in frigates and corvettes development	14
Sergey V. Fedulov Adaptation of effective technical designs of the German submarine of the XXI series in domestic projects	20
Sergej S. Belikov, Dmitrij V. Gorbunov Perspective development directions of the Russian Federation's auxiliary fleet	26
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Gennady B. Kryzhevich, Aleksey A. Petrov Ductile failure criterion for marine engineering structures	30
Kirill D. Ovchinnikov Calculations of ship motions hydrodynamic characteristics by computational fluid dynamics	38
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Viet G. Ngo, Manh T. Do, Konstantin N. Sakhno Mathematical description for compensation capacities area of pipeline routes in ship systems	43
Vo Trung Quang, Konstantin N. Sakhno Development of technology of assembling pipes with connections	50
Andrey Yu. Fershalov, Yuriy Y. Fershalov, Mikhail Yu. Fershalov Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles	57
Viet G. Ngo, Konstantin N. Sakhno Compensation for deviation of ship's pipeline route.....	63
Maksim I. Maltsev, Anatoliy R. Ruban Technology of the hull formation from sheet composite material ...	71
Guriy A. Kushner, Victor A. Mamontov, Alexei A. Khaljavkin, Vasiliy V. Shakhov Experimental research of transverse vibrations of project VKM-3 ship shaft	77
Boris A. Gorelik, Irina E. Kolobkova About forms of organization marine engineering industry on shipyards	81
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Andrey D. Ishchenko, Vladimir V. Roenko Igor G. Malygin Fire hazards and fire extinguishing features of power plantsend compartments of ships	88
Irina G. Beryoza, Tamara S. Bryushkovskaya, Ksenia A. Balakireva, Tatiana P. Avanesova The use of natural sorbents in the ship water purification equipment	95
Evgeny V. Hekert, Nikolay I. Nikolaev, Viktor V. Gerasidi Inspection of engine company CATERPILLAR CAT 3512 gruntovalnoy the installation of the dredge for vibration parameters	100
Aleksandr V. Turkin, Vladimir A. Turkin, Anatoly Yu. Samoilenko Ship low-speed engine working processes modeling to reduce the nitrogen oxides emission	106
Aleksandr V. Turkin, Vladimir A. Turkin, Alexander A. Ivanchenko Application of laser technologies for estimation of toxicity of worked gases of ship energy installations	111
Sergey V. Vinogradov, Trung H. Hoang, Cong D. Nguyen Modeling of the heat exchanger of a thermoelectric generator for use in ship power plants	117
Mikhail N. Pokusaev, Maksim M. Gorbachev The development of controlled torsional vibration damper machine - propulsion complexes of ships	123

Mikhail N. Pokusaev, Konstantin E. Khmel'nitskiy, Anastasiya A. Khmel'nitskaya The development of a small test basin for testing the outboard motors of small size vessels	129
Vladimir P. Bulgakov, Irina N. Ruban The effect of vibration on the cavitation wear of the cylinder sleeve of medium speed diesel engines	135

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Sergey I. Kondratyev, Alexandr V. Fayvisovich Prediction of wave load effect on crack growth in structural elements of ship	140
--	-----

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

Zimfir M. Khasanov, Oleg Z. Khasanov, Aleksandr A. Vishnevskiy Modeling of heat transfer processes of the thermally stressed state of conjugated deformable bodies in fuel-control equipment (<i>In English</i>)	148
--	-----

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Valery Y. Kaminsky, Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov, Sergey N. Turusov The study of the algorithmic structure of the system motion control of hydrofoil	153
Aleksaner S. Vetchinkin, Vladimir A. Zuev, Alexey L. Starichenkov The formation of trajectories on the plane	164
Andrey. V. Makshanov Tracking maneuvering objects In distributed maritime observation system (<i>In English</i>)	168
Svyatoslav A. Seliverstov, Yaroslav A. Seliverstov, Ol'ga Yu. Lukomskaya, Shakeeb S. Fahmi, Evgenia O. Vydrina, Aleksey A. Firstov. Application of the trilinear model in the problems of improving the quality of management of inland water transportations	174
Valery Y. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Alexey L. Starichenkov No-failure operation of motion control systems	185

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Boris P. Bashurov, Gennadiy A. Zelenkov, Mihail S. Lopatin Guidelines for preparation of articles for the academic periodical «marine intellectual technologies»	195
Dmitriy E. Studenikin, Evgeniy V. Khekert, Marina. A. Modina Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (<i>In English</i>)	205

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Valery Y. Kaminsky, Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov The treatment of professional- value Aspect of action navigators during simulator training	209
Vladimir I. Komashinsky, Alexander A. Tarantsev, Mikhail A. Losev. Modeling system for emergency delivery for objects of the northern sea route	215

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Sergey V. Golovko, Nikolay G. Romanenko Development of models of operation of the ship engines of combustion on the basis of their degree of working capacity with use of fuzzy logic	224
Elena V. Ponomareva, Aleksey V. Sinelshchikov, Olga A. Khokhlova, Kseniya V. Kulemina Prof-oriented learning system on mechanics for students of the "sea" profile	231

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Vladimir P. Bushlanov, Vitaly G. Novikov Computational technology for calculation thermodynamic equilibrium of oil vapors and inert gases in the tank of oil tanker on the basis of the ASPEN HYSYS 2006 package (<i>In English</i>)	238
Leonid G. Bakumenko, Alexander N. Dyadik, Andrey S. Karmazin, Arsenij Ju. Krjatov, Sergej N. Surin Determination of the characteristics of an autonomus uninhabited vehicle on the basis of tridimensional modeling	244

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.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

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

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

Тематика

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

Основные направления

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

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

Basic Magazine Trends

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

К 70-летию Игоря Григорьевича Захарова

26 декабря 2017 года исполнилось 70 лет заместителю генерального конструктора по перспективному проектированию, главному конструктору проекта АО ЦМКБ «Алмаз», доктору технических наук, профессору контр-адмиралу запаса Игорю Григорьевичу Захарову, одному из ведущих специалистов современного отечественного кораблестроения.

Игорь Григорьевич родился в Ленинграде. После окончания школы поступил в Ленинградский кораблестроительный институт. Однако, окончив два курса, понял, что его призвание – это Военно-Морской Флот. В 1967 году по собственной инициативе, он перешел на второй курс кораблестроительного факультета Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского, которое окончил в 1971 году.

Служба молодого лейтенанта проходила на кораблях Черноморского и Северного флотов: командиром группы на БПК «Сметливый» (рис. 1).



Рис.1. БПК пр.61

Затем на первом отечественном авианосце – головном авианесущем крейсере проекта 1143 «Киев» (рис.2). Знакомство с крейсером И.Г. Захарова началось еще в процессе строительства корабля на Черноморском судостроительном заводе в Николаеве. Это было не только познавательно, но и способствовало профессиональному становлению перспективного инженера-кораблестроителя.



Рис.2. Авианесущий крейсер пр. 1143 «Киев»

Пять лет корабельной службы явились хорошей практикой для дальнейшего служебного роста. Это и произошло в 1977 году – Игорь Григорьевич поступил на кораблестроительный факультет Военно-морской академии им. А.А. Гречко. После окончания с отличием академии в 1979 году его служба проходила в военном представительстве и в Главном управлении кораблестроения ВМФ.

Однако истинным призванием И.Г. Захарова была наука. В 1983 году после успешной защиты кандидатской диссертации он был назначен преподавателем в Военно-морскую академию, а в 1989 году стал старшим преподавателем кафедры военного кораблестроения. Здесь он разработал новый курс теории проектирования надводных кораблей и создал курс концептуального анализа в военном

кораблестроении. Под его руководством была создана исследовательская и обучающая система автоматизированного проектирования кораблей «Оценка».

В 1988 году состоялась защита докторской диссертации, а четыре года спустя, в 1992 году он был назначен начальником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ. Для страны, Вооруженных Сил и флота это были трудные годы, рушилось многое, в том числе и в военно-морской науке. Новому начальнику 1 ЦНИИ МО РФ предстояло не только защитить Институт от пагубных тенденций, но и найти пути его развития в новых условиях. Эту задачу контр-адмирал И.Г. Захаров решил и решил с успехом (рис.3).



Рис.3. начальник 1 ЦНИИ МО РФ И.Г. Захаров

Институт не только сохранил свои позиции в отечественном кораблестроении, но и получил дальнейшее развитие. Одним из принципиальных направлений в научной деятельности Института явилось дальнейшее развитие и совершенствование системы автоматизированного исследовательского проектирования кораблей и судов (САИПР «Чертеж-4»). Личной заслугой И.Г. Захарова явилось внедрение в САИПР метода многокритериальной оптимизации многоцелевого боевого корабля (рис.4).

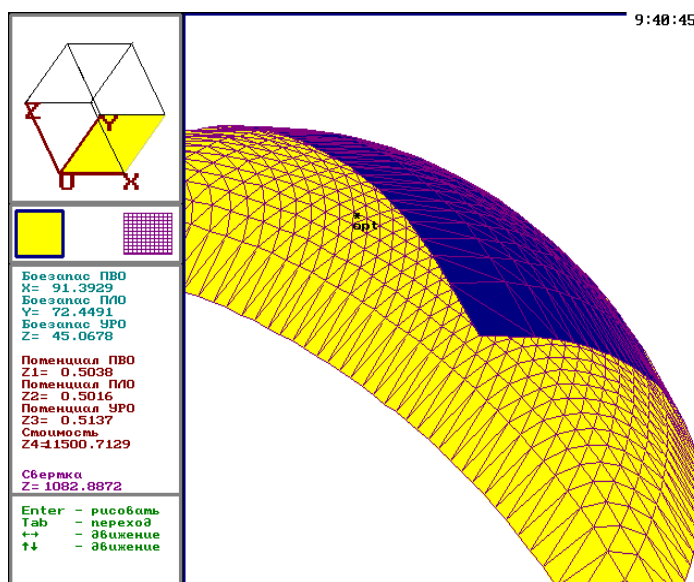


Рис. 4. Визуализация области Парето

Активное внедрение САИПР в научную деятельность Института позволило начинать процесс проектирования корабля с формирования общего замысла по его созданию, основываясь на возлагаемые на корабль задачи и достижения научно-технического прогресса (рис.5).

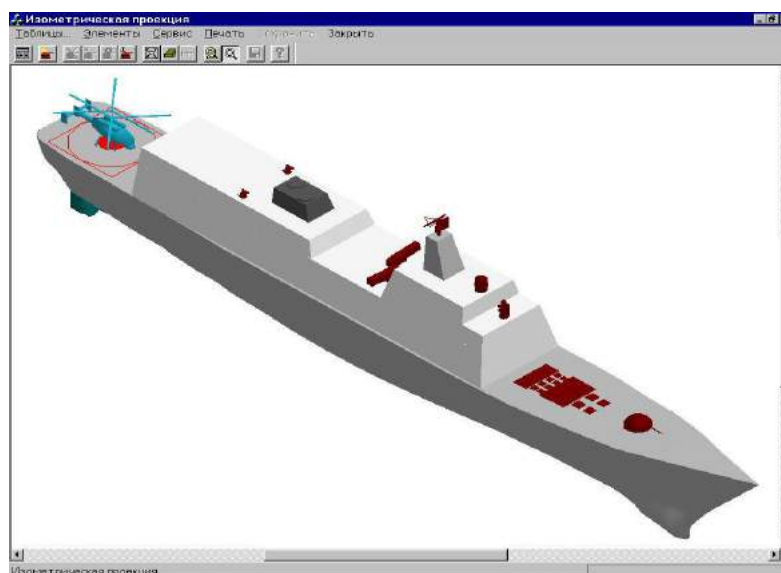


Рис.5. 3-D проекция исследовательского проекта фрегата

Возглавляя Институт, И.Г. Захаров внес весомый личный вклад в обоснование направлений развития корабельного состава ВМФ России, создание уникальной лабораторно-экспериментальной базы, разработку нормативных, методических и эксплуатационных документов флота, создание автоматизированных систем моделирования и проектирования кораблей, теоретического аппарата анализа мирового рынка военного кораблестроения. Результаты этой работы получили реализацию в концепциях развития ВМФ различных годов, в проектах Государственных программ вооружения и экспортных программах кораблестроения. И.Г. Захаров активно возглавлял разработку комплексных целевых программ при строительстве головных подводных лодок и надводных кораблей четвертого поколения. Под его руководством были разработаны ТТЗ на создание корвета проекта 20380 типа «Стерегущий» и фрегата проекта 22350 типа «Адмирал Флота Советского Союза Горшков».

После ухода в 2006 году в запас И.Г. Захаров работал Главным научным сотрудником 1 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, с 2008г. – руководителем подразделения, вице-президентом ОАО «Объединенная судостроительная корпорация». С 2010 г. по настоящее время И.Г. Захаров – заместитель генерального конструктора АО ЦМКБ «Алмаз» по перспективному проектированию и главный конструктор перспективного корвета нового поколения проекта 20386 (рис.6).

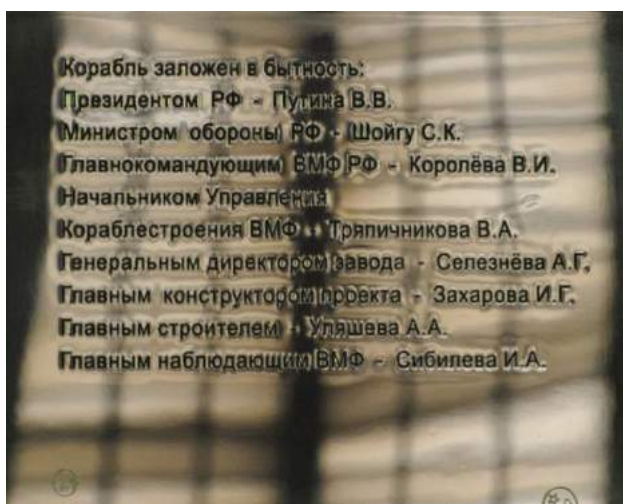


Рис.6. Закладная доска Корвета. Гл. конструктор И.Г. Захаров

Основными направлениями научной деятельности доктора технических наук, профессора И.Г. Захарова являются: разработка методов решения задач оптимизации сложных военно-технических систем, теоретические основы концептуального проектирования, методы автоматизированного исследовательского проектирования, научные принципы и методы обоснования кораблестроительных программ, теория и методы маркетинговых исследований при формировании экспортных программ (рис.7,8).



Рис. 7. Корвет проекта 20380



Рис. 8. Фрегат проекта 22350

И.Г. Захаров – автор более 170 научных трудов, в том числе двух учебников и пяти монографий. Награжден орденами: «За службу Родине в ВС СССР» 3 степени (1977), «Почета» (1995), «За военные заслуги» (2000), медалями, лауреат Государственной премии РФ (2002).

Сердечно поздравляем, Вас уважаемый Игорь Григорьевич с юбилеем, желаем здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной деятельности на благо России!

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 629.12.001

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОРАБЛЕЙ
КЛАССОВ ФРЕГАТ И КОРВЕТ****Александр Васильевич Дадыкин**

заместитель главного конструктора

АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз»

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 50

e-mail: office@almaz-kb.ru

Игорь Григорьевич Захаров

доктор технических наук, профессор

заместитель генерального конструктора

АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз»

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 50

e-mail: office@almaz-kb.ru

Аннотация

Восполнение надводного корабельного состава дальней морской и океанской зоны является актуальной проблемой строительства Военно-морского флота. Эта проблема лежит в русле общемировых тенденций развития двух классов кораблей, - фрегатов и корветов.

Выдвижение фрегатов на первый план в программах развития флотов значительного числа морских государств повлекло за собой заметные изменения в концепции создания этих кораблей, росту их водоизмещения и, соответственно, стоимости. Одновременно, благодаря развитию технических средств и снижению массогабаритных характеристик вооружения, повышается боевой потенциал менее крупных кораблей, - многоцелевых корветов.

Отмечается, что, испытывая известные экономические ограничения, ведущие морские страны организуют восполнение корабельного состава океанской зоны за счет сочетания меньшего числа «тяжелых» фрегатов и большего количества многоцелевых корветов увеличенного водоизмещения. Показывается экономическая целесообразность такого подхода.

Ключевые слова: надводный корабль, фрегат, многоцелевой корвет, перспективный корабль, проблемы строительства надводных кораблей, программа развития флота, корабельный состав флота, Военно-морской флот.

**ACTUAL TRENDS AND PROBLEMS
IN FRIGATES AND CORVETTES DEVELOPMENT****Alexander V. Dadykin**

deputy chief designer

JSC "CMDDB "Almaz"

Varshavskaya, 50, St.Petersburg, 196128, Russian Federation

e-mail: office@almaz-kb.ru

Igor G. Zakharov

the professor, doctor of technical science,

deputy general designer

JSC "CMDDB "Almaz"

Varshavskaya, 50, St.Petersburg, 196128, Russian Federation

e-mail: office@almaz-kb.ru

Abstract

An urgent problem of the Navy is the replenishment of the surface combatants of the off-shore maritime and ocean zones. This problem is in the mainstream of global trends in the development of two classes of ships - frigates and corvettes.

Moving out frigates to the fore in the development programmes of a large number of Maritime States has resulted in significant changes in these ships concept, the increase of their displacement and, consequently, the increase of the cost. At the same time, the combat strength of smaller ships such as multipurpose corvettes increases due to the development of technical means and reduction of weapons weight and size characteristics.

It is noted that leading Maritime countries, suffering of the economic constraints, replenish the Navy with ocean zone ships combining a smaller number of "heavy" frigates and a larger number of multi-purpose corvettes of the increased displacement. The cost-effectiveness of such approach is shown in the issue.

Key words: surface combatants, frigate, multipurpose corvette, advanced ship, shipbuilding problems, Navy development programme, state naval power, Navy.

Восстановление позиций России в Мировом океане сегодня является одной из приоритетных общенациональных задач, что и определяет необходимость создания перспективных боевых надводных кораблей, наиболее многочисленную часть которых составляют фрегаты и корветы.

Морские силы общего назначения, основу которых составляют надводные корабли, во взаимодействии с видами и родами войск Вооруженных Сил Российской Федерации играют важную роль в обеспечении национальной безопасности России в Мировом океане и защите страны от агрессии с морских направлений. Надводные корабли также привлекаются к решению таких задач мирного времени, как контроль за рыболовством и разработкой полезных ископаемых, пресечение контрабанды и пиратства, выполнение дипломатических миссий по демонстрации флага и передовых отечественных технологий.

Создание кораблей для отечественного флота лежит в русле общемировых тенденций развития корабельного состава. Так, до недавнего времени возможности государства содержать крупный военный флот во многом определялся его способностью вести серийное строительство кораблей класса эскадренный миноносец. Эскадренные миноносцы считались одним из наиболее многочисленных классов надводных кораблей. Еще в конце 80-х гг. мировой флот эскадренных миноносцев насчитывал более 300 кораблей. В зависимости от экономических, военно-географических, национальных и политических условий, действующих в той или иной стране, а также от структуры и корабельного состава ВМС этих стран эскадренные миноносцы существенно отличались как по концептуальному замыслу, так и по водоизмещению.

К началу нового века ситуация существенно изменилась. Из всех стран, еще содержащих в своих военных флотах эскадренные миноносцы, планируют их развитие в национальных флотах и осуществляют строительство только США, Япония, Индия и Китай. Требование нести на себе бремя серийного строительства в большинстве передовых морских государствах перешло на младший класс кораблей – фрегаты.

Выдвижение фрегатов на первый план в программах развития флотов значительного числа морских государств повлекло за собой заметные изменения в концепции создания этих кораблей. Сегодня это уже многоцелевой корабль водоизмещением 6500-7500 т, способный решать широкий круг задач как в морской, так и в океанской зоне. Для вооружения современных фрегатов характерно применение новейших образцов морского оружия и вооружения, в том числе высокоточных ракетно-артиллерийских комплексов, предназначенных для поражения надводных кораблей, подводных лодок, воздушных и береговых целей, а также современных систем освещения обстановки, целеуказания и автоматизированного управления.

Ограничение по водоизмещению позволяет обеспечивать относительно высокую серийность и умеренную стоимость фрегатов. Поэтому можно ожидать, что в ближайшем будущем этот класс боевых надводных кораблей останется самым многочисленным. В то же время, следуя общим закономерностям современного развития, водоизмещение фрегатов возрастает от проекта к проекту. При этом у последних представителей этого класса оно достигло величин, характерных для некоторых эскадренных миноносцев. Характеристики фрегатов последних проектов показаны в табл.1.

Таблица 1.

№	Проект	Страна	Дпол., т	Вп.х.	R(18)	Тип ЭУ	WPS,лс.
1	Daring, пп.45	Англия	7570	31	6500	IEP	54400
2	FREMM Aquitaine	Франция	6096	27,5	4000	CODLOG	43520
3	Baden-Wurttemberg, пп.125	Германия	7320	26	4000	CODLAG	38920
4	Type 26	Англия	6900	28	5000	CODLOG	49000
5	Asahi	Япония	6500	30	5000	COGLAG	65000
	Средние значения		6880	29	4900	CODLOG(A)	50200

Помимо решения задач в удаленных морских и океанских зонах всегда сохраняется актуальность решения комплекса задач в ближней морской зоне. Для решения этих задач в последние десятилетия многие флоты мира в качестве современных систем вооружения используют боевые надводные корабли ограниченного водоизмещения, к которым относятся многоцелевые корветы.

В современных условиях актуальность создания и содержания в составе военных флотов целого ряда стран корветов определяется рядом обстоятельств. Прежде всего, это связано с новыми достижениями в области снижения массогабаритных характеристик корабельного оружия и вооружения с одновременным улучшением показателей их эффективности, что позволяет размещать его на кораблях относительно небольшого водоизмещения и существенно повышать не только их боевые возможности, но и конкурентоспособность последних на мировом рынке оружия среди других классов кораблей. Другими обстоятельствами, которые следует учитывать при анализе кораблей этих классов, являются существенные изменения в современной политической обстановке, а также те экономические затруднения, в результате которых подверглись сокращению корабельный

состав флотов наиболее крупных морских держав и планы их строительства. Наряду с этим наблюдается экономическое оживление в странах "третьего мира", прежде всего, Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока.

Анализируя корабельный состав флотов, можно заметить, что значительную роль в развитии многоцелевых корветов сыграли последние локальные войны и конфликты на морских театрах военных действий, предъявившие требования к приоритетности при создании многоцелевых кораблей основных классов и, в частности, обязательному наличию на них достаточно эффективных корабельных средств ПВО. Исходя из возможности решения многоцелевыми корветами ударных задач, а также задач противолодочной обороны (ПЛО), к этому классу можно отнести корабли, имеющие минимальный состав вооружения, необходимого для решения названных задач. Он может быть расширен за счет вертолета, другого дополнительного вооружения.

В настоящее время современные корветы по общей численности занимают одно из ведущих мест в составе зарубежных флотов. Их количество превысило 200 ед. в ВМС 50 возглавляющих список морских государств. Характеристики наиболее современных проектов кораблей этого класса показаны в табл.2.

Таблица 2.

№	Проект	Страна	Днор., т	Вп.х.	R(18)	Тип ЭУ	WPS, лс.
1	Venator, пр.31	Англия	4000	26	4500	CODLOG	43500
2	FTI	Франция	4250	27	5000	CODAD	42900
3	Incheon	Корея	3250	35	4500	CODOG	58200
4	Milgem	Турция	2030	29	3000	CODAG	42300
5	PPA	Италия	4500	33	4000	CODLAG	74000
	Средние значения		3600	30	4200	CODLOG(A) CODOG(A)	52200

В частности, это легкий фрегат программы FTI (Frégate de Taille Intermédiaire), Франция (см. рис.), легкий фрегат проекта 31 (VINATOR), Великобритания и многофункциональный патрульный корабль типа PPA (Pattugliatore Polivalente d'Altura), Италия. В формулировках концепций указанных кораблей в той или иной форме присутствуют доводы о необходимости наращивания корабельного состава флота за счет кораблей ограниченной стоимости. Так, Великобритания планирует восполнять свои ВМС за счет сочетания более тяжелых (и дорогих) фрегатов проекта 26 с упомянутыми кораблями проекта 31. Аналогично собирается поступать Франция (в сочетании с более дорогими

фрегатами FREMM типа Aquitaine) и Италия (в сочетании с более дорогими кораблями FREMM типа Bergamini). При этом на этих кораблях, помимо обычного набора вооружения, предполагается размещение модульного вооружения для решения дополнительных задач мирного времени.



Рис. 1 легкий фрегат программы FTI ВМС Франции.

Характерной особенностью современных корветов является значительный рост водоизмещения (почти в два раза по сравнению с корветами прошлых поколений), что позволяет этим кораблям решать стоящие перед ними задачи не только в ближней морской, но и в дальней морской и океанской зоне. В результате вырисовывается тенденция наращивания корабельного состава открытого моря за счет смешанного состава: меньшего количества бол

При этом на основе результатов ранее выполненного анализа можно заключить, что современные тенденции развития фрегатов и корветов во многом согласуются между собой, что находит свое выражение, прежде всего, в универсальности задач, решение которых обеспечивается достаточно мощным ракетным, ракетно-артиллерийским либо скорострельным артиллерийским вооружением. Стремление обеспечить базирование вертолета на корветах с целью придания им новых возможностей по освещению обстановки и выдачи целеуказания также является актуальной тенденцией их развития. Дальнейшее наращивание возможностей многоцелевых корветов будет возможно за счет использования модульных робототехнических средств.

Сравнивая новые фрегаты и корветы с кораблями прошлого поколения можно заметить, что при значительном росте водоизмещения средняя скорость этих кораблей несколько снизилась. При этом в интересах обеспечения большей вместимости уменьшилось отношение длины к ширине корабля.

Характеризуя фрегаты и корветы в целом можно заметить, что автоматизация управления движением корабля, энергетическими установками и системами вооружения позволила сократить численность экипажа на

большинстве фрегатов до 200, а корветов до 80-100 человек, что повлекло снижение объема жилых помещений в среднем до 25% от общего объемного водоизмещения. Характерными также являются требования по улучшению удобства размещения личного состава и организации отдельных зон (блоков) для отдыха, приема пищи и сна. При этом отмечается стремление изолировать спальные помещения, ликвидировать сквозные проходы через них.

На большинстве современных фрегатов и корветов в качестве ГЭУ используются дизель-газотурбинные и дизельные энергетические установки с ВРШ. Управление ГЭУ высоко автоматизировано и осуществляется из специального поста энергетики либо вообще с ходового поста. Новой тенденцией в развитии энергетических установок следует считать применение частичного электродвижения.

Расчеты показывают, что применительно к отечественному ВМФ оптимальным с точки зрения затрат могло бы стать пополнение корабельного состава дальней морской и океанской зоны более крупными кораблями водоизмещением около 7000-7500 т и более легкими, - около 4000 т. При этом стоимость строительства более легких кораблей, многоцелевых корветов пропорционально водоизмещению не должна превышать 60% от стоимости тяжелого корабля (фрегата), а соотношение тяжелых и легких кораблей в составе флота д ее тяжелых кораблей (фрегатов) и большего, - «бюджетных» легких фрегатов (корветов). олжно находиться в пределах один к четырем. В этом случае существующее количество кораблей дальней морской и океанской зоны может быть сохранено и даже несколько увеличено при программе ежегодной сдачи одного легкого

корабля и одного тяжелого корабля, - в три года.

Основным условием выполнения изложенной программы является непрерывное строительство обоих классов кораблей.

Динамика строительства кораблей океанской зоны в соответствии с предлагаемой программой, показана на рисунке 2.

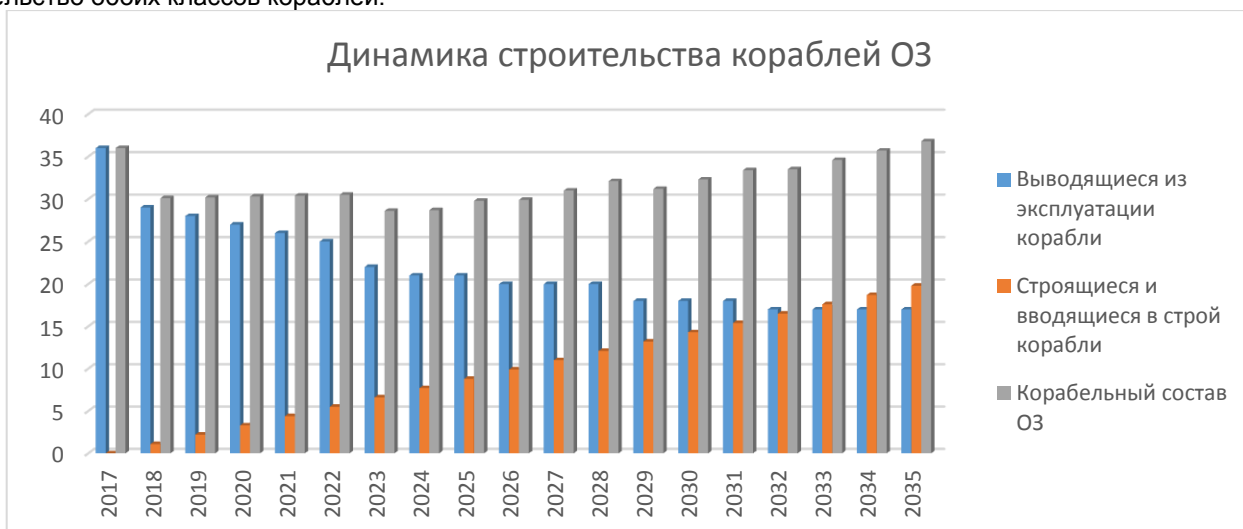


Рис.2 Динамика строительства кораблей класса фрегат-корвет.

Результаты выполненного анализа современного состояния боевых надводных кораблей класса фрегат-корвет показывают, что происходит постепенное размывание границ между двумя этими классами надводных кораблей. Определяющим фактором в разделении классов фрегат и корвет является способность стран осуществлять крупносерийную постройку этих кораблей в таком темпе, который позволил бы иметь корабельный состав надводного флота в необходимом количестве. Именно экономические возможности государства и потребность в корабельном составе заставляют разделять эти два класса на более крупный и имеющий более мощное вооружение, и более бюджетный, но все еще сохраняющий многоцелевое назначение и способность действовать в удаленных районах мирового океана. Если считать, что более крупные корабли будут формировать класс фрегатов, то их водоизмещение будет находиться в диапазоне 6500-7500т, скорость полного хода – 28-30 уз, а основу вооружения будут составлять средства коллективной ПВО. Корветы, в отличие от фрегатов, займут диапазон водоизмещение в пределах 3500-4200т. Скорость их полного хода будет находиться в том же диапазоне, что и у фрегатов, а противовоздушное вооружение будет представлено средствами ПВО самообороны.

В целом, под влиянием общих тенденций, складывающихся к началу третьего десятилетия XXI в., фрегаты и корветы будут в большей степени ориентированы на реальное боевое применение и в меньшей степени - как мобилизационный резерв масштабной войны, вероятность которой по-прежнему остается

невысокой. Этот флот будет меньшим по составу, однако при создании новых кораблей будут использоваться самые последние достижения передовых технологий. При этом положение каждого национального надводного флота в системе флотов основных морских государств во многом будет зависеть от того, насколько эффективно он сможет разделить имеемые ограниченные средства между дорогими немногочисленными фрегатами и бюджетными корветами.

Литература

1. Горшков С.Г. Морская мощь государства. М.: Воениздат, 1976.
2. Григорович И.К. Воспоминания бывшего морского министра. С.Пб: Дева, 1993.
3. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. СПб.: Судостроение, 2000.
4. Defense News, 2016
5. Defense Industry, 2017
6. Forecast international. Warships, 1916
7. Jane's fighting ships, 2017-2018
8. Naval Forces, 2016-2017
9. Sea Power, 2017

References

1. Gorshkov S.G. Morskaya mosch gosudarstva (State sea power). M.: Voenizdat, 1976.
2. I.K. Grigorovich Vospominaniya byvshego morskogo ministra (Memories of the retired minister of maritime affairs). SPb: Deva, 1993.
3. I.G. Zakharov Kontseptualny analiz v voennom korablestroenii (Concept analysis in naval architecture). SPb.: Sudostroenie, 2000.
4. Defense News, 2016
5. Defense Industry, 2017
6. Forecast international. Warships, 1916
7. Jane's fighting ships, 2017-2018
8. Naval Forces, 2016-2017
9. Sea Power, 2017

УДК 623.8; 355.48

АДАПТАЦИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЕРМАНСКОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ XXI СЕРИИ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОЕКТАХ

Сергей Валентинович Федулов

Кандидат исторических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономических дисциплин,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
196603, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Гусарская, д. 6 корп. 12, кв. 27.
e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

Аннотация

В годы Второй мировой войны в Германии была создана подводная лодка XXI серии, в проекте которой были использованы эффективные технические решения, выработанные в ходе войны. Подводные лодки (ПЛ) XXI серии со значительно усилившимися боевыми возможностями были способны серьезно снизить превосходство противолодочных операций и обладали таким преимуществом как скрытность.

Несколько германских заводов, производящих оборудование (компоненты) для ПЛ XXI серии и Данцигская верфь были заняты советскими войсками после окончания войны. На этой верфи было немалое количество незаконченных ПЛ XXI серии, готовых секций и оборудования. Сразу после войны, в соответствии с Потсдамскими соглашениями в июле 1945 года, Великобритания, Советский Союз и Соединенные Штаты получили скомплектованные подводные лодки. Это позволило изучить, как новые технические решения были реализованы.

Вместе с тем, восстановление советского кораблестроения было важным приоритетом для советского руководства. В конце войны советские конструкторы подводных лодок и исследователи сконцентрировали свои усилия на увеличении подводной скрытности, которая рассматривалась как решающий фактор в военно-морском деле. Советские подводные кораблестроители, тщательно изучив трофейные подводные лодки XXI серии выявили не только перспективные решения, но и недостатки.

Ключевые слова: подводная лодка XXI серии, подводная лодка проекта 613, верфь «Шихау», технические решения, торпедный аппарат, технические новинки.

ADAPTATION OF EFFECTIVE TECHNICAL DESIGNS OF THE GERMAN SUBMARINE OF THE XXI SERIES IN DOMESTIC PROJECTS

Sergey V. Fedulov

PhD, Associate Professor of the Department of Social and Economic Disciplines
Mozhaisky Military Space Academy
ap. 27., corp. 6, house 12, Gusarskaya street, Pushkin, Saint Petersburg, 197198, Russia.
e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

Abstract

During the Second World War, in Germany was created the submarine of the XXI series in the project of which were used effective technical solutions developed during the war. Submarines of the XXI series with significantly increased combat capabilities were able to reduce seriously the superiority of anti-submarine operations and had the advantage of secrecy.

Several German plants producing equipment (components) for submarines of the XXI series and Danzig shipyard were occupied by Soviet troops after the end of the war. At this shipyard a considerable number of unfinished submarines of the XXI series, finished sections and equipment were left. Immediately after the war, in accordance with the Potsdam agreements in July 1945, the United Kingdom, the Soviet Union and the United States received completed submarines. This allowed to study how new technical solutions were implemented.

At the same time, the restoration of Soviet shipbuilding was an important priority for the Soviet leadership. At the end of the war, Soviet submarine designers and researchers concentrated their efforts on increasing of the underwater secrecy, which was considered to be the decisive factor in naval affairs. Soviet submarine shipbuilders, having carefully studied the captured submarines of the XXI series, revealed not only promising solutions, but also shortcomings.

Key words: Submarine of XXI series, submarine of project 613, shipyard «Shihau», technical solutions, torpedo tube, technical novelties.

Введение

С 1943 года германская промышленность приступила к постройке новых, современных подводных лодок XXI серии. В технических решениях лодок данной серии был аккумулирован опыт строительства, боевого применения субмарин серии VII С и перспектив развития научно-технической мысли. Это были самые современные, на то время, корабли, имеющие большие перспективы. С 1943 по 1945 годы на верфях германских судостроительных фирм было заложено 118 подводных лодок XXI серии, при этом только две из них совершили по одному боевому походу.

Поэтому все эффективные технические решения, реализованные на лодках данной серии, представляли огромный интерес для военно-морских специалистов, инженеров, конструкторов.

1. Изучение и выявление эффективных технических решений, реализованных на подводных лодках XXI серии

В ходе наступательной операции советские войска освободили г. Данциг, где на судостроительной верфи «Шихау» строились германские подводные лодки (ПЛ) XXI серии. По распоряжению заместителя наркома ВМФ адмирала флота Л.М. Галлера в Данциг для осмотра верфи и подводных лодок был направлен капитан 2 ранга А.А. Булыгин. Вскоре после осмотра А.А. Булыгин сообщал руководству ВМФ следующую информацию: «Производительность верфи – одна подводная лодка в неделю, но программа не выполнялась. В среднем 50 % программы составлял судоремонт. На стапелях в настоящее время находится восемь подводных лодок типа XXI готовностью 70-80 %, включая оборудование двигателей. Кроме того, имеются отдельные секции лодок, подготовленные к сборке.

На верфи работало 4200 рабочих. Цеха, оборудование, краны в исправном состоянии. Начата паспортизация. В случае передачи НКВМФ – верфь может стать базой большого судоремонтного завода. Чертежи лодок серии XXI немцы вывезли. Совместно с разведкой принимаются меры по их розыску».

Получив данную информацию, руководство ВМФ направило на Данцигскую верфь специальную группу под руководством инженер-капитана 2 ранга А.И. Дубравина. В состав группы входили инженер-капитан 2 ранга Е.С. Мартынич и инженер-капитан 3 ранга В.И. Зенкин [1].

21 апреля 1945 года руководитель специальной группы докладывал заместителю наркома ВМФ адмиралу флота Л.М. Галлеру, что подводные лодки типа XXI находящиеся на стапелях верфи «Шихау» в г. Данциг относятся к типу океанских подводных лодок водоизмеще-

нием свыше 1000 тонн. Далее перечислялись тактико-технические элементы:

- Основные размеры: водоизмещение – 1680-1820 тонн; наибольшая длина – 76,7 метров; наибольшая ширина – 6,6 метров; осадка – 6,32 метра.

- Вооружение: а). Торпедное: торпедные аппараты – 6 х 533 мм; торпеды – 23 штуки. Торпедные аппараты и стеллажи приспособлены также для постановки и хранения мин систем «ТМА», «ТМВ», «ТМС». Торпедные аппараты оборудованы приборами безпузырной стрельбы и могут вести, как одиночную торпедную стрельбу, так и стрельбу залпом. б). Артиллерийское: состоит из двух турельных установок с многоствольными системами. Калибр, количество стволов и боезапаса не установлены. в). Перископы – командирский и зенитный диаметром 180 мм, длиной 7,5 мм.

- Средства связи: рация, шумопеленгаторная станция, прибор подводной звуковой связи, радиолокационная установка.

- Штурманские приборы: гирокомпас «Аншютц», магнитный компас с оптической передачей, эхолот, лаг, радиопеленгационная станция.

В своём рапорте руководитель специальной группы инженер-капитан 2 ранга А.И. Дубравин сообщал характеристики подводных лодок серии XXI, определённые в ходе их изучения. В частности, *манёвренность и мореходные качества* – глубина погружения подводной лодки достигает не менее 200 метров. Скорость погружения неизвестна, но низкое расположение системы главного балласта и большой объём системы быстрого погружения (14,7 м³) дают основания предполагать о большой скорости погружения. Наличие «воздушной мачты» системы «шнорхель» даёт возможность плавания под дизелями в подводном положении на перископной глубине. На самом деле глубина погружения составляла: рабочая – 133 метра; предельная – 220 метров.

Скорость хода и дальность плавания – по ориентировочным данным скорость полного надводного хода составляла 17-20 узлов, а подводная – вероятно 12-15 узлов. Данные о дальности плавания в надводном положении отсутствуют, но она характеризуется полным запасом топлива – 240 тонн [1].

Таким образом, уникальность подводных лодок данной серии заключалась в том, что подводная скорость была выше, чем надводная. Так подводная скорость составляла – 17,2 узла, а надводная – 15,6 узла. А дальность плавания: надводная – 15500 миль; подводная – 340 миль.

Автономность плавания – подводная лодка имеет обширные и благоустроенные помещения для размещения экипажа, оборудованные рундуками, диванами и каютами. Имеются рефрижераторная и опреснительная установки, установка для кондиционирования воздуха и

система регенерации воздуха. Запас пресной воды составляет 6 тонн [1].

Данные по прочному и лёгкому корпусу, главным и вспомогательным механизмам, устройствам и системам были приведены в приложении к докладу.

В заключение своего доклада руководитель специальной группы инженер-капитан 2 ранга А.И. Дубравин сообщал заместителю наркома ВМФ, что на подводных лодках типа XXI созданных по проекту военного времени (декабрь 1943 года) учтён опыт подводной войны. Подводные лодки имеют оригинальную конструкцию и представляют большой тактический и технический интерес [1].

Лодки серии XXI имели ряд технических новинок («воздушная мачта» системы «шнорхель»); редукторные передачи линии гребного вала; моторы «подкрадывания» (дающие скорость 6 узлов); конструкция лёгкого и прочного корпусов; расположение топливных и балластных систем; аккумуляторные батареи, которые использовались одновременно с применением форсированных двигателей и электродвигателей. Бесшумность хода лодки была поставлена во главе решения конструкторских задач. Поэтому все основные и вспомогательные механизмы имели амортизацию от корпуса посредством сварных резиновых амортизаторов, но некоторые вспомогательные механизмы, как например дизель-компрессоры фирмы «Юнкерс» были установлены на стальные винтовые пружины рессорного типа. По мнению специалистов группы НКВМФ изучающих трофейные субмарины, данные технические новинки, большая сложность систем и трубопроводов требовали очень высокой квалификации экипажа и крайне внимательного ухода при эксплуатации [1].

Вместе с тем, основными преимуществами этих кораблей являлись:

- Аккумуляторные батареи большой ёмкости;
- Мощные электродвигатели подводного хода;
- Наличие малозумных электродвигателей подкрадывания;
- Система перезарядки торпедных аппаратов;
- Улучшенные обводы корпуса [2].

Важной особенностью строительства германских подводных лодок XXI серии являлось то, что они строились на стапелях верфи не как обычно, а собирались из секций на любом подходящем заводе и затем отправлялись на верфи для окончательной сборки [3].

Благодаря данным особенностям эти субмарины оказали существенное влияние на послевоенное развитие ВМФ всех морских мировых держав.

Новизна проекта субмарин XXI серии вскоре стала основой для интенсивных поисков материалов по этим подводным лодкам не только для советских специалистов. (Рис. 1).



Рис.1. Подводные лодки XXI серии

Как только союзники занимали германские верфи, начинались поиски чертежей, материалов, оборудования, а также германских инженеров и техников [4]. Сразу после войны, в соответствии с Потсдамскими соглашениями в июле 1945 года, Великобритания, Советский Союз и Соединенные Штаты получили следующие подводные лодки XXI серии:

- Великобритания – U-2518, U-3017;
- СССР – U-2529, U-3035, U-3041, U-3515;
- США – U-2513, U-3008.

2. Адаптация эффективных технических решений, реализованных на подводных лодках XXI серии в отечественном кораблестроении

Развитие отечественного подводного кораблестроения было важным приоритетом для руководства СССР. В конце войны советские конструкторы подводных лодок и исследователи сконцентрировали свои усилия на увеличении подводной скрытности, которая рассматривалась как решающий фактор в военно-морском деле. Для достижения большой скрытности на длинных дистанциях были приняты следующие решения:

1. Увеличение мощности гребных электродвигателей и емкости аккумуляторных батарей.
2. Обеспечение работы дизеля под водой.
3. Использование турбинных установок для операций под водой (подводного хода) [4].

Прототипами для этих проектов являлись, главным образом, германские подводные лодки, обнаруженные на верфях Восточной Германии, занятой советским войсками и подводные лодки, полученные советским флотом по решению Потсдамской конференции [4].

Вместе с тем советские специалисты имели возможность сопоставить результаты испытаний 3-х современных британских подводных лодок «U» класса, которые были переданы Советскому Союзу в 1944 году. Развитие и достижения в области гидроакустики основывались также на изучении оборудования надводных кораблей, поставленных Советскому Союзу в годы войны.

Все эти материалы по подводным лодкам тщательно изучались как в исследовательских институтах, так и в бюро подводного проектирования ЦКБ-18. Первым послевоенным проектом ЦКБ-18 был проект 614, полная копия XXI серии. Проект не был завершён, поскольку

имел недостаточную надежность с советской точки зрения – один поход в ограниченном районе не оправдывал стоимость подводной лодки. Многие компоненты и конструкции германских подводных лодок были рассчитаны на малый ресурс, особенно трубопроводы высокого давления и аккумуляторные батареи с тонкими свинцовыми пластинами. В ходе проектирования ПЛ проекта 614 проводилось интенсивное изучение конструкций и проектных решений, использованных германскими инженерами. Это способствовало разработке большого количества подводных технологий в Советском Союзе, особенно новых типов сталей и методов сварки, которые позволили удвоить рабочую глубину подводных лодок военных времен; новых концепций управления кораблем; малошумных гребных винтов; амортизации механизмов с высоким уровнем вибрации; гидроакустики; акустических покрытий корпуса для снижения эффективности гидролокации противника и противорадарных материалов для защиты головок шнорхеля [5].

Особый интерес вызвало использование германским флотом во время войны резинового покрытия корпуса «Альберих» для снижения эффективности британских активных сонаров, именуемых «Асдиками» (ASDIC). Исследования в этом направлении в США после войны не были успешны, так как показали большие трудности в креплении покрытий к корпусу лодки. В 1950-х годах Советский Союз испытал противолокационные и антишумовые покрытия, как у ПЛ XXI серии, на ПЛ класса «Малютка». Это были многоцелевые покрытия, так как они должны были гасить и внутренние, порождаемые механизмами лодки, шумы. При двухкорпусной архитектуре это было удобно, поскольку антишумовые покрытия можно было располагать в межбортовом пространстве [5].

Большое количество проектных решений ПЛ XXI серии было использовано ЦКБ-18 в 613 проекте ПЛ (Рис. 2).



Рис. 2. Подводная лодка 613 проекта.

Этот проект начинался в 1942 году под номером 608, однако, был отвергнут командованием ВМФ, поскольку его водоизмещение на 50 тонн превышало указанное в задании. Переделка проекта 608 в проект 613 была начата в 1946 году под руководством капитана 1 ранга В.Н. Перегудова (Рис. 3), который использовал

проектные решения, разработанные в результате изучения материалов по подводным лодкам XXI серии.



Рис. 3. В.Н. Перегудов

Корпус и ограждение рубки ПЛ проекта 613 были обтекаемой формы, а корма имела форму «ножа» с большими рулями, расположенными в корму от гребных винтов. Гребные валы проходили через горизонтальные стабилизаторы. Кормовые горизонтальные рули располагались кормовее гребных винтов. «Ножевая» корма обеспечивала ПЛ возможность большой маневренности [4].

Небольшая боевая рубка располагалась в ограждении рубки ПЛ проекта 613; перископы и выдвижные устройства располагались непосредственно в ограждении рубки. Движение в надводном положении обеспечивалось двумя дизелями общей мощностью 4.000 л.с.; подводный ход обеспечивался двумя гребными электромоторами общей мощностью 2.700 л.с. плюс два маленьких электромотора по 100 л.с. для малошумного хода. Эта особенность, взятая от германских электромоторов «подкрадывания», была первой германской особенностью, использованной в проектировании советских подводных лодок. Были установлены две большие группы аккумуляторных батарей, каждая по 112 элементов. Позднее был установлен шнорхель для обеспечения работы дизеля под водой. Эта энергетическая система обеспечивала ПЛ 613 проекта 18,25 узла надводного и 13 узлов подводного хода [4].

Боевые возможности ПЛ 613 проекта обеспечивались шестью торпедными аппаратами (четыре в носу и два в корме) и шестью запасными торпедами в носовом отсеке – всего 12-ю торпедами. Это торпедное вооружение было меньшим по сравнению с вооружением ПЛ США и ПЛ XXI серии, но сравнимо с 5-ю торпедными аппаратами и 15-ю торпедами на германских ПЛ VIIIС серии. Торпедные аппараты были снабжены системой пневматической безпузырной стрельбы на глубинах от поверхности до 30 м; в последующим глубина стрельбы возросла до 70 м. В отличие от других государств, только в СССР строились специальные подводные лодки для постановки мин. Начиная с ПЛ 613 проекта советские

подводные лодки также могли ставить мины через торпедные аппараты. Для постановки 20-ти мин ПЛ могла использовать два торпедных аппарата [5].

Ранние проекты 608 и 613 имели спаренную 76-мм орудийную установку для противодействия надводным кораблям. Предполагая в дальнейшем наличие боевых контактов в основном в подводном положении, артиллерийское вооружение было уменьшено до 57-мм спаренной орудийной установки на носовом барбете ограждения рубки для противовоздушной обороны (орудия просуществовали на советских подводных лодках до 1956 года) [5].

С использованием полностью сварного прочного корпуса, с применением стального сплава СХЛ-4 ПЛ 613 проекта имела испытательную глубину погружения 200 м, а рабочую глубину – 170 м. Это было больше, чем испытательная глубина на подводных лодках XXI серии. Достижение больших оперативных глубин при ограничении водоизмещения вынуждало проектантов сокращать условия обитаемости экипажа как на ПЛ 613 проекта, так и на всех последующих дизель-электрических подводных лодках [5].

Проект 613 продемонстрировал новый уровень в характеристиках советских подводных лодок; он реализовал многие проектные решения германских подводных лодок, которые обнаружили затем и в последующих проектах. Рабочий проект ЦКБ-18 был одобрен руководством ВМФ в 1948 году [5].

В результате серийного строительства ПЛ проекта 613 для советского ВМФ до 1958 года было построено 215 подводных лодок (то есть с интенсивностью более чем 2 ¹/₂ ПЛ в месяц). Где именно и сколько ПЛ было построено приведено далее (Таблица 1).

Таблица 1
Результаты серийного строительства ПЛ проекта 613

№ п/п	Завод-строитель	Построено ПЛ пр.613	Вступили в строй
1.	Красное Сормово	113	1951–1956
2.	г. Николаев	72	1952–1957
3.	Балтийский завод	19	1953–1958
4.	Ленинский комсомол	11	1954–1957

Это была самая большая программа строительства подводных лодок в советской

истории, превосходя по тоннажу все другие кораблестроительные программы советского периода. Проект 613 был самой большой программой постройки подводных лодок. Всего планировалось построить 340 ПЛ этого проекта.

В 1954 году документация по проекту 613 была передана Китаю, три дополнительные ПЛ были построены в СССР и отправлены на Шанхайскую верфь для окончательной сборки. Китай затем построил 15 подводных лодок данного типа на внутренней судовой верфи «Вухан» на реке Янцзы, используя преимущественно советскую листовую сталь, акустику, оружие и другое оборудование. Советские подводные лодки проекта 613 были переданы также Болгарии (2 ПЛ), Египту (8 ПЛ), Индонезии (14 ПЛ), Северной Корее (4 ПЛ); Кубе и Сирии, каждой по одной ПЛ, в качестве стационарных платформ для снабжения энергией других подводных лодок. Советский Союз передал две подводные лодки Албании в 1960 году и две ПЛ были захвачены в порту албанским правительством, когда отношения с СССР были прерваны по идеологическим соображениям в 1961 году [6].

Подводные лодки 613 проекта создали базу для первых советских крейсерских подводных лодок и использовались для различных специальных и исследовательских задач.

Заключение

Анализ адаптация эффективных технических решений германской подводной лодки XXI серии в отечественных проектах позволяет сделать следующие выводы: во-первых, в Советском Союзе в конце Великой Отечественной войны активно велась работа по созданию подводных лодок нового типа с учетом боевого опыта приобретенного в ходе войны. Во-вторых, в СССР была создана современная научно-производственная база, позволяющая применить отдельные передовые зарубежные технические решения в интересах отечественного подводного кораблестроения. В-третьих, подводные лодки 613 проекта не только усилили ВМФ СССР, но и позволили нашей стране значительно утвердиться на мировом рынке экспорта продукции военно-морского назначения.

Литература

1. Федулов С.В. Военно-морское техническое сотрудничество СССР со странами Запада накануне и в ходе Великой Отечественной войны. СПб. Свое издательство. 2015. С. 137–140.
2. Федулов С.В. Предоставить советской промышленности в кратчайшие сроки с минимальными затратами богатый экспериментальный материал. Результаты научно-исследовательских работ военно-морской и авиационной направленности в Германии и использование их странами — союзницами по антигитлеровской коалиции. Военно-исторический журнал. № 7. 2016. С. 36–40.
3. Барбанель Б., Федулов С. Использование опыта германских специалистов в области подводного кораблестроения в интересах ВМФ СССР (1945–1951)». Морские интеллектуальные технологии. №4 (38). Т.3. 2017. С.13.
4. Норман Полмар, Кеннет Дж. Мур. Подводные лодки холодной войны. Проектирование и строительство американских и советских подводных лодок. Пер. с англ. Б.Ф. Дронов. СПб. Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». 2011. 470 с.

5. *Алешин О.В., Барбанель Б.А., Конеев А.Н., Федулов С.В.* Деятельность Конструкторского бюро Военно-морских сил СССР в Берлине (1945–1947). СПб. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. 160 с.
6. *Балабин В.В.* Отечественные подводные лодки на службе иностранных флотов. М. Наука. 2010. 127 с.

References

1. *Fedulov S.V.* Voenno-morskoye tekhnicheskoye sotrudnichestvo SSSR so stranami Zapada nakanune i v khode Velikoy Otechestvennoy voyny. [Naval technical cooperation of the USSR with Western countries on the eve and during the Great Patriotic War]. Saint-Petersburg. «Its publishing house». 2015. P. 137–140. (in Russian).
2. *Fedulov S.V.* Predostavit' sovetsoj promyshlennosti v krachajshie sroki s minimal'nymi zatratami bogatjy ehksperimental'nyj material. Rezul'taty nauchno-issledovatel'skih rabot voenno-morskoj i aviacionnoj napravlennosti v Germanii i ispol'zovanie ih stranami — soyuznicami po antigitlerovskoj koalicii. [To provide Soviet industry in the shortest time with minimum cost a rich experimental material. The results of scientific research of naval and aviation industry in Germany and use their allies on anti-Hitler coalition.] Military history journal. No. 7. 2016. Pp. 36–40. (in Russian).
3. *Barbanel' B.A., Fedulov S.V.* Ispol'zovaniye opyta germanskikh spetsialistov v oblasti podvodnogo korablestroyeniya v interesakh VMF SSSR (1945–1951). [The use of the experience of German specialists in the field of submarine shipbuilding for the benefit of the USSR navy (1945-1951)]. Journal of Marine Intelligent Technologies. No. 4 (38). V.3. 2017. P.13. (in Russian).
4. *Norman Polmar, Kennet Dzh. Mur.* Submarines of the cold war. Design and construction of U.S. and Soviet submarines. English translation by B. F. Dronov. Saint-Petersburg. Publisher of the St. Petersburg naval Bureau of machine building «Malachite». 2011. 470 p.
5. *Aleshin O.V., Barbanel' B.A., Koneev A.N., Fedulov S.V.* The activities of the Design Bureau of naval forces of the USSR in Berlin (1945-1947). [Deyatel'nost' Konstruktorskogo byuro Voenno-morskih sil SSSR v Berline (1945–1947)] Saint-Petersburg. ETU Publishing. 2017. 160 p. (in Russian).
6. *Balabin V.V.* Otechestvennyye podvodnyye lodki na sluzhbe inostrannykh flotov. [Domestic submarines in the service of foreign fleets]. Moscow. Publishing house «Science». 2010. 127 p. (in Russian).

УДК 629.12.001.2

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ФЛОТА РОССИИ

Сергей Сергеевич Беликов

адъюнкт кафедры военного кораблестроения Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «ВМА»
190195, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Кадетский бульвар, д.1
E-mail: kafedra_vks@mail.ru

Дмитрий Валерьевич Горбунов

старший преподаватель кафедры военного кораблестроения
Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «ВМА» 190195, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Кадетский
бульвар, д.1
E-mail: 111gdv111@mail.ru

Аннотация

В работе рассматриваются основные тенденции развития вспомогательного флота, основываясь на создании, модернизации и боевого применения корабельного состава флота в современных условиях. Рассматриваются основные потребности в обеспечении корабельных ударных групп необходимыми материальными средствами в различных условиях базирования. Предлагается в качестве основы для разработки математической модели, позволяющей давать обоснованные и просчитанные рекомендации по формированию программы строительства вспомогательного флота, использовать критерии эффективности функционирования транспортных судов. Показывается необходимость определения объема грузоперевозок, осуществляемого морскими путями в интересах Военно-Морского Флота, с учетом перспектив на модернизацию и строительства флота на дальнюю перспективу. И как следствие, необходимость правильного подбора качественного и количественного состава вспомогательного флота, способного в определенный период времени выполнить задачи по обеспечению снабжения флота необходимыми ресурсами в различных условиях. Для определения экономической эффективности транспортных судов предложено использовать показатель плановой стоимости передачи (обработки) одной тонны груза. Сформулированы основные направления развития вспомогательного флота.

Ключевые слова: вспомогательный флот, провозная способность, объем морских грузоперевозок, экономическая эффективность транспортных судов.

PERSPECTIVE DEVELOPMENT DIRECTIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION'S AUXILIARY FLEET

Sergej S. Belikov

Adjunct of naval construction Naval Polytechnic Institute VUNTZ Navy «BMA»
Cadet Boulevard, D. 1, 190195, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation
E-mail: kafedra_vks@mail.ru

Dmitrij V. Gorbunov

Senior Lecturer of naval construction Naval Polytechnic Institute VUNTZ Navy «BMA»
Cadet Boulevard, D. 1, 190195, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation
E-mail: 111gdv111@mail.ru

Abstract

In this work, the main development trends of auxiliary fleet are considered, based on creation, modernization and combat employment of the Russian Navy ships in modern conditions. It also review basic needs of surface action groups in required material resources in different conditions. Besides this work proposes to use performance criteria of transport vessels functioning as a basis for developing a mathematical model, which will give reasonable and calculated recommendations for the program formation of auxiliary fleet. It shows the need to determine the volume of sea freight, which is carried out by sea in the interests of the Russian Navy with considering of prospects for modernization and construction of the fleet. And as a consequence, it is necessary to correctly choose the qualitative and quantitative auxiliary fleet composition, that is capable to accomplish the tasks of providing the fleet with required resources in different conditions. It is also proposed to use indicators of the planned cost of transfer one ton of cargo for determination of the transport vessels economic efficiency. At last in this work formulated the main development directions of auxiliary fleet.

Key words: auxiliary fleet, carrying capacity, volume of sea freight, economic efficiency of transport vessels.

Перспективные направления развития вспомогательного флота России

Военная сила была и остается одним из инструментов, используемых для достижения геополитических целей во взаимоотношениях государств. Основным предназначением военно-морских сил остается защита государств путем ведения вооруженной борьбы на море. Характер ведения боевых действий, спасательных операций и выполнения различных гуманитарных миссий в современных условиях требует высокой мобильности со стороны сил флота и авиации, что в свою очередь сопровождается повышенным расходом имеющихся ресурсов (топлива, продовольствия, боеприпасов и т.п.).

В условиях высокоманевренной войны вспомогательный флот наиболее подвижная часть сил и средств тыла флота на море, от правильного использования которой во многом зависит полнота и своевременность выполнения всех задач обеспечения, как в мирное, так и военное время. Суда вспомогательного флота ВМФ являются основным элементом при пополнении запасов, восстановлении технической готовности боевых кораблей, погрузке (выгрузке) и доставке различных видов боеприпасов, вооружения и военной техники в море и пунктах маневренного (временного) базирования (рассредоточения).

Современные тенденции развития флота, выраженные в переходе на использование при постройке кораблей и подводных лодок все более новых образцов оружия и технических средств различного назначения, предполагают увеличение количества затрачиваемых на это материальных средств. Количественный состав флота расширяется, увеличиваются и боевые возможности путем смещения акцентов развития от наращивания ударной мощи к более широкому использованию информационных систем боевого управления и целеуказания. Это приводит к необходимости унификации систем и средств, которая выражается в использовании модульных конструкций и систем двойного назначения, увеличению количества средств автоматизации.

Решая задачи мирного времени во всех точках мирового океана, возникает необходимость продления автономности корабля, пополнения запасов, оказания, по необходимости, медицинской помощи, а в военное время восполнения израсходованного боезапаса, и в случае получения боевых и аварийных повреждений, восстановления технической готовности.

Таким образом, исходя из этих первоначальных задач, сохраняется необходимость содержания плавучего тыла, и поиска способов получения экономического эффекта от объектов плавучего тыла в мирное время.

Плавучим тылом называется постоянное или временное формирование военных кораблей и судов обеспечения, а также – их штабов и органов управления, которое предназначено для

материально-технического снабжения действующих соединений ВМФ в море, в районах необорудованного побережья, в пунктах маневренного базирования. [1]

В качестве судов плавучего тыла могут выступать корабли комплексного снабжения, морские транспорты вооружения, плавучие технические базы, плавучие судоремонтные мастерские, ледоколы, плавучие доки, буксиры, причалы, электростанции и др. [2]

Корабельный состав судов вспомогательного флота, используемых в данный момент разнообразен, как и широк спектр решаемых ими задач. При значительных по объему и разнообразных по номенклатуре потребностях кораблей, требуется одновременное использование нескольких классов и подклассов судов для восполнения израсходованных запасов или восстановления технической готовности. Ограниченные возможности государства по содержанию в мирное время количества судов, требуемого для обеспечения нужд флота в военное время, указывает на необходимость повышения универсальности судов обеспечения. Что является предпосылкой к переходу не только к новым способам и методам снабжения, но и к формированию нового облика судов обеспечения вспомогательного флота.

Использование универсальных судов позволит реализовать комплексное обеспечение кораблей несколькими видами материальных средств, однако, при проведении межбазовых перевозок (завоза зимовочных запасов) более предпочтительным вариантом остается использование специализированных судов (рефрижераторные, контейнерные, навалочные, лесовозы и др.), т.к. перевозка одного или двух видов груза позволяет более полно использовать водоизмещение судна.

Обеспечение корабельных соединений необходимыми материальными средствами, восстановления технической готовности и пополнения боезапаса в пунктах маневренного (временного) базирования (рассредоточения) обуславливается необходимостью использования для этих целей, с опорой на систему берегового базирования, мобильного плавучего тыла, способных самостоятельно производить смену дислокаций и оперативно приступать к выполнению поставленных задач, не требуя для этого буксировки [3].

Требования, предъявляемые к увеличению мореходности и дальности плавания судов, используемых для доставки и подачи запасов, обуславливаются использованием кораблей и подводных лодок в удаленных от пунктов постоянного базирования районах. Недостаточная скорость и маневренность судов снабжения по отношению кораблям снижает боевые возможности соединения при одновременном использовании корабельных соединений и вспомогательного флота. Таким образом возникает необходимость повышения

скорости экономического хода судов до эскадренной [2].

При ведении боевых операций, снабжение корабельных соединений производится преимущественно в ночное время у необорудованного побережья, следовательно, возникает необходимость обеспечения достаточного уровня автоматизации для обеспечения передачи грузов при волнении моря до 5 баллов [3]. При проведении десантных операций возникает необходимость доставки необходимых материальных и технических средств с судов на берег, что влечет за собой необходимость использования для этих целей самоходных выгрузочных средств, а также вертолетов для доставки наиболее важных и сравнительно небольших по габаритам грузов и передачи людей.

При рассмотрении вопроса использования судов вспомогательного флота в экономическом секторе, следует обратить внимание на активное освоение Арктики и соответственно появление потребности в создании новых и совершенствовании судов ледового класса, способных обеспечивать как проводку кораблей и судов в северных широтах, так и обеспечение добычи полезных ископаемых в этой зоне экономической деятельности.

Решение задачи полноценного обеспечения кораблей и подводных лодок всем необходимым для выполнения поставленных задач не может ограничиваться только техническими решениями и совершенствованием корабельного состава. Важным вопросом в обеспечении бесперебойного снабжения флота является вопрос организации и планирования деятельности вспомогательного флота, а также просчитанного и обоснованного пополнения количественного и качественного состава с учетом программы строительства ВМФ на долгосрочную перспективу. Для решения данной задачи целесообразно использовать опыт гражданского судостроения.

Гражданское судостроение и транспортные компании, специализирующиеся на перевозке грузов морем в первую очередь нацелены на получение дохода. Соотношение прибыли и вложенных, для получения этого дохода, материальных средств, напрямую зависит от рационального использования судов и их количества. Для ВМФ данный опыт будет выражаться не в получении прибыли, но в получении экономического эффекта.

Экономические критерии эффективности являются комбинацией четырех основных показателей — эффекта (продукции), капиталовложений, дохода и текущих затрат [4].

Решение не только задачи рационального использования уже имеющихся судов, но и задачи его пополнения в процессе эксплуатации будет являться выполнением ряда условий:

$$\begin{cases} \frac{Q_{\text{пров}}}{Q_{\text{потр}}} \geq 1 \\ S_{\text{расх}} < S_{\text{дох}} \\ S_{\text{расх}} \rightarrow \min \end{cases}, \quad (1)$$

$Q_{\text{пров}}$ – провозная способность транспортных судов, тонны/год;

$Q_{\text{потр}}$ – необходимый объем грузоперевозок, тонны/год;

$S_{\text{расх}}$ – сумма расходов за отчетный период, рубли/год;

$S_{\text{дох}}$ – сумма доходов за отчетный период, рубли/год.

Однако возникает проблема с определением показателя суммы доходов за отчетный период, так как учет прямого положительного экономического эффекта при использовании по прямому назначению судов вспомогательного флота невозможен. Определить его можно только косвенно [5].

Таким образом, имеет смысл ввести косвенный показатель, значение которого будет определять эффективность использования судна определенного класса в зависимости от вложенных в его создание, эксплуатацию и утилизацию средств. Примером может служить показатель плановой стоимости передачи (обработки) одной тонны груза, которая будет представлять собой отношение провозной способности конкретного судна и период его эксплуатации к вложенным в его создание, использование и утилизацию денежных средств.

Данное выражение будет иметь следующий вид:

$$C_{i \text{ план}} = \frac{Q_{i \text{ пров}} * T_{i \text{ экспл}}}{S_{i \text{ расх}}^{\text{план}}} \quad (2)$$

$Q_{i \text{ пров}}$ – провозная способность i -го судна, тонны/год;

$T_{i \text{ экспл}}$ – период эксплуатации i -го судна, год;

$S_{i \text{ расх}}^{\text{план}}$ – сумма плановых расходов i -го судна за весь жизненный цикл, руб.

Данный показатель позволит оценить экономическую эффективность использования судна за весь период эксплуатации, но с увеличением срока службы распределение величин эксплуатационных расходов и количества перевезенного груза для транспортных судов будет изменяться, следовательно, определить экономическую эффективность в конкретный промежуток времени представляется затруднительным. Таким образом, расчетные значения экономических показателей не будут совпадать с фактическими, получаемые в процессе эксплуатации судна, что требует более детального рассмотрения для каждого конкретного судна [6].

При определении оптимального качественного и количественного состава вспомогательного флота в качестве критериев эффективности

судов могут использоваться как экономические, так и внеэкономические критерии. В части касающейся грузоперевозок в военных целях может использоваться соотношение потребного объема грузоперевозок, осуществляемого судами вспомогательного флота, необходимого для решения задач, стоящим перед ВМФ, и провозной способности судов вспомогательного флота. Потребный объем морских грузоперевозок с учетом перспектив развития и модернизации флота позволит производить обоснованный подбор судов вспомогательного флота для выполнения конкретного объема грузоперевозок на этапе планирования кораблестроительной программы вспомогательного флота.

Определение показателей провозной способности позволит производить оценку эффективности использования судна конкретного проекта в конкретный промежуток времени, так как провозная способность является потенциальной производительной мощностью судна снабжения.

Таким образом, решение задачи оценки эффективности использования судов вспомогательного флота и обоснование его корабельного состава не представляется возможным без определения данных показателей, так как провозная способность является потенциалом судна снабжения, реализация которого возможна только при знании реальных потребностей в объемах грузоперевозок, осуществляемых морем и правильным подбором судового состава для решения конкретных задач еще на этапе планирования.

В качестве вывода можно выделить следующие направления развития вспомогательного флота:

1) Повышения универсальности судов обеспечения, создание судов комплексного снабжения, способных обеспечивать решения задач флота в удаленных районах мирового океана;

2) Создание и совершенствование судов, обеспечивающих поддержание заданной степени боевой готовности сил флота в пунктах базирования;

3) Развитие системы берегового базирования, маневренного (временного) базирования (рассредоточения), повышение эффективности работы ремонтно-технической базы флота;

4) Повышение уровня автоматизации при проведении грузовых операций;

5) Увеличение потребности в создании новых и совершенствовании судов ледового класса, способных обеспечивать как проводку кораблей и судов в северных широтах, так и обеспечение добычи полезных ископаемых в этой зоне экономической деятельности.

6) Повышение роли повседневного планирования использования судов снабжения при решении задач, стоящих перед ВМФ;

7) Формирование кораблестроительной программы вспомогательного флота с учетом перспектив развития ВМФ и соответственно формирование на основании потребных объемов морских грузоперевозок качественного и количественного корабельного состава вспомогательного флота, потенциальная грузовая производительность которых будет позволять решать задачи, стоящие перед ВМФ.

Литература

1. Военный энциклопедический словарь. — Москва: Большая Российская Энциклопедия, Рипол Классик, 2001. — Т. 2. — С. 310. — ISBN 5-7905-0996-7.
2. Военная энциклопедия. — Москва: Военное издательство, 2002. Т. 6. — С. 399. — ISBN 5-203-01873-1.
3. Смоляков А.А., Горев Ю.Н. и др. Корабль и море. Этапы эволюции : Санкт – Петербург, 2005. – 669 с.
4. Брехов А.Г., Замша И.Д., Гайдукевич Г.В., Иванов С.В. Вспомогательный флот ВМФ России [Текст] : Санкт-Петербург : ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2016. – 167 с.
5. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов [Текст]. В 2 т. Т. 2. Анализ и синтез системы Корабль/ Гайкович А.И. – Санкт-Петербург : Моринтех, 2014. – 872 с. – ISBN 978-5-93887-056-7.
6. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении [Текст] : Санкт-Петербург : Судостроение, 2014. – 264 с. – ISBN 5-7355-0599-8.
7. Пашин В.М., Поляков Ю.Н. Вероятностная оценка экономической эффективности судов [Текст] : Ленинград : Судостроение, 1976. – 82 с.

References

1. Voennyj jenciklopedicheski slovar'. — Moskva: Bol'shaja Rossijskaja Jenciklopedija, Ripol Klassik, 2001. Т. 2. — S. 310. — ISBN 5-7905-0996-7.
2. Voennaja jenciklopedija. — Moskva: Voennoe izdatel'stvo, 2002. — Т. 6. — S. 399. — ISBN 5-203-01873-1.
3. Smoljakov A.A., Gorev Ju.N. i dr. Korabl' i more. Jetapy jevoljucii : Sankt – Peterburg, 2005. – 669 s.
4. Brehov A.G., Zamsha I.D., Gajdukevich G.V., Ivanov S.V. Vspomogatel'nyj flot VMF Rossii [Tekst] : Sankt-Peterburg : VUNC VMF «VMA», 2016. – 167 s.
5. Gajkovich A.I. Teorija proektirovanija vodoizmeshhajushhih korablej i sudov [Tekst]. V 2 t. T. 2. Analiz i sintez sistemy Korabl'/ Gajkovich A.I. – Sankt-Peterburg : Morinteh, 2014. – 872 s. – ISBN 978-5-93887-056-7.
6. Zaharov I.G. Konceptual'nyj analiz v voennom korablestroenii [Tekst] : Sankt-Peterburg : Sudostroenie, 2014. – 264 s. – ISBN 5-7355-0599-8.
7. Pashin V.M., Poljakov Ju.N. Verojatnostnaja ocenka jekonomicheskoj jeffektivnosti sudov [Tekst] : Leningrad : Sudostroenie, 1976. – 82 s

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.178:539.4

КРИТЕРИЙ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**Геннадий Брониславович Крыжевич**

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

Алексей Анатольевич Петров

соискатель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: Alpetrov.ru@gmail.com

Аннотация

Объектом исследований являются сварные конструкции морской техники, эксплуатируемые при обычных и низких (-40°C и ниже) температурах. Новые международные и отечественные стандарты, регламентирующие вопросы прочности и надежности арктических нефтегазовых сооружений, требуют для обоснования необходимых запасов прочности выполнения расчетов предельной прочности конструкций с учетом возможного низкотемпературного снижения пластичности и трещиностойкости материалов и сварных соединений. Для реализации этих требований необходимо предварительное решение принципиальных методических вопросов анализа особенностей разрушения конструкций в зонах концентрации напряжений при наступлении в них предельного равновесия. Наибольшее снижение пластичности, вызванное трехмерностью напряженного состояния, обычно наблюдается в узлах конструкций, в связи с чем возникает потребность в использовании для анализа этого состояния метода конечных элементов и в формулировке соответствующего ему критерия появления трещиноподобных дефектов с учетом современных достижений в области механики разрушения. Поэтому целью работы является разработка достоверного критерия вязкого разрушения, пригодного для прямого конечно-элементного расчета конструкций на статическую прочность с учетом реально достигаемых показателей трещиностойкости и пластичности основного материала и сварных соединений.

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- разработан новый интегральный критерий вязкого разрушения, предназначенный для оценки предельной прочности конструкций;
- путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных показано, что использование этого критерия взамен традиционных обеспечивает существенное повышение точности расчетов предельной прочности конструкций.

На основе разработанного нового критерия вязкого разрушения конструкций создан новый подход к расчету предельной прочности морской техники, являющийся важным элементом системы обеспечения безотказности, эксплуатационной безопасности и технологии создания конструкций арктических судов и океанотехники.

Ключевые слова: механика разрушения, предельная прочность конструкций, критерии прочности, прочность низкотемпературная.

DUCTILE FAILURE CRITERION FOR MARINE ENGINEERING STRUCTURES**Gennady B. Kryzhevich**

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

Aleksey A. Petrov

the Ph.D. candidate of department of ship construction and technical operation
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: Alpetrov.ru@gmail.com

Abstract

Welded marine engineering structures operating under ordinary and low (-40°C and lower) temperatures are studied. To justify required safety margins, new international and home standards regulating strength and reliability issues for Arctic oil-and-gas structures require structural ultimate strength analysis with account of possible low-temperature plasticity and fracture strength decrease of materials and welded connections. To realize these requirements, preliminary solution of fundamental methodical issues of analysis of structural failure in the stress concentration areas under the limit equilibrium is required. The maximum plasticity decrease caused by stressed state three-dimensionality is normally observed in structural details; in this connection there is a necessity of using the finite-element method to analyze this state and formulating a corresponding criterion of occurring crack-like defects with account of state-of-art achievements in the fracture mechanics. Therefore, the paper objective consists in development of reliable ductile failure criteria suitable for direct finite element analysis of welded structures for static strength with account of actually reached material plasticity and fatigue strength indexes for the base metal and welded connections.

The following results have been obtained based on the performed studies:

- a new integral ductile failure criterion has been developed for evaluation of ultimate structural strength;
- by comparison of calculated and experimental data it has been demonstrated that use of this criterion instead of conventional ones provides considerable accuracy increase for structural ultimate strength analysis.

Based on the developed new ductile failure criterion, a new approach to marine engineering strength analysis has been created that is an important element of the reliability system, operating safety and the technology for structures of Arctic vessels and ocean engineering structures.

Key words: fracture mechanics, structural ultimate strength, strength criteria, low-temperature strength.

Введение

Действующие нормативные требования, используемые при сертификации конструкций судов и арктических нефтегазодобывающих платформ, сформулированы в правилах классификационных обществ [1-4]. Они сводятся к проверке и регламентации свойств материалов и сварных соединений при низких температурах. При формулировке требований к этим свойствам учитывается важная особенность сталей — наличие существенного неблагоприятного изменения их механических свойств (вязко-хрупкого перехода) при пониженных температурах, выражающегося в снижении трещиностойкости сталей и возрастании вероятности хрупких разрушений конструкций. Главные факторы, способствующие хрупкому разрушению — низкая температура и высокая жесткость напряженно-деформированного состояния, вызванная концентраторами напряжений и дефектами, приобретаемыми при изготовлении и эксплуатации конструкций. Вместе с тем практика создания арктических судов и морских добычных платформ показывает, что существующие нормативные требования к трещиностойкости сварных соединений конструкций из толстолистовых материалов в ряде случаев не удается выполнить из-за вызываемого ими чрезмерного удорожания строительства объектов [5-7]. При формальном подходе игнорирование установленных требований ведет к запрету их эксплуатации при низких температурах, либо к необходимости использования при строительстве арктических сооружений очень дорогостоящих материалов (как основных, так и сварочных) и технологий. Однако в определенных условиях конструкции могут обладать достаточными реальными

запасами прочности при низких температурах даже при использовании материалов с относительно низкой трещиностойкостью (формально не удовлетворяющих требованиям правил Российского морского регистра судоходства) и относительно простых технологий строительства. Для оценки этих запасов крайне необходима разработка новых научно обоснованных методов расчета низкотемпературной прочности.

Возможен и принципиально иной подход к обеспечению низкотемпературной прочности. Для повышения экономической эффективности объектов и достоверности результатов анализа прочности арктических конструкций отечественные и международные стандарты [8-10] не устанавливают столь жесткие требования к трещиностойкости материалов и сварных соединений, но рекомендуют использование расчета предельного состояния конструкций, при котором в их наиболее напряженных зонах (в узлах) появляются условия для возникновения хрупких или вязких разрушений. К сожалению, при этом не формулируются конкретные рекомендации по выполнению такого расчета. Поэтому для реализации такого расчета предельного состояния при наличии низких температур и концентраторов напряжений также необходимо предварительное решение методических вопросов, связанных с разработкой критерия разрушения, ориентированного на использование метода конечных элементов (МКЭ). Основные подходы к такому решению описаны в работах [11, 12], в которых изложены вопросы обеспечения статической прочности (хладостойкости) и усталостной долговечности сварных конструкций на основе использования прямого численного расчета сварных конструкций. правильная формулировка

критериев разрушения При использовании МКЭ при расчете предельной прочности конструкций с учетом объемности напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений в значительной мере влияет на точность результатов расчета. Традиционные подходы к выбору критериев в виде допускаемых величин напряжений и предельных значений пластических деформаций не обеспечивают требуемой точности оценок прочности и не способствуют созданию рациональных конструкций с низкой стоимостью изготовления и малой материалоемкостью. Поэтому критерии разрушения обеспечивают не только достоверность расчетов, но и, в конечном итоге, создание рациональных конструкций для эксплуатации при низких температурах. Для достижения этой цели целесообразно проанализировать недостатки традиционных формулировок критериев разрушения, сформулировать более эффективные критериальные зависимости и сопоставить эффективность традиционных и новых критериев с учетом экспериментальных данных по разрушению образцов с концентраторами напряжений.

1. Критерий вязкого разрушения

В качестве критерия вязкого разрушения традиционно принято рассматривать соотношение между достигнутым уровнем интенсивности пластических деформаций e_{pi} и предельным значением интенсивности $e_p^{пред.}$ [13], представляющим собой критическую степень деформации, при которой происходит слияние пор и образование вязкой трещины. Данный деформационный критерий, основанный на физической модели пластического разрыхления, в простейшем виде выглядит как неравенство, выполняемое в точке с наибольшей интенсивностью пластических деформаций e_{pi} :

$$e_{pi} \geq e_p^{пред.} \tag{1}$$

Интенсивность пластических деформаций e_{pi} может быть определена как функция значений главных пластических деформаций e_{p1} , e_{p2} и e_{p3} в рассматриваемой точке (в элементе):

$$e_{pi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{p1} - e_{p2})^2 + (e_{p2} - e_{p3})^2 + (e_{p3} - e_{p1})^2} .$$

Известно, что важнейшим фактором, влияющим на пластическое деформирование материала, является интенсивность напряжений

$$\sigma_j = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} ,$$

где σ_j - главные напряжения ($j = 1, 2, 3$).

Среднее напряжение $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ не вызывает пластической деформации, а только упругое изменение объёма. Если $\sigma_j = 0$, то любой металл будет упругим и хрупким. Если максимальное главное напряжение $\sigma_1 < 0$, т.е. происходит сжатие, то микро- и макротрещины закрываются, увеличивая способность к пластическому деформированию металла. Если металл подвергается трёхосному растяжению, как это часто бывает у острых концентраторов напряжений в конструкциях, его пластические свойства резко снижаются. Учитывая эти обстоятельства, предельное значение интенсивности пластической деформации e_K определяется с учётом соотношения между интенсивностью напряжений σ_j и средним напряжением σ_0 [13]:

$$e_p^{пред.} = D_e e_{p1}^{пред.} , \tag{2}$$

где $D_e = K_e \sigma_j / (3\sigma_0)$; $e_{p1}^{пред.}$ - предельная пластическая деформация, найденная по результатам испытаний стандартных образцов цилиндрической формы при одноосном растяжении; K_e - коэффициент, учитывающий свойства материала (для малоуглеродистой стали $K_e = 1,0 - 1,2$).

Зависимость (1) подтверждена экспериментами с крупными образцами, содержащими относительно большие концентраторы напряжений различной формы и изготовленными из разных марок сталей [13].

Выполнение критерия разрушения (1) означает появление разрыва (трещины), наблюдаемое в реальной сварной конструкции в зоне концентрации напряжений. Этот критерий не даёт представления о том, как будет развиваться трещина. В зависимости от свойств материала, геометрии конструкции, условий нагружения, эта трещина может остановить своё движение непосредственно после появления, а может развиваться дальше, разделяя конструкцию на отдельные части. Но даже в случае высокой локальности надрыва произойдёт резкое снижение усталостной долговечности конструкции и надёжности, повысится вероятность нарушения герметичности. Такое состояние конструкции в большинстве случаев является нарушением режима нормальной эксплуатации.

При оценке достоверности и точности критерия разрушения типа (1) необходимо принимать во внимание два обстоятельства.

Во-первых, вязкое разрушение наступает после исчерпания пластического ресурса материала (после образования пор и субмикротрещин) и поэтому имеет некоторое сходство с хрупким разрушением. Оно начинается с малой, но конечной плоской области F , содержащей точку с максимальным

значением отношения интенсивности пластических деформаций e_{pi} к коэффициенту снижения предельной пластической деформации e_{pi}/D_e в данном концентраторе напряжений. Область F содержит также расположенную в этой точке бесконечно малую площадку с нормалью \bar{l} , на которой действует главное напряжение σ_1 . Для перехода материала в этой точке из вязкого состояния в хрупкое необходимо выполнение условия (1), которое можно записать в виде

$$e_{pi} / (D_e e_{pi}^{пред.}) \geq 1. \quad (1')$$

Во-вторых, как и в случае хрупкого повреждения, при вязком разрушении для перехода материала из вязкого состояния в хрупкое и начала процесса разрушения необходимо создание соответствующих условий не в точке, а в некоторой конечной области. Можно предположить [11, 15], что эти условия должны быть сформированы на площадке F , в которой развиваются наибольшие деформации. Другими словами, макроповреждение материала (макротрещина) формируется не на бесконечно малой площадке, а на некоторой конечной площадке при выполнении на значительной ее части условия (1'). Это означает, что левую часть неравенства (1') необходимо усреднять на площадке F . Эту площадку полезно ассоциировать с понятием структурного элемента, введенного в рассмотрение Г. Нейбером [14] и уточнявшимся в дальнейшем в работах В.В. Новожилова, Н.Ф. Морозова, Ю.В. Петрова и др. В современном понимании размер этого элемента является характеристикой материала (параметром его микронеоднородности) при определенном виде разрушения [15], которая определяется по формуле

$$d = 2K_{Ic}^2 / (\pi S_{отр.}^2),$$

где K_{Ic} - вязкость разрушения.

Обычно линейный размер d для углеродистых и низколегированных сталей лежит в диапазоне от 3 до 7 мм. В случаях разрушения пластин с концентраторами при их растяжении площадка F и ее размер d указаны в примерах, приведенных на рис. 1.

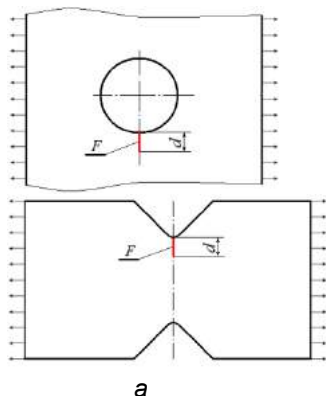


Рис. 1. Площадка F структурного элемента, включающая бесконечно малую площадку, на которой действует максимальное главное напряжение σ_1 в концентраторах напряжений у круглого отверстия (а) и у краевого выреза (б), расположенных в растягиваемых пластинах

С учетом этих обстоятельств интегральный деформационный критерий разрушения может быть записан так

$$\bar{e}_{pi} \geq 1, \quad (3)$$

где $\bar{e}_{pi} = \frac{1}{e_{pi}^{пред.} \cdot F} \int_F \frac{e_{pi}(x,y,z)}{D_e(x,y,z)} dF$ - характеристика

вязкого повреждения материала на конечной площадке F , содержащей точку с наибольшим значением отношения интенсивности пластической деформации к коэффициенту снижения предельной пластической деформации e_{pi}/D_e в данном концентраторе напряжений и расположенную в этой точке бесконечно малую главную площадку, на которой действует главное напряжение σ_1 .

Эта характеристика равна среднему значению исправленной (условно приведенной к одноосному напряженному состоянию) интенсивности пластической деформации на площадке F с площадью порядка d^2 , ориентированной перпендикулярно к главному напряжению σ_1 и содержащей точку с наибольшим значением отношения интенсивности деформации к коэффициенту снижения предельной пластической деформации e_{pi}/D_e (это отношение характеризует интенсивность образования пор и других дефектов структуры в рассматриваемой точке материала при заданном виде напряженного состояния или, другими словами, "разрыхление материала"). Строго говоря, равенство характеристики вязкого повреждения материала \bar{e}_{pi} единице свидетельствует лишь о полном переходе материала из вязкого состояния в хрупкое, т.е. о наличии необходимого условия для его дальнейшего хрупкого разрушения. Достаточным условием для разрушения является следующее неравенство

$$\bar{\sigma}_n \geq S_{отр.}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_n$ - осреднённое по площадке F нормальное напряжение в зоне концентрации; $S_{отр.}$ - напряжение нормального отрыва, являющееся характеристикой материала, оцениваемой по формуле [13]

$$S_{отр.} / \sigma_{\theta} = 1 + 1,4\psi_K,$$

где ψ_K - относительное сужение площади поперечного сечения стандартного образца при разрыве; σ_{θ} - предел прочности.

Однако в большинстве практически интересных случаев условия (3) и (4) выполняются одновременно (хотя бы приближенно).

Рекомендации по практической оценке коэффициента снижения предельной пластической деформации D_e с получением достоверного консервативного результата даны в работе [11].

2. Расчетно-экспериментальная проверка критерия вязкого разрушения

Для получения экспериментальных данных и последующего их сопоставления с расчетными данными были испытаны 12 гладких цилиндрических образцов из стали (ее условная маркировка 750W), предназначенной для создания изделий, эксплуатирующихся в арктических условиях. Образцы были изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84. Кроме того, испытаны 8 цилиндрических образцов из той же стали с концентратором (с надрезом в виде канавки с глубиной 1 мм и углом между ее берегами 60°), выполненным в соответствии с ГОСТ 25.502-79 (рис. 2). Образцы вырезались из листового проката толщиной 25 мм и 40 мм (по 10 штук для каждой из толщин), причем объекты испытаний, выполненные из листов одной толщины содержали 6 гладких образцов и 4 образца с надрезом. Одна половина от общего количества как гладких, так и нарезанных образцов была испытана на растяжение до разрушения при комнатной температуре (при 20 °С), а другая половина - при температуре -40°С (табл. 1).

При испытаниях гладких образцов определялись механические характеристики стали марки 750W согласно ГОСТ 1497-84.

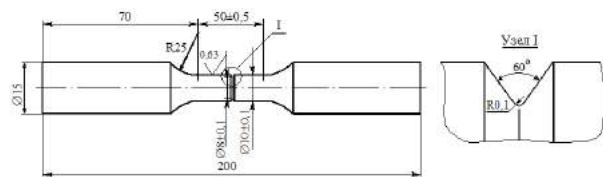


Рис. 2. Форма образцов с надрезом для испытаний на растяжение.

Опыты с образцами проводились в Крыловском государственном научном центре на испытательной универсальной сервогидравлической машине LFV-250-НН, зав. № 1794-1, (рис. 3) в соответствии с ГОСТ 1497-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение) и ГОСТ 11150-84 (Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах). В испытаниях принимали участие Н.Г. Попов и А.В. Паляк. Границы относительной погрешности воспроизведения испытательной нагрузки при доверительной вероятности 0,95 равны ± 0,5%. Для испытаний при пониженной температуре использована входящая в состав машины климатическая камера.

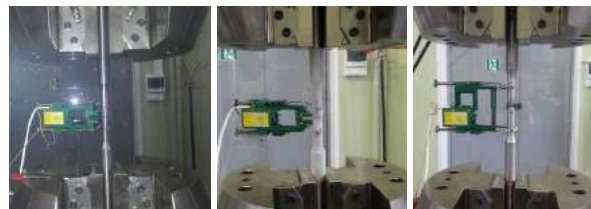


Рис. 3. Испытания образца с надрезом при комнатной температуре (а), при пониженной температуре (б) и вид образца в захватах испытательной машины после разрушения (в)

Результаты испытаний (табл. 1) показывают, что при понижении температуры на 60°С наблюдалось увеличение пределов прочности (~ на 3%) и текучести (~ на 4%). Увеличение толщины листов, из которых вырезались образцы, приводило к незначительному увеличению пределов прочности и текучести (ориентировочно на 1%). Вместе с тем при понижении температуры на 60°С наблюдалось несущественное увеличение нагрузок, разрушающих гладких образцы, и величин остаточных деформаций гладких образцов при их разрушении. При испытаниях образцов с концентраторами напряжений наблюдалась совсем другая тенденция: понижение температуры почти не влияло на нагрузки, разрушающие образцы, и существенно снижало величины остаточных деформаций (в среднем на 14% у образцов из тонких листов и на 74% у образцов из толстых листов).

Таблица 1
Влияние температуры, концентрации напряжений и толщины листов на прочность образцов из стали марки 750W

№	Толщина листа, тип образца и температур его испытания	Предел прочности, МПа / предел текучести, МПа	Деформация при разрушении, мм	Максимальная нагрузка, кН
1	25 мм, гладкий, +20°С	856/816	6,82	65,93
2		854/801	7,02	65,5
3		859/817	6,01	64,83
4	25 мм, гладкий, -40°С	879 /845	7,13	67,71
5		885 /849	7,06	68,09
6		885 /851	6,9	68,15
7	25 мм, с надрезом, +20°С	-	1,29	60,02
8		-	1,32	60,06
9	25 мм, с надрезом, -40°С	-	1,26	60,43
10		-	0,99	60,15
11	40 мм, гладкий, +20°С	869 /823	3,02	65,58
12		851 /811	5,41	64,48
13		877 /835	5,42	67,55

14	40 мм, гладкий, -40°C	898 /858	6,95	67,72
15		885 /849	7,15	68,10
16		894 /854	7,33	67,41
17	40 мм, с надрезом, +20°C	-	1,27	61,11
18		-	1,68	61,00
19	40 мм, с надрезом, -40°C	-	0,45	61,08
20		-	0,33	60,94

Малая зависимость максимальных нагрузок, наблюдавшихся при испытаниях образцов с надрезами, от температуры, свидетельствует о том, что температура вязко-хрупкого перехода [16] для тестируемого материала ниже, чем температура испытаний (-40°C).

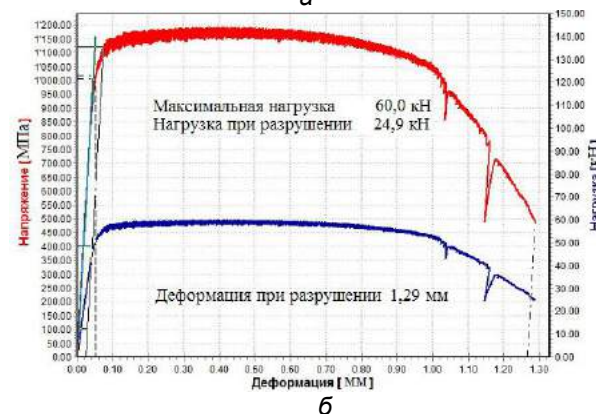
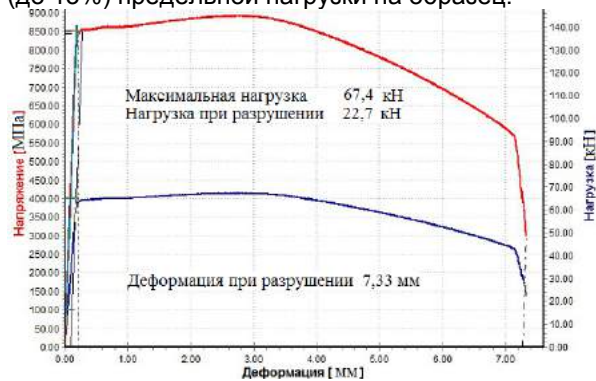
Особо следует подчеркнуть, что главное влияние на снижение величин остаточных деформаций образцов при низких температурах оказывают факторы концентрации напряжений и толщины листов, из которых изготавливались объекты испытаний. При фиксированной толщине листового материала величины остаточных деформаций образцов при низких температурах снижаются вследствие наличия концентратора в среднем 6,25 раза (при толщине 25 мм) и в 18 раз (при толщине 40 мм). В низкотемпературных условиях при фиксированном уровне концентрации напряжений увеличение толщины листов приводит к среднему снижению остаточных деформаций в 2,9 раза. Приведенные в табл. 1 цифры свидетельствуют также о взаимодействии в условиях низких температур этих двух факторов (концентрации напряжений и толщины материала), влияющих на остаточные деформации образцов.

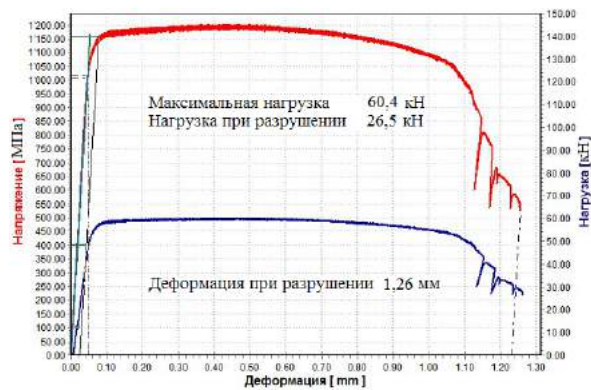
Форма и параметры диаграмм растяжения образцов существенно зависят от наличия надреза и температуры их испытаний (рис. 4). При наличии надзоров уменьшается остаточная деформация образцов после разрушения (особенно при испытаниях при низкой температуре), а также наблюдаются признаки динамического пластического деформирования (вибрации образцов при развитии зон пластичности). Средние значения нормальных напряжений в структурном элементе в момент разрушения испытанных образцов, как правило, отличались от напряжений отрыва не более чем на 12%.

Близкие результаты по величинам максимальных нагрузок, зарегистрированные при комнатной и низкой температурах на этих же образцах, говорят о том, что в процессе пластического деформирования образцов в зонах концентрации напряжений формируются примерно одинаковые ячейки предразрушения (структурные элементы), размеры которых заметно превышают размеры концентратора (порядка 1 мм). Это предположение подтверждают результаты расчетов, выполненных с помощью метода конечных

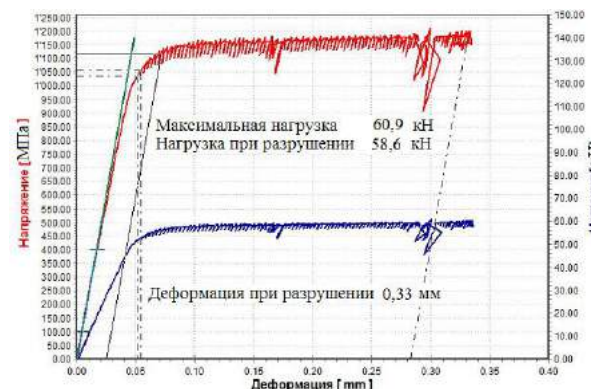
элементов в программном комплексе ANSYS. Конечно-элементная модель образца с надрезом в виде фигуры, представляющей собой 1/8 часть его геометрического образа, представлена на рис. 5. Вследствие симметрии образца относительно плоскости, проходящей перпендикулярно к его оси через вершину надреза перемещения вдоль оси образца в точках этой плоскости приняты равными нулю ($U_x = 0$). На взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось образца, нормальные перемещения также приняты равными нулю ($U_y = 0$ и $U_z = 0$). На плоскости, перпендикулярной к оси образца и отстоящей от вершины надреза на расстоянии 25 мм, перемещения вдоль оси образца приняты одинаковыми и не равными нулю ($U_x \neq 0$).

Расчеты показали, что рост пластических деформаций в вершине надреза (вплоть до предельных значений, соответствующих появлению трещины) происходит при напряжениях в образце вдаль от надреза, не превышающих предела текучести. В вершине надреза реализуется трехмерное напряженно-деформированное состояние с коэффициентом жесткости в момент разрушения, примерно равным 1,4. Несмотря на малые размеры надреза (глубина 1 мм) по сравнению со значением структурного параметра ($d = 3,2$ мм) его наличие приводит к значительному снижению (до 13%) предельной нагрузки на образец.





а



б

Рис. 4. Зависимости усилий (синие кривые) и напряжений в гладких частях образцов (красные кривые) от общей деформации образца: а – гладкий образец из листа толщиной 40 мм, температура -40°C; б – образец с надрезом из листа толщиной 25 мм, температура +20°C; в – образец с надрезом из листа толщиной 25 мм, температура -40°C; г – образец с надрезом из листа толщиной 40 мм, температура -40°C.

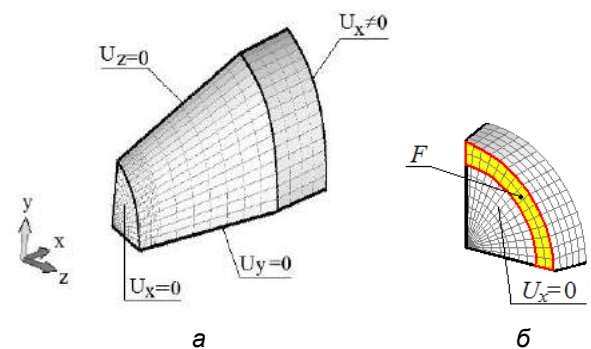


Рис. 5. Конечно-элементная модель образца с надрезом (а) и ее фрагмент (б) с выделенным

желтым цветом структурным элементом в плоскости, перпендикулярной к оси образца и проходящей через вершину надреза.



Рис. 6. Сопоставление результатов конечно-элементного расчета напряжений при разрыве образцов с надрезом σ_* , найденных при использовании интегрального критерия (3) (сплошная линия) и локального критерия (1) (штриховая линия), с экспериментальными данными (четыре точки).

Трехмерность напряженно-деформированного состояния в зоне концентратора приводит к относительно большому стеснению пластического деформирования. В результате этого наличие подобного острого концентратора напряжений в конструкции может привести к ее разрушению при общих (номинальных) напряжениях, не превышающих предела текучести. Сопоставление разрушающих экспериментальных и расчетных номинальных напряжений в образце (рис. 6), найденных на основе локального критерия вязкой прочности (1) и интегрального критерия (3), показывают, что использование интегрального критерия позволяет существенно увеличить точность вычисления предельных нагрузок. Таким образом, при формулировке критерия вязкого разрушения предпочтительной для описания предельно-равновесного состояния конструкций является интегральная форма зависимости между осредненными в пределах структурного элемента параметрами напряженно-деформированного состояния узлов конструкций и характеристиками их материалов. При этом целесообразно принимать во внимание величины, характеризующие особенности поведения материалов перед разрушением (размеры структурных элементов). Особенно важен учет размеров этих элементов при наличии их близости к характерным размерам концентраторов напряжений.

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб, Российский морской регистр судоходства, 2018.
2. Правила классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП. - СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014.
3. Bureau Veritas Rules for the Classification of POLAR CLASS and ICEBREAKER Ships, 2013.
4. American Bureau of Shipping Rules for Building and Classing - Steel Vessels, 2016.
5. Wallin K., Karjalainen-Roikonen P. Low-Temperature Fracture Toughness Estimates for Very High Strength Steels. International Journal of Offshore and Polar Engineering (Transactions of The International Society of Offshore and Polar Engineers). Vol. 26, No. 4, December 2016, pp. 333-338.

6. Horn A.M., Hauge M. Material Challenges for Arctic Offshore Applications, a Reliability Study of Fracture of a Welded Steel Plate Based on Material Toughness Data at -60°C . Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011.
7. Hauge M. Arctic Offshore Materials and Platform Winterization. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17-22, 2012.
8. Стандарт ИСО (ISO 19902:2007). Нефтяная и газовая промышленность. Стационарные стальные морские сооружения. 2016.
9. ГОСТ Р ИСО 19906. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения арктического шельфа. – Москва. Стандартинформ. 2011.
10. Draft ISO/DTS 35105.2:2017(E). Petroleum and natural gas industries — Arctic operations — Material requirements for Arctic operations. DTS stage, 2017
11. Крыжевич Г.Б. Прочность толстостеновых сварных конструкций судов и океанотехники в арктических условиях. // – Труды Крыловского государственного научного центра, 2017, вып. 380. - С. 32-41.
12. Крыжевич Г.Б. Усталостная прочность стальных конструкций в низкотемпературных условиях. // Морской вестник — Май, 2017 — специальный выпуск, № 1(13). - С. 66-70.
13. Махутов Н.А. Деформационные критерии и расчёт элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981.
14. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.-Л.: Гостехиздат, 1947. – 204 с.
15. Морозов Н.Ф. и др. Предельное равновесие хрупких тел с концентраторами напряжений. Структурный подход. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2011, 80 с.
16. ASTM E 208-06 (2012) Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels, ASTM International, 2012.

References

1. Pravila klassifikatsii i postrojki morskich sudov. SPb, Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2018.
 2. Pravila klassifikatsii, postrojki i oborudovaniya PBU i MSP. SPb, Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2014.
 3. Bureau Veritas Rules for the Classification of POLAR CLASS and ICEBREAKER Ships, 2013.
 4. American Bureau of Shipping Rules for Building and Classing - Steel Vessels, 2016.
 5. Wallin K., Karjalainen-Roikonen P. Low-Temperature Fracture Toughness Estimates for Very High Strength Steels. International Journal of Offshore and Polar Engineering (Transactions of The International Society of Offshore and Polar Engineers). Vol. 26, No. 4, December 2016, pp. 333-338.
 6. Horn A.M., Hauge M. Material Challenges for Arctic Offshore Applications, a Reliability Study of Fracture of a Welded Steel Plate Based on Material Toughness Data at -60°C . Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011.
 7. Hauge M. Arctic Offshore Materials and Platform Winterization. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17-22, 2012.
 8. Standard ISO (ISO 19902:2007). Neftianaja i gasovaja promyshlennost'. Statsionarnye stalnye morskije soorugenia. 2016.
 9. GOST R ISO 19906. Neftijnaja i gasovaja promyshlennost'. Soorugenia arcticheskogo shelfa. – Moskva. Standardinform. 2011.
 10. Draft ISO/DTS 35105.2:2017(E). Petroleum and natural gas industries — Arctic operations — Material requirements for Arctic operations. DTS stage, 2017
 11. Kryzhevich G.B. Prochnost' tolstolistovykh svarnykh konstruksij sudov i okeanotehniki v arcticheskikh uslovijach. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2017, vyp. 380, p. 32-41.
 12. Kryzhevich G.B. Ustalostnaja prochnost' stalnykh konstruksij v nizkotemperaturnykh uslovijach. Morskoy vestnik, May, 2017 — specialnyj vipusk, No/1(13), p. 66-70.
 13. Machutov N.A. Deformatsionnye kryterii i raschot elementov konstruksij na prochnost'. – M.: Mashynostroenye, 1981.
 14. Neyber G. Kontsentratsia naprjagenij. Gostechizdat, 1947, 204 p.
 15. Morozov N.F. Predel'noye ravnovesie khрупkikh tel s kontsentratorami naprjagenij. Structurnyj podkhod. SPb: Isd-vo SPbGU, 2011, 80 p.
 16. ASTM E 208-06 (2012) Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels, ASTM International, 2012.
- УДК 629.12.001.2

УДК 629.12.001.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА ПРИ КАЧКЕ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ

Кирилл Дмитриевич Овчинников

аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Аннотация

В работе приводятся результаты определения присоединенных масс и моментов инерции, а также демпфирующих сил и моментов с использованием численного моделирования методов свободных и вынужденных колебаний в программном комплексе OpenFOAM. Численное моделирование метода свободных бортовых колебаний было выполнено для модели DTMB5415 в двух вариантах исполнения: голый корпус и корпус со скуловыми килями. Расчеты производились для двух начальных углов крена 10° и 20° при наличии скорости хода. Результаты показали хорошее согласование с экспериментальными данными по значениям собственного периода бортовой качки, а также осциллограммам затухающих колебаний. Численное моделирование метода вынужденных колебаний для вертикальной и килевой качки было выполнено для корпуса Виглей. Расчеты производились при наличии скорости хода. Результаты показали хорошее согласование с экспериментальными данными по значениям присоединенных масс и моментов инерции, а также демпфирующих сил и моментов, на большом количестве расчетных частот.

Ключевые слова: численное моделирование, качка, свободные колебания, вынужденные колебания, DTMB5415, корпус Виглей

CALCULATIONS OF SHIP MOTIONS HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Kirill D. Ovchinnikov

PhD student of department of applied mathematics and mathematical modeling
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Abstract

The work is dedicated to determination of added masses and inertia moments as well as damping forces and moments due to numerical simulations of free decay tests and forced oscillations methods in open source software for CFD OpenFOAM. Free decay tests are modeled for naked hull and hull with bilge keels of Arleigh Burke class naval vessel (hull shape type DTMB5415). Calculations are computed for 10 and 20 degrees initial heel angle with forward speed. Results show nice agreement with experimental data by natural roll periods and graphics of decay motions for naked hull and good agreement for hull with bilge keels. Forced oscillation tests are modeled for Wigley hull forms with an amidships section coefficient of 0.909 with forward speed. Tests are made for heave and pitch motions. Results show good agreement by added masses and moments of inertia as well as damping forces and moments for large range of calculation frequencies for heave motions and satisfactory agreement for pitch motions.

Key words: CFD, motions, free decay, forced oscillation, DTMB5415, Wigley hull

Введение

Для определения основных характеристик качки корабля проводится эксперимент. При исследовании гидродинамических параметров судна применяются методы свободных и вынужденных колебаний.

Однако эксперимент является сложным и дорогостоящим мероприятием, поэтому с развитием компьютерных технологий все

большую популярность набирает применение численных методов для решения задач корабельной гидромеханики.

Сейчас методы вычислительной гидромеханики [1] широко применяются для расчетов ходовых характеристик корабля, а также активно используются для разработок подходов расчетов мореходности.

Настоящая работа посвящена верификации подходов вычислительной гидромеханики к

решению задач по определению гидродинамических характеристик судна с помощью моделирования методов свободных и вынужденных колебаний в программном комплексе OpenFOAM [13]. Под гидродинамическими характеристиками судна при качке будем понимать присоединенные массы и моменты инерции, а также силы и моменты демпфирования.

1. Экспериментальные методы свободных и вынужденных колебаний

При модельных испытаниях качки корабля применяются два метода – метод свободных колебаний и метод вынужденных колебаний.

Метод свободных колебаний используется при изучении качки на спокойной воде с целью определения периода свободных затухающих бортовых колебаний, коэффициента демпфирования бортовой качки и присоединенного момента инерции.

Для определения искомых величин методом свободных колебаний спущенная на воду модель наклоняется экспериментатором на некоторый угол, затем отпускается, и после этого начинает совершать свободные затухающие колебания, которые записываются с помощью кренографа. При дальнейшей обработке осциллограммы определяются все необходимые величины [2].

При большом демпфировании свободные колебания быстро затухают и их обработка сопровождается большими погрешностями. Исходя из этого при моделировании вертикальных и килевых колебаний, а также бортовой качки моделей, имеющих сложные обводы и большое количество выступающих частей, единственно возможным экспериментальным методом является метод вынужденных колебаний.

Метод вынужденных колебаний может быть реализован двумя способами:

1. С помощью раскачивающего устройства, устанавливаемого на модели, которое создает возмущающий момент, изменяющийся по гармоническому закону, данный метод иногда называют методом вынужденных моментов [5];

2. С помощью колебательной системы, например, платформы Гью-Стюарта, имеющей шесть степеней свободы, задающей модели колебания по гармоническому закону.

В первом случае заданными величинами являются частота колебаний и возмущающий момент, искомыми – амплитуда колебаний. Во втором случае заданными считаются частота и амплитуда колебаний, искомыми – возмущающий момент. После обработки зависимостей искомых величин определяются значения присоединенных масс и моментов инерции и демпфирующих сил и моментов [2,3].

2. Численные методы исследования качки корабля

Для численного решения указанных выше задач используются уравнения Навье-Стокса для течения вязкой жидкости, осредненные по методу Рейнольдса, и уравнение неразрывности. Для моделирования раздела сред используется модифицированная версия метода объема жидкости. Для замыкания уравнений Рейнольдса используется градиентно-диффузионная гипотеза. Для моделирования турбулентности используется двухпараметрическая универсальная модель $k-\omega$ SST [12]. Для численного решения уравнений используется алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, полунявный метод для уравнений со связью по давлению [6]).

Для создания расчетных областей – сеток – используются внутренние утилиты программного комплекса OpenFOAM blockMesh и snappyHexMesh.

3. Численное моделирование метода свободных колебаний

Модель DTMB5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США) использовалась для численного моделирования метода свободных бортовых колебаний.

Экспериментальные данные, используемые для верификации результатов численного моделирования, представлены в [5, 8].

Характеристики корпуса DTMB5415: длина между перпендикулярами $L_{pp} = 3,048$ м, ширина $B = 0,409$ м, осадка $T = 0,132$ м, водоизмещение $D = 83,5$ кг, аппликата центра тяжести $z_g = 0,163$ м, момент инерции относительно продольной оси $J_{44} = 1,92$ кг·м².

Модель DTMB5415 исследовалась в двух вариантах исполнения: голый корпус и корпус со скуловыми килями (рисунок 1). Численное моделирование производилось при двух начальных углах крена $\theta_0 = 10^\circ$ и $\theta_0 = 20^\circ$. При этом модель имела скорость хода, соответствующую числу Фруда $Fr = 0,138$.



Рис. 1. Модель DTMB5415: сверху – голый корпус, снизу – корпус со скуловыми килями

В таблице 1 представлены значения периодов свободных бортовых колебаний модели DTMB5415 по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM.

Таблица 1
Значения периодов свободных бортовых колебаний модели DTMB5415 по результатам эксперимента и численного моделирования

Вариант исполнения	Начальный угол крена θ_0	Период свободных бортовых колебаний T_θ , с		
		По результатам эксперимента	По результатам численного моделирования	Погрешность
Голый корпус	10°	1,59	1,65	3,7 %
Голый корпус	20°	1,60	1,64	2,4 %
Корпус со скуловыми килями	10°	1,61	1,70	5,2 %
Корпус со скуловыми килями	20°	1,62	1,69	4,4 %

На рисунках 2 и 3 представлены безразмерные осциллограммы затухающих колебаний голого корпуса и корпуса со скуловыми килями соответственно модели DTMB5415, полученные по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM. По оси ординат безразмерных осциллограмм представлено отношение фактического угла крена θ к начальному углу крена θ_0 , по оси абсцисс – отношение фактического момента времени t к периоду собственных колебаний T_θ .

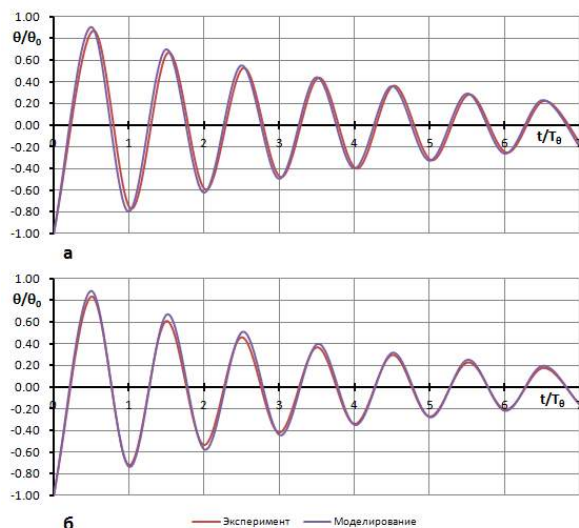


Рис. 2. Безразмерные осциллограммы затухающих колебаний модели DTMB5415 (голый корпус): а – начальный угол крена $\theta_0 = 10^\circ$, б – начальный угол крена $\theta_0 = 20^\circ$

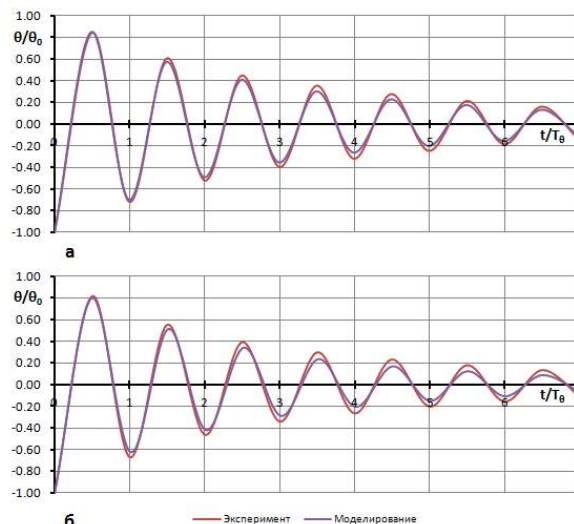


Рис. 3. Безразмерные осциллограммы затухающих колебаний модели DTMB5415 (корпус со скуловыми килями): а – начальный угол крена $\theta_0 = 10^\circ$, б – начальный угол крена $\theta_0 = 20^\circ$

Анализируя рисунок 2, можно заключить о хорошей сходимости получаемых осциллограмм при численном моделировании голого корпуса. При численном моделировании корпуса со скуловыми килями, согласно рисунку 3, затухание бортовых колебаний происходит быстрее, чем при постановке эксперимента. При этом при начальном угле крена $\theta_0 = 10^\circ$ разница в демпфировании бортовых колебаний незначительна, тогда как при начальном угле крена $\theta_0 = 20^\circ$ сопротивление качки существенно выше при численном моделировании.

Анализируя рисунок 3 при начальном угле крена $\theta_0 = 20^\circ$, интересно отметить, что наибольший прирост демпфирования наблюдается при угле крена $\theta < 10^\circ$. Это примечательно, потому как при постановке эксперимента начальный угол крена обычно стараются принять как можно выше.

4. Численное моделирование метода вынужденных колебаний

Возможность применения метода вынужденных колебаний с использованием средств вычислительной гидромеханики проверялась для задач вертикальной и килевой качки корпуса Виглей (англ. – Wigley).

Экспериментальные данные исследования характеристик корпуса Виглей представлены в [10].

Характеристики исследуемого корпуса: длина между перпендикулярами $L_{pp} = 3,00$ м, ширина $B = 0,30$ м, осадка $T = 0,1785$ м, водоизмещение $D = 94,6$ кг, аппликата центра тяжести $Z_g = 0,170$ м, момент инерции относительно продольной оси $J_{55} = 53,2$ кг·м², коэффициент полноты мидельшпангоута $\beta = 0,909$.

Корпус Виглей исследовался при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,20$. Численное моделирование производилось отдельно для вертикальной качки и килевой

качки. Амплитуда вертикальных колебаний задана $z_a = 0,05$ м. Амплитуда килевых колебаний – $\psi_a = 3^\circ$.

По результатам численного моделирования вертикальных вынужденных колебаний были получены коэффициенты присоединенных масс A_{33}'' , демпфирующих сил B_{33}'' и связывающих моментов A_{53}'' и B_{53}'' в зависимости от безразмерной частоты колебаний ω'' . По результатам моделирования килевых вынужденных колебаний были получены коэффициенты присоединенных моментов инерции A_{55}'' , демпфирующих моментов B_{55}'' и связывающих моментов A_{35}'' и B_{35}'' в зависимости от безразмерной частоты колебаний. Обработка данных и обезразмеривание величин производились согласно [10].

На рисунках 4 и 5 представлены результаты вычисления коэффициентов гидродинамических характеристик корпуса Виглей по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM.

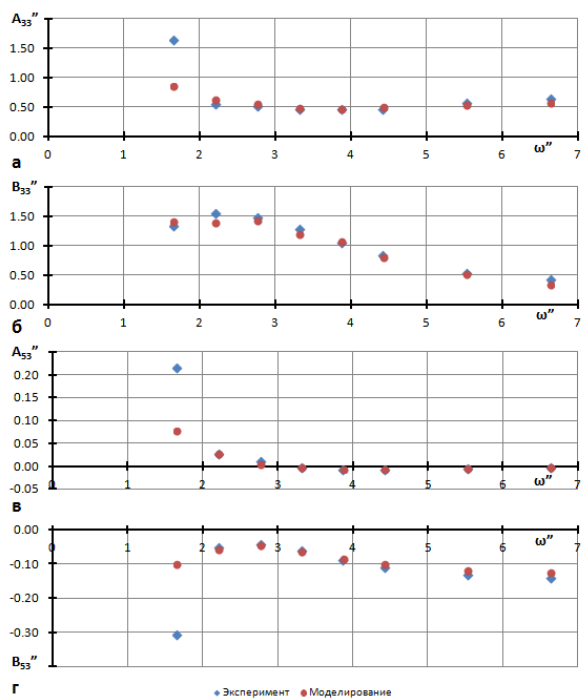


Рис. 4. Зависимости коэффициентов гидродинамических характеристик модели корпуса Виглей от безразмерной частоты ω'' : а – присоединенных масс A_{33}'' , б – демпфирующих сил B_{33}'' , в и г – связывающих моментов A_{53}'' и B_{53}''

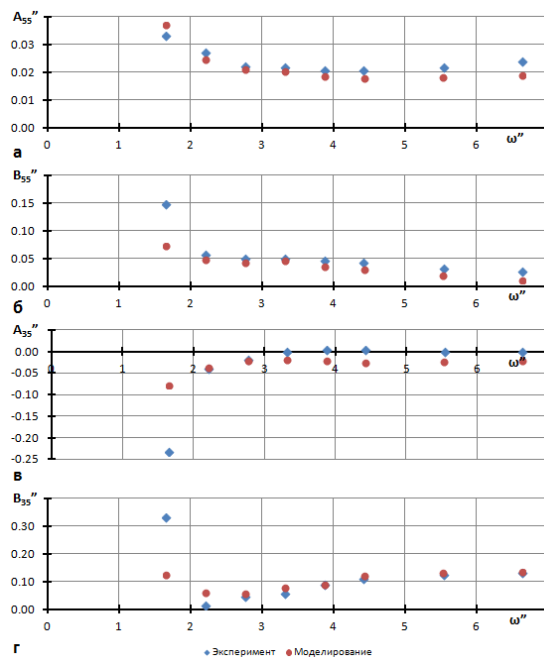


Рис. 5. Зависимости коэффициентов гидродинамических характеристик модели корпуса Виглей от безразмерной частоты ω'' : а – присоединенных моментов инерции A_{55}'' , б – демпфирующих моментов B_{55}'' , в и г – связывающих моментов A_{35}'' и B_{35}''

Анализируя рисунок 4, можно заключить о хорошей сходимости результатов численного моделирования вертикальных колебаний с данными эксперимента. При этом, согласно рисунку 5, моделирование килевых колебаний дает не такую хорошую сходимость. Несмотря на это, погрешность получаемых данных мала, и можно говорить о возможности численного моделирования вертикальных и килевых вынужденных колебаний.

Заключение

В статье рассмотрено применение средств вычислительной гидромеханики для определения гидродинамических характеристик морских объектов.

Верификация численного моделирования метода свободных колебаний проводилась путем сравнения с экспериментальными данными для модели DTMB5415. Расчеты показали хорошую сходимость. Период свободных колебаний при расчетах голого корпуса и корпуса со скуловыми килями отличается от экспериментальных данных не более чем на 5%. Затухание качки при моделировании голого корпуса практически не отличается от экспериментальных данных, тогда как при моделировании корпуса со скуловыми килями наблюдается расхождение. Примечательно, что расхождение незначительно при наибольших углах крена, и возрастает при убывании амплитуд качки.

Верификация численного моделирования метода вынужденных колебаний проводилась путем сравнения с экспериментальными данными для модели корпуса Виглей. Расчеты показали отличную сходимость для вертикальных

колебаний и удовлетворительную сходимость для килевых колебаний.

Главными преимуществами численного моделирования являются скорость и стоимость. Для получения результатов достаточно иметь

только теоретический чертеж исследуемого корпуса и его характеристики. При этом нет необходимости создавать физическую модель корпуса и проводить дорогостоящий эксперимент.

Литература

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Вычислительная_гидродинамика
2. Борисов Р.В., Семенова В.Ю. Качка корабля: учеб.пособие/Под ред. д-ра техн. наук, проф. Р.В. Борисова. - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. 93 с.
3. J.M.J. Journée and W.W. Massie *Offshore hydromechanics*. First edition. Delft University of Technology. 2001
4. Sven Handschel, Dag-Frederik Feder, Moustafa Abdel-Maksoud. *Estimation of Ship Roll Damping - a Comparison of the Decay and the Harmonic Excited Roll Motion Technique for a Post Panamax Container Ship*. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glasgow, UK.
5. Henry Peter Piehl. *Ship Roll Damping Analysis*. Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing. April 2016.
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_\(алгоритм\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_(алгоритм))
7. Arash Eslamdoost. *Roll Motion of a Box and Interaction with Free-Surface*. Project work for the PhD course in CFD with open source software. Chalmers University Of Technology. January 2010.
8. Irvine, M., Longo, J., Stern, F., "Towing Tank Tests for Surface Combatant for Free Roll Decay and Coupled Pitch and Heave Motions," Proc. 25th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, St Johns, Canada, 2004.
9. el Moctar, O., Shigunov, V., and Zorn, T., 2012. "Duisburg test case: Postpanamax container ship for benchmarking". *Ship Technology Research*(Vol. 50, No. 3).
10. J.M.J. Journée. *Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves*. Delft University of Technology. Reprinted: 26-11-2003. Website: www.shipmotions.nl.
11. Gui, L., Longo, J., and Stern, F., (2001), "Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512," *Experiments in Fluids*, Vol. 31, pp. 336-346.
12. Овчинников К.Д., Тряскин Н.В., Ткаченко И.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. *Морские интеллектуальные технологии*, № 2 (28) т.1 2015.
13. <https://openfoam.org/>

References

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Вычислительная_гидродинамика
2. Borisov R.V., Semenova V.Yu. *Kachka korablya: ucheb.posobie pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. R.V. Borisova*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015. 93 s.
3. J.M.J. Journée and W.W. Massie *Offshore hydromechanics*. First edition. Delft University of Technology. 2001
4. Sven Handschel, Dag-Frederik Feder, Moustafa Abdel-Maksoud. *Estimation of Ship Roll Damping - a Comparison of the Decay and the Harmonic Excited Roll Motion Technique for a Post Panamax Container Ship*. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glasgow, UK.
5. Henry Peter Piehl. *Ship Roll Damping Analysis*. Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing. April 2016.
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_\(алгоритм\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_(алгоритм))
7. Arash Eslamdoost. *Roll Motion of a Box and Interaction with Free-Surface*. Project work for the PhD course in CFD with open source software. Chalmers University Of Technology. January 2010.
8. Irvine, M., Longo, J., Stern, F., "Towing Tank Tests for Surface Combatant for Free Roll Decay and Coupled Pitch and Heave Motions," Proc. 25th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, St Johns, Canada, 2004.
9. el Moctar, O., Shigunov, V., and Zorn, T., 2012. "Duisburg test case: Postpanamax container ship for benchmarking". *Ship Technology Research*(Vol. 50, No. 3).
10. J.M.J. Journée. *Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves*. Delft University of Technology. Reprinted: 26-11-2003. Website: www.shipmotions.nl.
11. Gui, L., Longo, J., and Stern, F., (2001), "Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512," *Experiments in Fluids*, Vol. 31, pp. 336-346.
12. Ovchinnikov K.D., Tryaskin N.V., Tkachenko I.V. *Chislennoe modelirovanie kachki polupogruzhnoy platformy na regulyarnom volnenii*. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, № 2 (28) т.1 2015.
13. <https://openfoam.org/>

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

УДК 629.12

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ****Вьет Жа Нго**

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

До Тат Мань

аспирант кафедры " Судостроение и энергетические комплексы морской техники "
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
преподаватель вьетнамского морского университета,
484 Лач Чаи, Ле Чан, Хайфонг, Вьетнам
e-mail: dotatmanh@gmail.com

Константин Николаевич Сахно

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Судостроение и энергетические комплексы морской
техники"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Аннотация

В представленной работе изложены пути решения некоторых проблем повышения технологичности трубопроводов на этапе проектирования. Авторами рассматриваются условия и возможности компенсации отклонений трассы трубопровода и соседних конструкций в процессе монтажа труб. Поставлена задача изготовления пригоняемой трубы вместе с остальными трубами трассы по проектной информации. Предложено компенсировать отклонения за счёт перемещения трассы трубопровода в процессе монтажа труб и рассчитывать максимальные величины этих перемещений у анализируемой трассы. Сформированы теоретические основы компенсации отклонений трасс трубопроводов с использованием поворотов пар параллельных участков труб. Выполнено математическое и графическое описание области компенсационных возможностей трасс трубопроводов различных конфигураций. Созданы предпосылки для создания автоматизированной программы, которая позволит определять значения области компенсационных возможностей трасс трубопроводов и назначать величины необходимых припусков.

Ключевые слова: математическое описание, трассы трубопроводов, трубопроводы судовых систем, пригоняемые трубы, область компенсации.

**MATHEMATICAL DESCRIPTION FOR COMPENSATION
CAPACITIES AREA OF PIPELINE ROUTES IN SHIP SYSTEMS****Viet G. Ngo**

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com

Manh T. Do

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
lecturer of Vietnam Maritime University, 484 Lach tray, Le Chan, Hai phong, Viet Nam
e-mail: dotatmanh@gmail.com

Konstantin N. Sakhno

the associate professor, Dr. Sci. Tech., the professor of the department "Shipbuilding and marine power engineering complexes"

Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Abstract

In the article, the authors examine the problem of enhancing the technological features of ship's pipeline systems at the designing stage. The analysis of arrangements and possibilities for compensation of deviations for both pipeline routes and adjacent structures during pipe installation has been carried out. The task was set to produce the "fit pipe" together with the rest of the pipes in the route. It was proposed to compensate for deviations due to movement of pipeline route during pipe installation and to calculate maximum values of these displacements in the analyzed path. Theoretical bases of deviation compensation for pipeline routes using rotations of parallel section pairs of pipes are assembled. Mathematical and graphical descriptions of compensation area capacities of pipeline routes with various configurations are forged, taking into account assigning necessary pipe allowances in certain directions. Prerequisites have been created for the creating an automated program that will allow to determine values of compensatory capacities area for pipeline routes and to assign quantities of necessary allowances.

Key words: mathematical description, pipeline route, pipeline routes in ship systems, fit pipes, compensation area.

Введение

Современное судно представляет собой сложный технологический комплекс, состоящий из различного вида оборудования, механизмов, конструкций, для обеспечения работы которых служат системы трубопроводов. Появление новых типов судов с различного функционального назначения ведёт к увеличению количества судовых систем и сложности сети трубопроводов. Многообразие трубопроводов в судовых помещениях усложняет процесс проектирования, изготовления и увеличивает отклонения при их монтаже.

В настоящее время отклонения изготовления трубопроводов, а также отклонения сборки механизмов и оборудования, между которыми монтируются трассы трубопроводов, компенсируются в процессе монтажа трубопроводов с использованием забойных труб. Технология изготовления и монтажа забойной трубы включает фактические замеры между двумя жесткофиксированными соединениями, изменение на этой основе конфигурации забойной трубы и пригоночные работы по установке приварных соединений [1-8]. Характерная особенность забойных труб – это то, что они могут быть изготовлены только в последнюю очередь, после монтажа основных труб трассы трубопровода.

Для повышения технологичности судовых трубопроводов забойная труба должна изготавливаться по проектной информации без уточнения размеров по месту на судне. Проектная документация на забойные трубы будет отличаться от документации на основные трубы только наличием технологических припусков на концах трубы. В дальнейшем их

можно называть «пригоняемые» трубы. Для успешного монтажа трасс с пригоняемыми трубами необходимо в процессе монтажа иметь возможность перемещать трассу, компенсируя возникающие отклонения как труб, так и соседних конструкций в направлениях, которые нельзя компенсировать за счёт припусков на забойной трубе [9-11]. Трасса трубопровода должна иметь возможность перемещения хотя бы в одном координатном направлении.

В работе [11] установлено, что перемещение трассы возможно при наличии в трассе прямых взаимно параллельных участков и свободных соединений, расположенных на этих участках.

1. Определение траектории перемещения конца трассы при вращении пары параллельных участков труб

При вращении трассы вокруг оси участка трубы в месте свободного соединения, точка конца трассы перемещается по окружности в поворачиваемой плоскости, проходящей через точку конца трассы перпендикулярно направлению поворачиваемого участка. При этом вектор направления участка трубы является нормалью поворачиваемой плоскости. Поскольку трассы проектируются в стесненных условиях и возможность поворота ограничена смежными конструкциями, то речь идет о дуге окружности. Этот угол поворота зависит от величин зазоров между трассами трубопроводов или между трубопроводами и судовыми конструкциями, но не превышает 30 градусов.

При вращении пары взаимно параллельных участков, конец трассы перемещается по первой дуге, образующейся при повороте трассы в месте первого соединения на первом участке, и потом

перемещается по второй дуге, образующейся при повороте трассы в месте второго соединения на втором участке, в обратном направлении. С целью описания области компенсационных возможностей трасс необходимо определить траекторию перемещения конца трассы при

вращении пар параллельных участков с соединениями труб.

Траектория перемещения конца трассы определяется графическим представлением, изображено на рисунке 1.

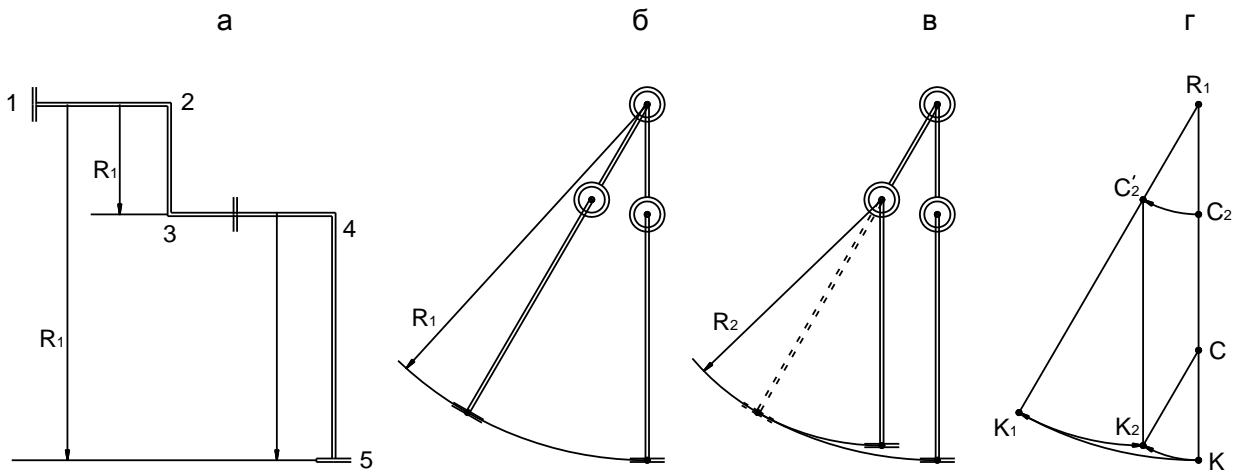


Рис. 1. Перемещение конца трассы при вращении пары параллельных участков:

а, б – трасса в двух проекциях до и после первого поворота; в – трасса после второго поворота, г – определение траектории перемещения конца трассы в поворачиваемой плоскости.

Трасса состоит из двух труб с погибами, расположенными в одной плоскости. В трассе имеется пара параллельных участков 1-2 и 3-4, на которых находятся свободные соединения.

При повороте трассы вокруг оси первого участка (1-2) на угол α точка конца трассы перемещается по дуге окружности радиусом R_1 , соответствующей углу поворота. Величина радиуса окружности первого поворота трассы равна перпендикуляру, опущенному из точки конца трассы до направления первого участка. При повороте части трассы, расположенной за вторым свободным соединением, вокруг оси второго параллельного участка на тот же угол в обратном направлении точка конца трассы перемещается по дуге окружности радиусом R_2 , являющимся расстоянием от точки конца трассы до направления второго участка. При этом часть трассы, расположенная за вторым соединением, сохраняет первоначальное направление.

В процессе поворотов пары параллельных участков, точка конца трассы перемещается по дугам окружностей в одной плоскости, называемой поворачиваемой плоскостью. Данная плоскость проходит через точку конца трассы и перпендикулярна направлению пары параллельных участков. На рисунке 1-г

изображена схема трассы в этой плоскости. Точка C_1 , полученная параллельным переносом от конца первого участка к поворачиваемой плоскости, является центром окружности вращения первого участка трассы. Точка C_2 получается параллельным переносом от конца второго участка к поворачиваемой плоскости. После поворота трассы вокруг оси первого участка точка C_2 переместится к положению C'_2 .

Точка K конца трассы перемещается к положению K_1 после поворота трассы в месте первого свободного соединения по дуге окружности центром C_1 и радиус-вектором $\vec{R}_1 = \vec{C_1K}$ и перемещается от точки K_1 к положению K_2 после поворота трассы в месте второго свободного соединения по дуге окружности центром C'_2 и радиус-вектором $\vec{R}_2 = \vec{C'_2K}$.

От точки K_2 проводим линию параллельно направлению C_1K_1 , которая пересекает C_1K в точке C .

Так как $C_1C'_2 \parallel C_1K_1$ и $C_1C \parallel C'_2K_2$,

получим:

$$\left. \begin{aligned} CK_2 = C_1C'_2 = C_1C_2 = R_1 - R_2 \\ C_1C = C'_2K_2 = R_2 \rightarrow CK = C_1K - C_1C = R_1 - R_2 \end{aligned} \right\} \rightarrow CK = CK_2 = R_1 - R_2$$

Угол между ними:

$$\angle KCK_2 = \angle KC_1K_1 = \alpha$$

Таким образом, точки K и K_2 принадлежат дуге окружности $(C; R)$, где $R = R_1 - R_2$, т.е. точка K_2

получается движением точки К вокруг центра С по дуге окружности в поворачиваемой плоскости на соответствующем угле поворота α .

Следует отметить, что при вращении пары параллельных участков, точка конца трассы окончательно перемещается по дуге окружности радиусом $R = R_1 - R_2$ в плоскости, проходящей через точку конца трассы и перпендикулярной направлению пары параллельных участков. Положение центра вращения получается при параллельном переносе вектора разности радиусов к точке конца трассы, т.е. $\vec{R} = \vec{R}_1 - \vec{R}_2$.

Величины смещения конца трассы в двух координатных направлениях при вращении пары параллельных участков:

$$\Delta k_{\text{верт.}} = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = R(1 - \cos \alpha)$$

$$\Delta k_{\text{гор.}} = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = R \sin \alpha$$

2. Математическое описание области компенсационных возможностей трасс трубопроводов

Трасса монтируется из готовых труб, изменение каких-либо конструктивных размеров которых не предполагается:

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И ВЕЛИЧИНЫ ОБЛАСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ НЕОБХОДИМО ПОСТАВИТЬ И РЕШИТЬ ЗАДАЧУ О ДУГОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.

Даны k окружностей с центрами C_1, C_2, \dots, C_k и соответственными радиусами R_1, R_2, \dots, R_k . Окружности принадлежат плоскостям, которые задаются единичными векторами нормалей $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_k$, т.е. векторы перпендикулярны плоскостям окружностей и длиной равна 1.

Координаты вектора \vec{u}_i определяются следующим образом:

$$\vec{u}_i = [\vec{n}, \vec{e}] = \left(\begin{array}{c|c|c} n_2 & n_3 & n_3 & n_1 \\ e_2 & e_3 & e_3 & e_1 \end{array} ; \begin{array}{c} n_1 \\ n_2 \end{array} \right) = (n_2 e_3 - n_3 e_2; n_3 e_1 - n_1 e_3; n_1 e_2 - n_2 e_1)$$

Длина вектора \vec{u}_i определяется по форме векторного произведения:

$$|\vec{u}_i| = |[\vec{n}, \vec{e}]| = |\vec{n}| \cdot |\vec{e}| \cdot \sin(\angle(\vec{n}, \vec{e})) = 1$$

$$\text{где } \begin{cases} \angle(\vec{n}, \vec{e}) = 90^\circ \\ |\vec{n}| = 1 \\ |\vec{e}| = 1 \end{cases}$$

Все окружности проходят через точку А. Для каждой окружности определена дуга $M_i N_i$, содержащая точку А, в которой все окружности пересекаются. Угол $\angle M_i C_i A = \alpha_i$, угол $\angle A C_i N_i = \beta_i$.

Дуга 1 перемещается по направлению второй дуги параллельным переносом, образуя криволинейную поверхность S_2 . Криволинейная поверхность S_2 перемещается параллельным переносом вдоль направления третьей дуги, образуя криволинейный объем S_3 [11].

Задача

1. Составить уравнение поверхности S_2 , которая получается движением дуги $M_1 N_1$ параллельным переносом вдоль дуги $M_2 N_2$.
2. Составить уравнение пространственной области S_3 , которая получается при движении поверхности S_2 параллельным переносом вдоль дуги $M_3 N_3$.
3. Составить уравнение пространственной области S_i , которая получается при движении области S_{i-1} параллельным переносом вдоль дуги $M_i N_i$, $i = 4, 5, \dots, k$.

Координаты произвольной точки i -й окружности

Определим координаты произвольной точки для каждой окружности. Для этого зададим в направлении радиуса окружности единичный вектор

$$\vec{e}_i = \frac{\vec{C}_i A}{R_i} = \frac{\vec{O}A - \vec{O}C_i}{R_i}, \text{ т.е. единичный}$$

центробежный вектор к данной окружности, где $O = [0, 0, 0]$ — начало координат.

$$\text{Пусть } \vec{u}_i = [\vec{n}_i, \vec{e}_i]$$

здесь $[\vec{n}, \vec{e}] = [n_2 e_3 - n_3 e_2, n_3 e_1 - n_1 e_3, n_1 e_2 - n_2 e_1]$ — векторное произведение.

Вектор \vec{u}_i называется единичным вектором касательной к соответствующей окружности.

Таким образом векторы $\vec{e}_i, \vec{u}_i, \vec{n}_i$ образуют ортонормированный базис рассматриваемой окружности (рис. 2).

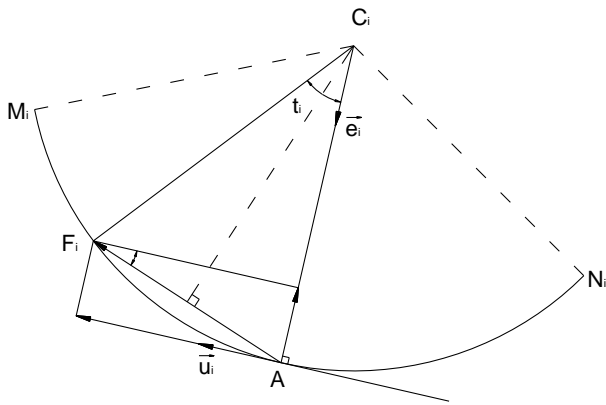


Рис. 2. Определение координат произвольной точки окружности

Выпишем параметрическое уравнение координат произвольной точки i -й окружности

$$\overline{OF}_i(t_i) = \overline{OA} + \overline{AF}_i, \quad (1)$$

где F_i — произвольная точка i -й окружности.

$$\overline{AF}_i = AF_i \cos\left(\frac{t_i}{2}\right) \overline{u}_i - AF_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right) \overline{e}_i,$$

$$\text{где } AF_i = 2R_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right),$$

отсюда:

$$\overline{AF}_i = 2R_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right) \cos\left(\frac{t_i}{2}\right) \overline{u}_i - 2R_i \sin^2\left(\frac{t_i}{2}\right) \overline{e}_i$$

$$\overline{AF}_i = R_i \sin(t_i) \overline{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \overline{e}_i. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и получим положение произвольной точки i -й окружности

$$\overline{OF}_i(t_i) = \overline{OA} + R_i \sin(t_i) \overline{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \overline{e}_i \quad (3)$$

Значение $t_i = 0$ соответствует точке A .

Уравнение поверхности S_2

Положение произвольной точки F_1 , принадлежащей первой окружности

Подставим формулы (4) и (6) в (5) и найдем уравнение поверхности S_2 (рис. 4):

$$\overline{OF}_2(t_1, t_2) = \overline{OA} + R_1 \sin(t_1) \overline{u}_1 - R_1 (1 - \cos(t_1)) \overline{e}_1 + R_2 \sin(t_2) \overline{u}_2 - R_2 (1 - \cos(t_2)) \overline{e}_2; \quad (7)$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; \quad -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2.$$

$(C_i; R_i)$, определяется по параметрическому уравнению

$$\overline{OF}_1(t_1) = \overline{OA} + R_1 \sin(t_1) \overline{u}_1 - R_1 (1 - \cos(t_1)) \overline{e}_1; \quad (4)$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1$$

При движении дуги $M_1 N_1$ вдоль дуги $M_2 N_2$ точка F_1 движется до положения F_2 по окружности $(C_2; R_2)$, где окружность $(C_2; R_2)$ образуется при движении окружности $(C_1; R_1)$ параллельным переносом по вектору \overline{AF}_1 , т. е. $\overline{C_2 C_1} = \overline{AF}_1$ (рис. 3). Базисные векторы $\overline{e}_2, \overline{u}_2, \overline{n}_2$ при этом не изменяются.

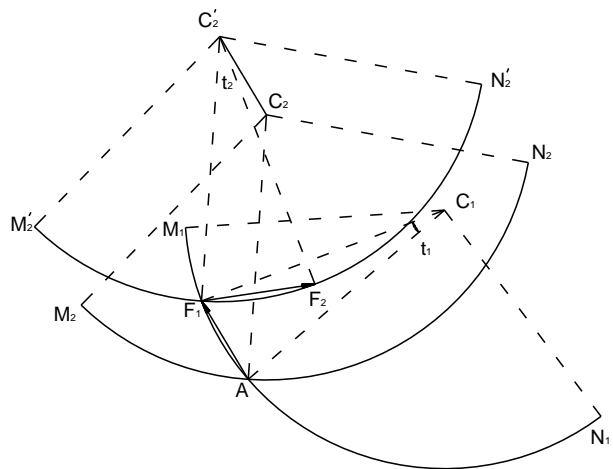


Рис. 3. Определение координат произвольной точки поверхности S_2

Положение точки F_2 определяется по формуле

$$\overline{OF}_2(t_2) = \overline{OF}_1 + \overline{F_1 F_2} \quad (5)$$

где \overline{OF}_1 определяется по формуле (4);

$\overline{F_1 F_2}$ в окружности $(C_2; R_2)$ определяется как вектор \overline{AF}_1 в окружности $(C_1; R_1)$

$$\overline{F_1 F_2} = R_2 \sin(t_2) \overline{u}_2 - R_2 (1 - \cos(t_2)) \overline{e}_2 \quad (6)$$

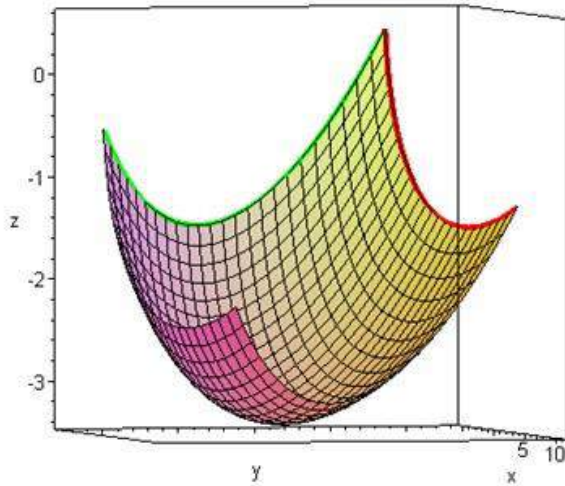


Рис. 4. Поверхность S_2 и образующие дуги

Уравнение пространственной области S_3

При движении поверхности S_2 вдоль дуги M_3N_3 точка F_2 в формуле (7) двигается до положения точки F_3 по окружности $(C_3; R_3)$, где окружность $(C_3; R_3)$ образуется при движении окружности $(C_3; R_3)$ параллельным переносом по вектору $\overline{F_1F_2}$, т. е.

$$\overline{C_3C_3} = \overline{F_1F_2}.$$

По аналогии с формулой (7) получим уравнение области S_3 (рис. 5):

$$\begin{aligned} \overline{OF_3}(t_1, t_2, t_3) = & \overline{OA} + R_1 \sin(t_1)\overline{u_1} - R_1(1 - \cos(t_1))\overline{e_1} + R_2 \sin(t_2)\overline{u_2} - R_2(1 - \cos(t_2))\overline{e_2} \\ & + R_3 \sin(t_3)\overline{u_3} - R_3(1 - \cos(t_3))\overline{e_3}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2; -\alpha_3 \leq t_3 \leq \beta_3$$

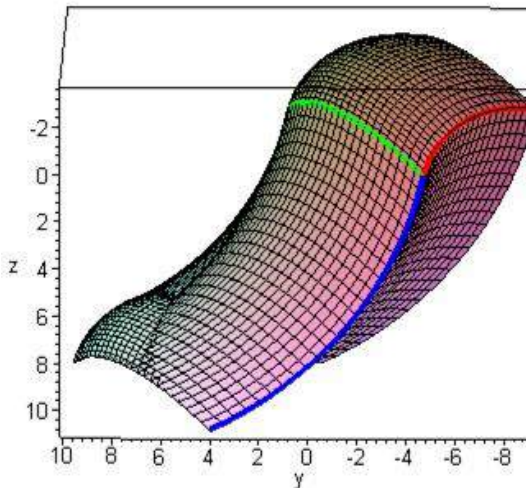


Рис. 5. Поверхность, ограничивающая область S_3 и образующие дуги

Уравнение пространственной области S_4

Пространственная область S_3 движется вдоль дуги M_4N_4 , образует область S_4 . Так как движение внутренних точек пространственной области S_3 не влияет на форму области S_4 , можно считать, что пространственная область S_4 получается движением всех граничных поверхностей области S_3 . По формуле (8) аналогично определим уравнение области S_4 .

Области S_5, S_6, \dots, S_k получаются аналогично. Таким образом, определим общую формулу области компенсационных возможностей трасс

трубопроводов с использованием поворотов пар параллельных участков:

$$\overline{OF_n}(t_1, \dots, t_n) = \overline{OA} + \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i)\overline{u_i} - R_i(1 - \cos(t_i))\overline{e_i}) \quad (9)$$

где $\Delta \overline{S} = \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i)\overline{u_i} - R_i(1 - \cos(t_i))\overline{e_i})$ — это

абсолютная область компенсации по сравнению с положением концов трассы.

При перемещении системы координат от точки начала к точке конца трассы определено векторное выражение области компенсационных возможностей трассы в сокращенном виде:

$$\overline{OF_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) = \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i)\overline{u_i} - R_i(1 - \cos(t_i))\overline{e_i}) \quad (10)$$

Формула 10 является математическим описанием области компенсационных возможностей трасс трубопроводов с использованием поворотов пар параллельных участков со свободными соединениями. Для облегчения определения координат точки конца трассы и параметров дуг окружностей применим для всех трасс отдельные системы координат, точки начала которых совпадают с положениями начала трассы.

Заключение

В ходе исследований компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов:

- сформированы теоретические основы компенсации отклонений трасс трубопроводов с использованием поворотов пар параллельных участков труб;
- выполнено математическое и графическое описания области компенсационных возможностей трасс трубопроводов различных

конфигураций с учетом назначения необходимых припусков труб в определенных направлениях;
- созданы предпосылки для создания автоматизированной программы, которая позво-

лит определить значения области компенсационных возможностей трасс трубопроводов.

Литература

1. Богачев, А. М. Совершенствование трубообрабатывающего производства в условиях совмещения работ по судостроению и судоремонту / А. М. Богачев // *Технология судостроения*. – 1988. – № 5. – С. 25–28.
2. Васильев, А. А. Перспективы внедрения современных технологий в новых судостроительных комплексах Российской Федерации / А. А. Васильев, В. М. Левшаков, В. А. Голланд // *Вестник технологии судостроения*. – 2008. – № 16. – С. 32–34.
3. Горелик, Б. А. Судовые трубопроводные работы / Б. А. Горелик. – Л. : Судостроение, 1984.
4. Жепетов, А. А. Состояние и перспективы развития трубообрабатывающего производства / А. А. Жепетов, И. Д. Шимчук, В. Г. Дрондель // *Технология судостроения*. – 1990. – № 1. – С. 41–44.
5. Соколов, О. Г. Применение информационных технологий при создании судостроительной продукции / О. Г. Соколов, А. М. Плотников, Г. В. Багаев, В. А. Рогозин, В. И. Куперштейн // *Судостроение*. – 2004. – № 5. – С. 78–83.
6. Чугаевский, М. И. Принципиальные особенности создания технологии изготовления забойных труб по аналитической информации / М. И. Чугаевский, Н. О. Гончар // *Технология судостроения*. – 1989. – № 8. – С. 86–88.
7. Семенюк, В. Ф. Автоматизация технологии сборки забойных труб / В. Ф. Семенюк, П. П. Селюта, И. П. Кубышкин, В. И. Кучмель // *Вестник технологии судостроения и судоремонта*. – 2009. – № 17.
8. Маслов, А. Б. Применение электронной модели строящегося заказа для изготовления забойных труб / А. Б. Маслов // *Вестник технологии судостроения*. – 2004. – № 12. – С. 79–80.
9. Сахно К. Н. Исследование компенсационных возможностей прямых труб в трассах с погибами / К. Н. Сахно, Нго Жа Вьет // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. – Астрахань, – 2016. – № 1. – С. 29–37.
10. Сахно К. Н. Технология изготовления и монтажа трасс трубопроводов по проектной информации / К. Н. Сахно, Во Куанг Чунг, Нго Вьет Жа // *Естественные и технические науки. Серия: технические науки*. – Изд. «Спутник+» – 2017. – № 2 (104). – С. 103–108.
11. Нго Ж. В. Исследование компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов судовых систем / Ж. В. Нго, К. Н. Сахно // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 157–164.

References

1. Bogachev, A. M. Sovershenstvovanie trubooabratyvyayushchego proizvodstva v usloviyakh sovmeshcheniya rabot po sudostroeniyu i sudoremontu / A. M. Bogachev // *Tekhnologiya sudostroeniya*. – 1988. – № 5. – S. 25–28.
2. Vasil'ev, A. A. Perspektivy vnedreniya sovremennykh tekhnologiy v novykh sudostroitel'nykh kompleksakh Rossiyskoy Federatsii / A. A. Vasil'ev, V. M. Levshakov, V. A. Golland // *Vestnik tekhnologii sudostroeniya*. – 2008. – № 16. – S. 32–34.
3. Gorelik, B. A. Sudovye truboprovodnye raboty / B. A. Gorelik. – L. : Sudostroenie, 1984.
4. Zhepetov, A. A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya trubooabratyvyayushchego proizvodstva / A. A. Zhepetov, I. D. Shimchuk, V. G. Drondel' // *Tekhnologiya sudostroeniya*. – 1990. – № 1. – S. 41–44.
5. Sokolov, O. G. Primenenie informatsionnykh tekhnologiy pri sozdanii sudostroitel'noy produktsii / O. G. Sokolov, A. M. Plotnikov, G. V. Bagaev, V. A. Rogozin, V. I. Kupershteyn // *Sudostroenie*. – 2004. – № 5. – S. 78–83.
6. Chugaevskiy, M. I. Printsipial'nye osobennosti sozdaniya tekhnologii izgotovleniya zaboynykh trub po analiticheskoy informatsii / M. I. Chugaevskiy, N. O. Gonchar // *Tekhnologiya sudostroeniya*. – 1989. – № 8. – S. 86–88.
7. Semenyuk, V. F. Avtomatizatsiya tekhnologii sborki zaboynykh trub / V. F. Semenyuk, P. P. Selyuta, I. P. Kubyshkin, V. I. Kuchmel' // *Vestnik tekhnologii sudostroeniya i sudoremonta*. – 2009. – № 17.
8. Maslov, A. B. Primenenie elektronnoy modeli stroyashchegosya zakaza dlya izgotovleniya zaboynykh trub / A. B. Maslov // *Vestnik tekhnologii sudostroeniya*. – 2004. – № 12. – S. 79–80.
9. Sakhno K. N. Issledovanie kompensatsionnykh vozmozhnostey pryamykh trub v trassakh s pogibami / K. N. Sakhno, Ngo Zha V'et // *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. – Astrakhan', – 2016. – № 1. – S. 29–37.
10. Sakhno K. N. Tekhnologiya izgotovleniya i montazha trass truboprovodov po proektnoy informatsii / K. N. Sakhno, Vo Kuang Chung, Ngo V'et Zha // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki. Seriya: tekhnicheskie nauki*. – Izd. «Sputnik+» – 2017. – № 2 (104). – S. 103–108.
11. Ngo Zh. V. Issledovanie kompensatsionnykh vozmozhnostey proektnoy trassirovki truboprovodov sudovykh sistem / Zh. V. Ngo, K. N. Sakhno // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. – 2017. – Т. 9. – № 1. – S. 157–164.

УДК 629.12

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ТРУБ С СОЕДИНЕНИЯМИ

Во Чунг Куанг

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

Константин Николаевич Сахно

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Судостроение и энергетические комплексы морской техники"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Аннотация

В представленной работе авторами рассматривается актуальная проблема изготовления и монтажа судовых трубопроводов без снятия размеров по месту. Проведён анализ стандартизованных отклонений, контролируемых при изготовлении труб по чертежам. Рассмотрены различные способы сборки труб с соединениями. Представлена новая технология сборки труб с соединениями на основе использования плоского стенда. Разработана математическая основа для компенсации отклонений труб при установке соединений с допустимым перекосом на стадии проектирования. Создана компьютерная программа, являющаяся инструментом повышения качества трассировки трубопроводов до уровня, необходимого для изготовления труб заранее, в задел. Выполненный программой расчёт – это анализ конфигурации и размеров трубы на предмет её компенсационных возможностей для компенсации отклонений, образующихся после операции гибки трубы. Изготовленные по предлагаемой технологии трубы будут иметь отклонения своих конструктивных размеров только в одном координатном направлении, выбранном проектантом с учётом условий размещения трассы трубопровода, которому принадлежат данные трубы.

Ключевые слова: трубопроводы, трассировка, проектирование трубопроводов, изготовление труб, монтаж судовых систем, сборка соединений труб, отклонения координатных размеров труб, отклонения трассы, компенсация отклонений.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF ASSEMBLING PIPES WITH CONNECTIONS

Vo Trung Quang

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: ngocsenqb@gmail.com

Konstantin N. Sakhno

the associate professor, Dr. Sci. Tech., the professor of the department "Shipbuilding and marine power engineering complexes"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Abstract

The authors consider the actual problem of manufacturing and installation of ship pipelines without removing dimensions in place. The analysis of standardized deviations controlled in the manufacturing of pipes according to the drawings are analyzed. Various methods of assembling pipelines with joints are considered. A new technology of assembling pipes with connections based on the use of a flat stand (base) is presented. A mathematical basis has been developed to compensate for pipeline deflections during the installation of connections with permissible skew at the design stage. A computer program has been created, which is a tool to improve the quality of pipeline tracing to the level required for making pipes in advance. The calculation carried out by the program is an analysis of the

configuration and dimensions of the pipe for its compensation capabilities to compensate for the deviations resulting from the pipe bending operation. The pipes produced by the proposed technology will have deviations in their design dimensions in only one coordinate direction chosen by the designer taking into account the conditions for the location of the pipeline route to which these pipes belong.

Key words: pipelines, tracing, designing of pipelines, manufacturing of pipes, installation of ship systems, assembling of pipe joints, deviation of pipe dimensions, deviation of the route, compensation of deviations.

Введение

Трубы сложных конфигураций, как и любые детали машиностроения, имеют отклонения своих конструктивных размеров, возникающие в процессе их изготовления.

Процесс изготовления гнутых труб различных конфигураций связан с выполнением операций гибки и резки труб. Резка и гибка труб выполняется на оборудовании, указанном в ОСТ 5.95057-90 [4]. Процесс гибки труб состоит из основных операций: продвижение (установка размера до начала погиба), погиб, разворот.

От точности выполнения указанных операций и индивидуальной конфигурации трубы зависят возможные отклонения координатных размеров. Величины отклонений зависят от погрешностей резки и гибки труб [6,9,10].

Для определения величин отклонений координатных размеров труб использована методика расчётов отклонений координатных размеров труб после гибки – представлена в работе [6].

Новая технология проектирования судов с использованием 3D моделей особенно актуальна при проектировании трубопроводов и систем. Она обеспечивает точность взаимного расположения труб и оборудования с использованием номинальных размеров и назначаемых зазоров. При этом точность изготовления труб не учитывается.

Влияние погрешностей изготовления на отклонения смонтированной трассы трубопровода зависит от методов установки соединений при изготовлении труб. Поставленная задача уменьшения (исключения) отклонений, возникающих под влиянием погрешностей резки и гибки, может решаться за счёт установки соединений с использованием специализированных стендов [1,3,8].

Традиционная технология установки соединений

Сборку типовых форм труб с соединениями, отрезками и ответвительными деталями рекомендуется производить с использованием сборочного стенда. Трубы неунифицированной формы, имеющие непараллельные и неперпендикулярные концевые участки, собираются с помощью приспособления [5].

На рис. 1 показаны отклонения монтируемого участка трубопровода под влиянием

погрешностей изготовления при установке соединений тремя различными способами.

Рассмотрим три основных способа сборки труб с соединениями.

При сборке соединений труб с использованием приспособлений, базирующихся на образующей трубы плоскости, соединения устанавливаются перпендикулярно оси трубы. Погрешность погиба остаётся не скомпенсированной и это увеличивает отклонения следующих труб при монтаже их в трассе. Установка соединений с помощью приспособлений (угольников, базирующихся по трубе) даёт смещение трубы по осям координат и дополнительно – угловое отклонение трассы трубопровода.

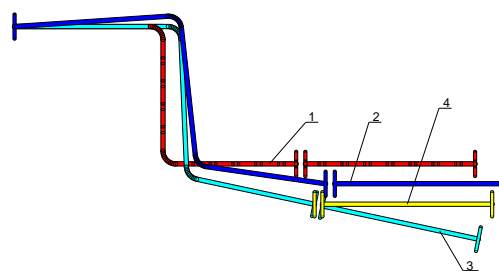


Рисунок 1 – Монтируемый участок трубопровода

- 1) Теоретическое положение
- 2) установка соединения на стенде СГТ-160
- 3) установка соединения с приспособлением
- 4) установка соединения на плоском стенде

При технологии изготовления труб по проектной информации установку соединений предпочтительнее производить на плоском стенде, имитирующем плоскости координат (рис. 2).

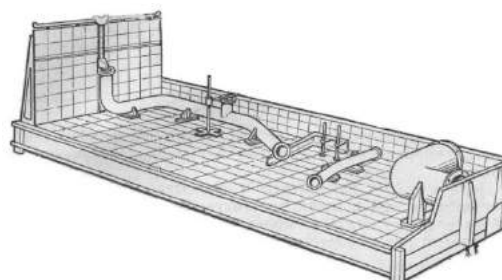


Рисунок 2 – Плоский стенд

На рисунке видно, что трубы располагаются так, чтобы соединения базировались плоскостями стенда.

Этот способ позволяет исключить угловые отклонения трассы под влиянием погрешностей погибов. В этом случае, одно из двух соединений трубы будет установлено не перпендикулярно к оси трубы. Допускаемая неперпендикулярность регламентируется соответствующими нормативными документами. В отраслевом стандарте [4, табл.17] определены допускаемые величины отклонения фланцев (колец) от перпендикулярности к оси трубы из расчета на диаметр уплотнительной поверхности.

Стенд был разработан для труб, изготавливаемых по чертежам. Установка соединений на забойные трубы производилась по месту. Для переноса работ в цех был разработан стенд СГТ-160, также рекомендуемый в РД5Р.0005-93 [5]. Положение соединений на стенде фиксировалось по макету забойной трубы, изготовленному по месту на судне [5, п.3.5.14].

В настоящее время произведена модернизация этого стенда. На новом стенде СГТ-160М (рис. 3) есть возможность крепления не только фланцевых, но и штуцерных соединений [7]. Данные вводятся или с клавиатуры пульта стенда по карте сборки, или из файла. При использовании стенда для основных труб соединения должны быть установлены в теоретическое положение. Гнутая заготовка позиционируется так, чтобы линия соединяющая концы трубы, оказалась параллельно оси стенда. Если гнутая заготовка трубы оказалась либо короче, либо длиннее, требуется переместить подвижный позиционер, чтобы совместить соединения с концами трубы.



Рисунок 3 – Стенд СГТ-160М

Данный стенд обеспечивает:

- интеграцию с CAD/CAM и измерительными системами;
- автоматизированную сборку труб с фланцами;

Также стенд может встраиваться в комплексно-механизированные линии обработки труб.

Сейчас для сборки труб при помощи станков СГТ-160М и Robofix вместо разовых жёстких

макетов используются измерительные устройства ИЗК-ПТ-1М и Scopelink соответственно. Это дополнительное сложное оборудование, с помощью которого можно снимать по месту размеры для разных труб, а не изготавливать и выбрасывать жёсткий макет после изготовления трубы.

Установка соединений на плоском стенде и стендах СГТ-160, СГТ-160М оставляет смещение по всем осям и за счёт неперпендикулярности в обоих соединениях убирает угловые отклонения трассы трубопровода.

При использовании станков возникает опасность превышения неперпендикулярности плоскости соединений с осью трубы и, как следствие, требуется проведение сложного контроля неперпендикулярности для удержания её в допускаемых пределах.

Методы контроля перпендикулярности в отраслевом стандарте и в руководящих документах четко не прописаны.

Практически, это сложный процесс, требующий специальных приспособлений и измерительных приборов типа квадранта КО-1 [5].

Предлагаемая технология сборки труб с соединениями на основе использования плоского станка

Анализ различных способов сборки труб с соединениями показал, что для изготовления труб по проектной информации, в задел, наиболее перспективным является способ сборки при помощи плоского станка.

В дальнейшем при проведении исследований планируется применять плоский станок, изготовленный в соответствии с нормативными указаниями [5]. Использование плоского станка даёт возможность спроектировать трассировку трубопроводов с наименьшими необходимыми зазорами от соседних конструкций и трубопроводов.

Стенд СГТ-160 (СГТ-160М) хоть и упрощает процесс установки соединений, но не даёт возможность определить максимальные отклонения на стадии проектирования.

Существует изобретение [12], где предложен метод установки соединений на плоском станке. Он основан на том, что если поворачивать второй конец трубы относительно первого так, чтобы второй конец трубы совпал с одним из координатных направлений теоретического положения второго конца, то отклонения в направлении других координатных направлений окажутся нулевыми (рис.4).

Чтобы применить это изобретение надо выяснить, на какие оси координат можно переместить второй конец анализируемой трубы, не превысив регламентируемый для данного

диаметра трубы угол неперпендикулярности плоскости соединения и оси трубы. Для этого необходимо проводить математические расчёты. Исходными данными расчётов будут величины отклонений после операций гибки, диаметр трубы и длина линии, соединяющей концы трубы (расстояние между торцами трубы – D_{Π}).

В качестве примера рассмотрим трубу с тремя погибами с координатами $2(X_2; Y_2; Z_2)$; $3(X_3; Y_3; Z_3)$; $4(X_4; Y_4; Z_4)$.

Теоретические координаты второго конца трубы $D(X_T; Y_T; Z_T)$.

После гибки, заготовка трубы имеет отклонения. Фактические координаты второго конца трубы $D(X_{\Phi}; Y_{\Phi}; Z_{\Phi})$.

Поворачивая второй конец трубы относительно первого до совпадения с каждой осью координат (Nxyz), проходящий через теоретическое положение второго конца труб и параллельно системы координат (Oxyz), получим:

$$a = |\overline{NA}|, b = |\overline{NB}|, c = |\overline{NC}| \quad - \quad \text{величины}$$

перемещения соединения вдоль каждой оси координат (Nxyz) до совмещения с второго конца трубы, после того как конец трубы был совмещён с этой осью.

В новой системе координат (Nxyz) точки A, B, C, D, O имеют координаты: $A(a; 0; 0)$;

$$B(0; b; 0); C(0; 0; c); O(-X_T; -Y_T; -Z_T);$$

$$D(X_D; Y_D; Z_D),$$

$$\text{где } X_D = X_{\Phi} - X_T; Y_D = Y_{\Phi} - Y_T; Z_D = Z_{\Phi} - Z_T;$$

В случае пространственной задачи векторы \overline{OD} , \overline{DA} , \overline{DB} , \overline{DC} , заданные координатами точек $O(-X_T; -Y_T; -Z_T)$, $D(X_D; Y_D; Z_D)$, $A(a; 0; 0)$; $B(0; b; 0)$; $C(0; 0; c)$; можно найти, воспользовавшись следующей формулой:

$$\overline{OD} = (X_D - X_O; Y_D - Y_O; Z_D - Z_O) = (X_{\Phi}; Y_{\Phi}; Z_{\Phi})$$

$$\overline{DA} = (a - X_D; -Y_D; -Z_D) = (X_T + a - X_{\Phi}; Y_T - Y_{\Phi}; Z_T - Z_{\Phi})$$

$$\overline{DB} = (-X_D; b - Y_D; -Z_D) = (X_T - X_{\Phi}; Y_T + b - Y_{\Phi}; Z_T - Z_{\Phi})$$

$$\overline{DC} = (-X_D; -Y_D; c - Z_D) = (X_T - X_{\Phi}; Y_T - Y_{\Phi}; Z_T + c - Z_{\Phi})$$

Таким образом, длина вектора, изображенного в пространстве, равна корню квадратному из суммы квадратов его координат, т.е. находится по формуле:

$$|\overline{OD}| = \sqrt{X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2};$$

$$|\overline{DA}| = \sqrt{(X_T + a - X_{\Phi})^2 + (Y_T - Y_{\Phi})^2 + (Z_T - Z_{\Phi})^2};$$

$$|\overline{DB}| = \sqrt{(X_T - X_{\Phi})^2 + (Y_T + b - Y_{\Phi})^2 + (Z_T - Z_{\Phi})^2};$$

$$|\overline{DC}| = \sqrt{(X_T - X_{\Phi})^2 + (Y_T - Y_{\Phi})^2 + (Z_T + c - Z_{\Phi})^2};$$

Точки A; B; C; D находятся на сфере (S) радиусом $R = |\overline{OD}|$ и центр сферы $O(-X_T; -Y_T; -Z_T)$;

Уравнение сферы (S) имеет вид:

$$(x + X_T)^2 + (y + Y_T)^2 + (z + Z_T)^2 = X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2$$

Так как точка $A(a; 0; 0)$ находится на сфере (S), получим:

$$(a + X_T)^2 + (0 + Y_T)^2 + (0 + Z_T)^2 = X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2$$

$$\Leftrightarrow a = -X_T \pm \sqrt{X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2 - Y_T^2 - Z_T^2}.$$

Аналогично точки $B(0; b; 0)$; $C(0; 0; c)$ находятся на сфере (S). Получим:

$$\Rightarrow b = -Y_T \pm \sqrt{X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2 - X_T^2 - Z_T^2};$$

$$c = -Z_T \pm \sqrt{X_{\Phi}^2 + Y_{\Phi}^2 + Z_{\Phi}^2 - X_T^2 - Y_T^2}.$$

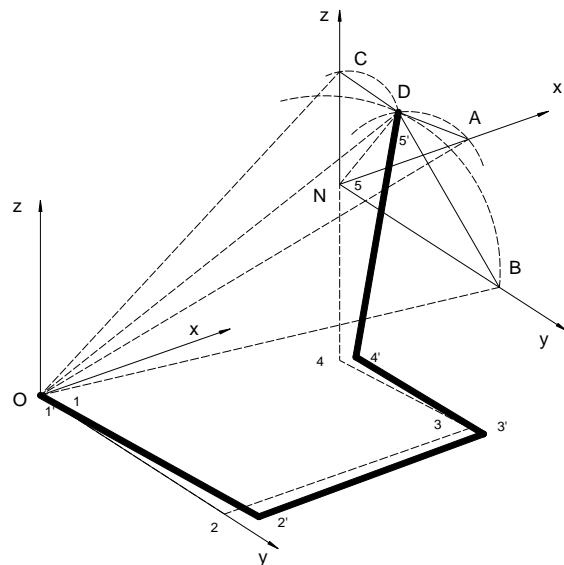


Рисунок 4 – Компенсационные возможности при установке соединений по предлагаемой технологии

$|\overline{DA}|$, $|\overline{DB}|$, $|\overline{DC}|$ – величины перемещения второго конца трубы, относительно первого до совпадения с каждой осью координат.

Если $D_{\Pi} \geq |\overline{DA}|$, $D_{\Pi} \geq |\overline{DB}|$, $D_{\Pi} \geq |\overline{DC}|$, то соответствующую ось можно использовать для компенсации.

Если $D_{II} < |\overline{DA}|$, $D_{II} < |\overline{DB}|$, $D_{II} < |\overline{DC}|$, то соответствующую ось нельзя использовать для компенсации. При этом поворачивая второй конец трубы относительно первого до совпадения с осью координат, нарушается угол неперпендикулярности, регламентируемый в РД5Р.0005-93. Расчёт величины допускаемого перемещения второго конца трубы, для анализа компенсационных возможностей труб при установке соединений с допустимым перекосом, определяется соотношением:

$$D_{II} = |\overline{OD}| \times \text{tg}\varphi = \sqrt{X_{\varphi}^2 + Y_{\varphi}^2 + Z_{\varphi}^2} \times \text{tg}\varphi$$
, где φ – допускаемое угловое отклонение от перпендикулярности относительно оси труб к уплотнительной поверхности соединения;

$$\text{tg}\varphi = \frac{d}{D}$$
, где d - величина отклонения от перпендикулярности, регламентированная в [4].

D - диаметр уплотнительной поверхности фланцев, регламентируемый в [2].

По результатам проведенных исследований была создана компьютерная программа «Допуски-Трубы» [11]. Данная программа использует в расчетах данные по конфигурации трубы, заданные в координатных осях (точки перегиба), а также данные по погрешностям выполнения отдельных операций оборудованием для изготовления труб: резка, гибка, продвижение, разворот в плоскости. Эта программа осуществляет анализ конфигурации трубы и возможных вариантов установки соединений.

В предлагаемой технологии производства трубопроводов, направленной на увеличение объема труб, изготавливаемых в задел по проектной документации, необходимо участие проектной организации. Проектант из предложенных программой вариантов (если их больше одного) выбирает вариант, подходящий для безопасного отклонения трассы и записывает в документ на изготовление трубы (чертёж или эскиз) ось координат, на которой остаётся допуск от координатных размеров трубы, а также максимальную величину этого допуска, рассчитанного программой.

На рисунке 5 приведена последняя, выходная форма программы - результаты анализа конфигурации и размеров трубы на предмет ее компенсационных возможностей для компенсации отклонений, образующихся после операции гибки трубы.

Технология установки соединений на трубы, обслуживаемая данной программой, позволяет исключить отклонения конструктивных размеров трубы по двум координатным направлениям из трёх, не превышая угол неперпендикулярности соединения с осью трубы [8].

Данная программа пользуется данными по конфигурации трубы, импортируя их из базы программы «Ритм-Судно» (Модуль трубы), т.е. так же не требует ввода координат труб, хотя имеет такую возможность для экстренных ситуаций. В результате программа даёт отклонения трубы после гибки, экстремумы перемещения конца трубы, до совпадения с осью координат и экстремумы перемещения конца трубы, при сборке.

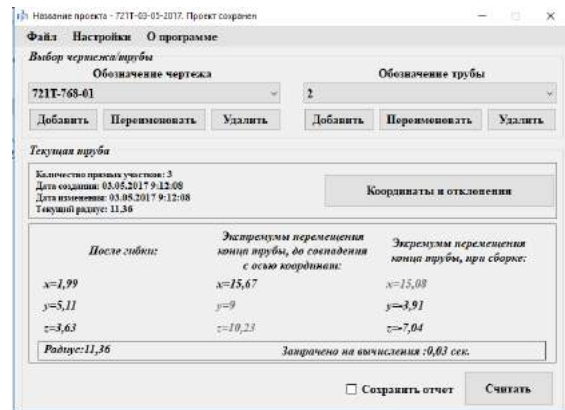


Рисунок 5 – Главная форма, после расчётов

Выполненный программой расчёт – это анализ конфигурации и размеров трубы на предмет её компенсационных возможностей для компенсации отклонений, образующихся после операции гибки трубы.

Изготовленные по предлагаемой технологии трубы будут иметь отклонения своих конструктивных размеров только в одном координатном направлении, выбранном проектантом с учётом условий размещения трассы трубопровода, которому принадлежат данные трубы.

Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1- При сборке соединений трубы с использованием приспособлений обеспечивается перпендикулярность уплотнительной поверхности соединения к оси трубы, но все отклонения по осям координат, возникающие в процессе гибки, остаются и дополнительно – угловое отклонение трассы при монтаже судовых систем.

2- При сборке соединений трубы с использованием плоского станда по технологии, описанной в РД5Р.0005-93, все отклонения по осям координат, возникающие в процессе гибки, остаются и появляется неперпендикулярность уплотнительной поверхности соединения к оси трубы во втором соединении трубы, но исключается угловое отклонение трассы, возникающее при монтаже. При использовании этого способа возможно нарушить угол

неперпендикулярности во втором соединении трубы, который ограничен руководящим документом [5, п.6.2.20].

3- При сборке соединений трубы с использованием стенда СТГ-160, все отклонения по осям координат, возникающие в процессе гибки остаются, и появляется неперпендикулярность уплотнительной поверхности соединения к оси трубы в обоих соединениях трубы, но исключается угловое отклонение трассы, возникающее при монтаже. При использовании этого способа невозможно контролировать угол неперпендикулярности в соединениях труб.

4- При сборке соединений трубы с использованием плоского стенда по технологии, предполагаемой в данной работе, исключается

угловое отклонение трассы. Использование этого способа дает неперпендикулярность уплотнительной поверхности соединения к оси трубы в обоих соединениях трубы, но, не нарушается допустимое угловое отклонение от перпендикулярности относительно оси трубы к уплотнительной поверхности соединения. Труба с установленными соединениями будет иметь единственное отклонение в одном из координатных направлений. При этом имевшиеся отклонения после гибки по двум из трёх координатных направлений будут скомпенсированы – это даёт возможность регулировать направление отклонений трасс, в том числе уменьшая их величины, что позволяет минимизировать зазоры на стадии проектирования при трассировке трубопроводов судовых систем.

Литература

1. Во, Ч.К. Разработка методики обеспечения достоверной трассировки трубопроводов, учитывающей допуски конструктивных размеров труб, возникающих при их изготовлении по проектным чертежам / Ч.К. Во, К.Н. Сахно, Ж.В. Нго // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - Астрахань, 2017. - №4. - С. 21-28. ISSN 2073-1574.
2. ГОСТ 12815-80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на Ру от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 кгс/см²). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей.
3. Дьяков, А.С. Развитие технологий изготовления трубопроводов в рамках стратегии импортозамещения / А.С. Дьяков, К.Н. Сахно // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 13. – С. 3516–3520. [<http://e-koncept.ru/2015/85704.htm>]
4. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — РТП НПО «Ритм». — 207 с.
5. РД 5Р.0005-93. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. – СПб.: ЦНИИТС.
6. Сахно, К.Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / К.Н. Сахно. Астрахань, 2012. 353 с.
7. Сахно К.Н. Развитие технологий сборки судовых трубопроводов / К.Н. Сахно, Д.М. Галкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск, 2014. – № 2(42). – С. 207-212
8. Сахно К.Н. Совершенствование технологии изготовления трубопроводов по проектной информации при использовании приварных соединений труб. [Текст] / К.Н. Сахно, А.С. Дьяков, Ч.К. Во // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова - Санкт-Петербург, 2016. – №1(35) – С. 91-98.
9. Сахно К.Н. Технология изготовления и монтажа трасс трубопроводов по проектной информации / К.Н. Сахно, Во Куанг Чунг, Нго Вьет Жа // Естественные и технические науки. Серия: технические науки. - Изд. «Спутник+» – 2017. – № 2 (104). – С 103–108.
10. Сахно, К.Н. Компенсация отклонений при сборке труб с соединениями /К.Н. Сахно // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2011. – № 2. – С. 43–48.
11. Сахно, К.Н. Программное обеспечение «Допуски-Трубы» [Электронный ресурс]: программа для ЭВМ / К.Н. Сахно // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611625. Зарегистрировано 08.02.2016.
12. Сахно, К.Н. Способ компенсации отклонений при изготовлении труб с соединениями / К.Н. Сахно // Патент на изобретение № 2622210. Зарегистрировано 13.06.2017.

References

1. Vo, Ch.K. Razrabotka metodiki obespechenija dostovernoj trassirovki truboprovodov, uchityvajushhej dopuski konstruktivnyh razmerov trub, vznikajushhih pri ih izgotovlenii po proektnym chertezham / Ch.K. Vo, K.N. Sahno, Zh.V. Ngo // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. - Astrahan', 2017. - №4. - S. 21-28. ISSN 2073-1574.
2. GOST 12815-80. Flancy armatury, soedinitel'nyh chastej i truboprovodov na Ru ot 0,1 do 20,0 МПа (ot 1 do 200 kgs/sm²). Tipy. Prisoedinitel'nye razmery i razmery uplotnitel'nyh poverhnostej.
3. D'jakov, A.S. Razvitie tehnologij izgotovlenija truboprovodov v ramkah strategii importozameshenija / A.S. D'jakov, K.N. Sahno // Nauchno-metodicheskij jelektronnyj zhurnal «Koncept». – 2015. – T. 13. – S. 3516–3520. [<http://e-koncept.ru/2015/85704.htm>]
4. OST 5.95057-90. Sistemy sudovye i sistemy sudovyh jenergeticheskij ustanovok. Tipovoj tehnologicheskij process izgotovlenija i montazha truboprovodov. — RTP NPO «Ritm». — 207 s.

5. RD 5R.0005-93. Sistemy sudovye i sistemy sudovyh jenergeticheskikh ustanovok. Trebovanija k proektirovaniju, izgotovleniju i montazhu trub po jeskizam i chertezham s koordinatami trass truboprovodov. – SPb.: CNIITS.
6. Sahno, K.N. Nauchnye osnovy povyshenija tehnologichnosti truboprovodov sudovyh sistem na stadii proektirovanija: dis. ... d-ra tehn. nauk / K.N. Sahno. Astrahan', 2012. 353 s.
7. Sahno K.N. Razvitie tehnologij sborki sudovyh truboprovodov / K.N. Sahno, D.M. Galkin // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. Irkutsk, 2014. – № 2(42). – S. 207-212
8. Sahno K.N. Sovershenstvovanie tehnologii izgotovlenija truboprovodov po proektnoj informacii pri ispol'zovanii privarnyh soedinenij trub. [Tekst] / K.N. Sahno, A.S. D'jakov, Ch.K. Vo // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova - Sankt-Peterburg, 2016. – №1(35) – S. 91-98.
9. Sahno K.N. Tehnologija izgotovlenija i montazha trass truboprovodov po proektnoj informacii / K.N. Sahno, Vo Kuang Chung, Ngo V'et Zha // Estestvennye i tehniczeskie nauki. Serija: tehniczeskie nauki. - Izd. «Sputnik+» – 2017. – № 2 (104). – S 103–108.
10. Sahno, K.N. Kompensacija otklonenij pri sborke trub s soedinenijami /K.N. Sahno // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehniczeskogo universiteta. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2011. – № 2. – S. 43–48.
11. Sahno, K.N. Programmnoe obespechenie «Dopuski-Truby» [Jelektronnyj resurs]: programma dlja JeVM / K.N. Sahno // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2016611625. Zaregistrirvano 08.02.2016.
12. Sahno, K.N. Sposob kompensacii otklonenij pri izgotovlenii trub s soedinenijami / K.N. Sahno // Patent na izobretenie № 2622210. Zaregistrirvano 13.06.2017.

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ С МАЛЫМИ УГЛАМИ ВЫХОДА СОПЕЛ

Андрей Юрьевич Фершалов

кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный Федеральный Университет
(кафедра Судовой энергетики и автоматики), 690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Юрий Яковлевич Фершалов

доктор технических наук, доцент, профессор;
Дальневосточный Федеральный Университет
(кафедра Судовой энергетики и автоматики), 690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Михаил Юрьевич Фершалов

кандидат технических наук, научный сотрудник.
Дальневосточный Федеральный Университет
(кафедра Судовой энергетики и автоматики), 690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Аннотация

Работа посвящена задаче повышения эффективности малогабаритных турбин, используемых в судовых главных и вспомогательных механизмах. В статье рассмотрены вопросы, посвященные результатам анализа влияния на эффективность малогабаритной турбины с углами выхода сопел $5^\circ \dots 9^\circ$ следующих факторов и их сочетаний: отношение давления перед сопловым аппаратом турбины к давлению за ступенью (π_T); отношение площади выходного сечения сопел к площади их критического сечения (\bar{F}); конструктивный угол входа в каналы рабочего колеса (β_{1K}); конструктивный угол выхода сопел (α_{1K}) и отношение окружной скорости рабочего колеса к критической скорости звука на выходе из соплового аппарата (λ_u). Анализ основан на методах имитационного моделирования с использованием регрессионных моделей, полученных на основании результатов модельного эксперимента, проведенного в следующем диапазоне варьирования режимных и конструктивных факторов: $\bar{F} = 1 \dots 2,82$; $\alpha_{1K} = 5^\circ \dots 9^\circ$; $\beta_{1K} = 8^\circ \dots 14^\circ$; $\pi_T = 2,35 \dots 47,1$; $\lambda_u = 0 \dots 0,44$. Результаты оптимизации показали, что эффективность малогабаритной турбины с рассмотренной конструкцией сопел может достигать 62% при $\bar{F} = 1$; $\alpha_{1K} = 5^\circ$; $\beta_{1K} = 8^\circ$; $\pi_T = 19,7$; $\lambda_u = 0,44$.

Ключевые слова: эффективность, судовая энергетическая установка, малогабаритная турбина, сопло, рабочее колесо, турбинная ступень, имитационное моделирование, модельный эксперимент.

EFFICIENCY OF THE SMALL-SIZED TURBINE STAGES WITH SMALL OUTLET ANGLE OF NOZZLES

Andrey Yu Fershalov

Cand.Sci.Tech., assistant professor
Far Eastern Federal University (Department of Ship Energy and Automation)
8 Suhanova St., Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Yuriy Ya, Fershalov

assistant professor, Dr.Sci.Tech., professor
Far Eastern Federal University (Department of Ship Energy and Automation)
8 Suhanova St., Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Mikhail Yu Fershalov

Cand.Sci.Tech., Researcher
Far Eastern Federal University (Department of Ship Energy and Automation)
8 Suhanova St., Vladivostok 690950, Russian Federation
e-mail: rectorat@dvfu.ru

Abstract

The paper is devoted to the task of increasing the efficiency of small-sized turbines, which used in ship main and auxiliary mechanisms. The article presents results of research of a small-sized turbine, which have nozzles with exit angle from 5° to 9° . Influence on the efficiency different constructive and regime factors and their combinations is

analyzed. The following factors are considered in the paper: the ratio of the pressure in front of the turbine nozzle to the pressure behind the turbine (π_T); the ratio of the area of the outlet section of the nozzle to the area of the critical section (\bar{F}); constructive input angle of the rotor blade channels (β_{1K}); constructive exit angle of the nozzle (α_{1K}); the ratio of the circumferential speed of the rotor to the critical speed of sound at the outlet of the nozzles (λ_u). The analysis is based on simulation techniques using regression models obtained on the basis of the results of the model experiment conducted in the following range of varying operating and constructive factors: $\bar{F} = 1 \dots 2.82$; $\alpha_{1K} = 5^\circ \dots 9^\circ$; $\beta_{1K} = 8^\circ \dots 14^\circ$; $\pi_T = 2.35 \dots 47.1$; $\lambda_u = 0 \dots 0.44$. Optimization results showed that the efficiency of a small-sized turbine with the nozzle design discussed can reach 62% with $\bar{F} = 1$; $\alpha_{1K} = 5^\circ$; $\beta_{1K} = 8^\circ$; $\pi_T = 19.7$; $\lambda_u = 0.44$.

Keywords: efficiency, ship power plant, small-sized turbine, nozzle, rotor, turbine stage, simulation modeling, experiment.

Введение

Вопросы повышения экономичности оборудования на судах в настоящее время встают особо остро. Создание конкурентоспособных судов с высокоэффективными энергетическими установками (или модернизация судовых энергетических установок на действующих судах) требует лучшие технические решения по турбинам различного назначения, что крайне важно для морского и речного транспорта.

Значительное повышение экономичности проточных частей полноразмерных судовых и стационарных турбин на данном этапе развития производства невозможно. Однако, резерв повышения экономичности достаточно высок в области «микротурбин», работающих в условиях ограничения массы и габаритов, а также расхода рабочего тела и частоты вращения ротора. Последние применяют в качестве:

- главных двигателей на автономных подводных аппаратах малого водоизмещения;
- приводных двигателей генераторов и насосов;
- привода компрессоров для наддува дизелей и турбодетандеров;

Предпосылкой для выполнения данной работы стало то, что уровень КПД микротурбин турбин определяет возможность ее использования в судовой энергетической установке. В работе были учтены особенности газодинамических процессов в микротурбинах, проявляющиеся в интенсивной временной и пространственной неравномерностью потока рабочего тела.

В ряде случаев, когда жесткое требование к мобильности и массогабаритным показателям ограничивает расход рабочего тела, приходится применять частичный подвод рабочего тела к рабочему колесу. В этом случае эффективность турбинного привода существенно снижается. Для такой области транспортной энергетики, как автономные аппараты различного назначения, эффективность теплового цикла энергоустановки определяет важнейший показатель – автономность аппарата.

Возможное решение вышеуказанной проблемы – использование турбинных ступеней с большим углом поворота потока в рабочих колесах [1] и сопловыми аппаратами с конструктивными углами выхода сопел менее 9° [2]. Данная работа посвящена повышению эффективности сверхзвуковых осевых турбинных

ступеней указанными типами сопел и рабочих колес.

В настоящее время выделяют три подхода к исследованию турбин и их элементов: теоретический, основанный на численном решении уравнений Навье-Стокса (который, несмотря на свою универсальность и перспективность, из-за ряда допущений дает неприемлемо большую погрешность); «полуэмпирические» методики, основанные на разделении потерь энергии на составляющие (которые неприемлемы для исследований малогабаритных турбин из-за невозможности разделения потерь на составляющие в отличие от полноразмерных турбин); методики, основанные на обобщении экспериментальных данных разных авторов методами математической статистики (их использование затруднено тем, что эксперименты проводились при разных условиях и с разной точностью, чаще всего эти данные вообще отсутствуют, в связи с этим указанные модели носят исключительно качественный характер изучаемого явления). Проанализировав методы исследований, в данной работе было принято, что наиболее приемлемым будет использование экспериментального метода [2-4], основанного на математической теории планирования эксперимента. Этот метод обладает рядом преимуществ перед вышеперечисленными методами: устанавливает строгое соответствие между требуемой точностью результатов и числом опытов; результаты представлены в виде эмпирической полиномиальной модели второго порядка, которая наиболее удобна для использования при разработке профиля проточной части турбинной ступени, а также для численных экспериментов и оптимизационных расчетов; форма представления модели позволяет совершенствовать ее при получении новых данных.

Из-за большой погрешности при экспериментальном определении параметров газа в локальных точках, особенно при определении эпюры распределения сверхзвуковых скоростей потока (характерных для микротурбин) в каналах малого сечения, экспериментальные исследования были направлены на определение осредненных, а не локальных газодинамических характеристик газа в ступени микротурбины.

1. Экспериментальная установка

Для сложных комплексных исследований осевых малогабаритных турбин была создана установка, позволяющая определять не только КПД исследуемой ступени, но и оценивать уровень потерь энергии в рабочем колесе и сопловом аппарате [5]. Указанная установка использовалась для изучения различных режимов работы ступеней осевых малогабаритных турбин, работающих при больших значениях отношений давления до соплового аппарата к давлению за ступенью (<40). Ее принципиальная схема показана на рис. 1. Установка позволяла получать характеристики модельных ступеней в широком диапазоне изменения давления путем изменения давления перед соплами сопловых аппаратов от 0,2 до 0,8 МПа и давления за модельной ступенью от 0,1 до 0,015 МПа.

В конструкцию установки входил индукторный тормоз для снятия полезной мощности меньше 150 кВт и регулировки частоты вращения ротора, усилие с него передается через рычаг на датчик силы и регистрируется на частотомере.

Специфика конструкций малогабаритных турбин (малые габаритные размеры проточной части, предельно малые углы выхода потока из сопел сопловых аппаратов, относительно большие осевые и радиальные зазоры между рабочим колесом и сопловым аппаратом, а также между уплотняющими усиками бандажа рабочего колеса и корпусом установки) и условия их работы делают невозможным определять локальные характеристики потока для определения составляющих потерь энергии. Поэтому для получения интегральных характеристик потерь энергии в части турбины применяют взвешивание соплового аппарата и колесо с осевым выходом.

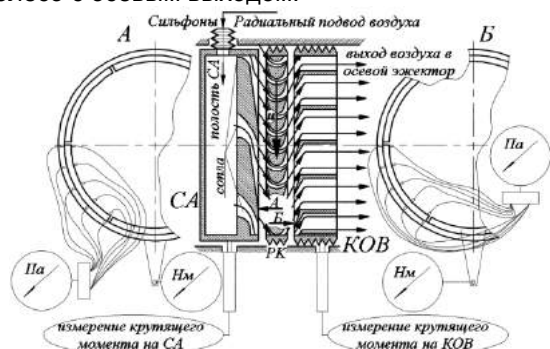


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Взвешенный сопловой аппарат закреплен на подшипнике для обеспечения степени свободы относительно его оси. Усилие, вызывающее момент количества движения, определяется с помощью датчика силы и регистрируется на частотомере.

Устройство для измерения момента силы потока на выходе из рабочего колеса представляет собой колесо с осевым выходом, обеспечивающим выход потока рабочего тела в

осевом направлении. Усилие, создающее момент количества движения на колесе с осевым выходом, фиксируется посредством рычага и датчика силы и регистрируется на частотомере. Чтобы уменьшить утечку рабочего тела через радиальные зазоры рабочего колеса и колеса с осевым выходом, последние выполнены с бандажами, имеющими развитые лабиринтовые уплотнения. Утечка рабочего тела контролировалась перепадом давлений до и после бандажей.

В состав экспериментальной установки входил воздушный эжектор, регулирование которым осуществляется путем изменения площади его критического сечения и параметрами подводимого воздуха.

Результаты экспериментов позволили определить значения коэффициентов нелинейной полиномиальной модели для вычисления КПД турбинных ступеней. Опираясь на полученную модель, было проведено имитационное моделирование различных условий работы микротурбины для определения наиболее влияющих на значение КПД факторов. Анализ основывался на оптимизации КПД по одному фактору, по четырем факторам, а также в виде визуального представления КПД в зависимости от исследуемых факторов.

2. Методика

2.1. Оптимизация по одному фактору

Методика проведения анализа этим методом основана на определении максимального и минимального значений КПД относительно каждого фактора, входящего в модель, в области его варьирования в экспериментах, для остальных факторов значения фиксируются на трех уровнях: минимальное, среднее и максимальное. Значения разниц между максимальным и минимальным величинами модели, для каждого фактора на каждом уровне, ранжируются по возрастанию. Места по степени влияния каждого фактора на каждом уровне суммируются, и чем меньше эта сумма, тем более сильное влияние на исследуемую модель оказывает фактор.

В результате ранжирования факторов по степени влияния на КПД получено, что наибольшее влияние на КПД оказывает lu ($lu = u/a_{1кр} \in [0; 0,44]$ – безразмерная окружная скорость, u – окружная скорость рабочего колеса на среднем диаметре, $a_{1кр} = (334,83T_0^*)^{0,5}$, T_0^* – температура торможения рабочего тела перед соплами соплового аппарата), далее в порядке убывания степени влияния: π_T ($\pi_T = P_0^*/P_2 \in [2,5; 47]$, здесь P_0^* и P_2 – давления торможения перед сопловым аппаратом и статическое за рабочим колесом); \bar{F} ($\bar{F} = f_{вых}/f_{кр} \in [1; 2,82]$ – степень расширения сопел, здесь $f_{вых}$ и $f_{кр}$ – площади сечений сопел выходного (перед косым срезом) и критического); $\alpha_{1К}$ ($\alpha_{1К} \in [5^\circ; 9^\circ]$ – угол выхода сопел) и $\beta_{1К}$ ($\beta_{1К} \in [8^\circ; 14^\circ]$ – угол установки входных кромок лопаток рабочего колеса). По сумме величин разности ($\eta_{max} - \eta_{min}$) степень

влияния факторов на КПД ранжирована в том же порядке.

Для увеличения степени достоверности о том, что по степени влияния на целевую функцию факторы расположены именно в таком порядке были применены нижеизложенные методы.

2.2. Четырехмерная оптимизация

Смысл анализа этим методом сводился к нахождению максимального и минимального значений исследуемых функций с помощью решения задачи оптимизации функций при фиксированном значении одного фактора с ограничениями в виде границ области проведенного эксперимента. Каждый фактор принимает поочередно три значения: минимальное, среднее и максимальное. Далее вычисляется разница между максимальным и минимальным значениями функций для каждом факторе на всех уровнях. Затем эти значения ранжируются в порядке убывания. Чем сильнее влияние фактора на функцию – тем больше разница. Проведенный таким методом анализ, с учетом погрешностей, не выявил статистически различную степень влияния на регрессионные модели исследуемых факторов.

3. Анализ результатов

Визуальный анализ предполагает проведение анализа чувствительности результата, полученного расчетным путем и представляющего собой изменения его величины при варьировании значений факторов в исследованных пределах. Это позволит проверить правильность принимаемых решений и выводов о связи изучаемой функции с исследуемыми переменными. Для этого был выполнен численный эксперимент с применением элементов имитационного моделирования на базе полученных эмпирических полиномиальных моделей. Результаты приведены в виде графических зависимостей.

Наиболее сильно на η влияет безразмерная окружная скорость, величины изменения остальных факторов примерно одинаковые (см. рис. 2 и 3).

На рис. 2 представлено графическое изображение зависимости η при минимальных значениях факторов.

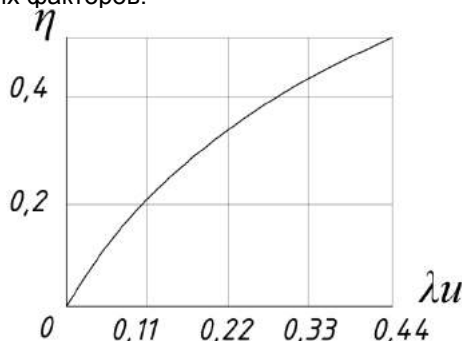


Рис. 2. Зависимость η при минимальных значениях факторов: $\eta = \xi_{\eta}(\lambda u)$ при $\bar{F}=1$; $\alpha_{1K}=5^{\circ}$; $\beta_{1K}=8^{\circ}$; $\pi_T=3,5$

Как видно максимальный уровень КПД при таких параметрах невысок, оптимизационные вычисления показали, что максимальное значение КПД, в рамках проведенного исследования,

находится в районе 0,62 ($\bar{F}=1$, $\alpha_{1K}=5^{\circ}$, $\beta_{1K}=8^{\circ}$, $\lambda u=0,44$ ($u/c_0=0,237$) и $\pi_T=19,7$). Это связано с тем, что при малых углах выхода сопел оптимальное значение π_T смещается в сторону больших значений из-за увеличения расширительной способности косога среза сопел. Которая существенно зависит от характера отраженных от кромок лопаток рабочих колес возмущений потока в виде скачков уплотнения и вихрей, генерируемых лопатками рабочего колеса. Эти возмущения при оптимальных условиях работы турбинной ступени препятствуют отрыву потока рабочего тела от спинки сопел соплового аппарата, что значительно улучшает условия течения газа в проточной части турбины.

При условии моделирования на средние значения факторов (рис. 3) максимальное значение КПД практически не изменилось. По всей видимости, это связано с увеличением α_{1K} до 7° , что соответствует более низкому уровню π_T , относительно ступени с $\alpha_{1K}=5^{\circ}$, однако анализ проводился при $\pi_T=24,7$. Кривые, характеризующие изменение КПД 1, 2, 3 и 5 имеют невысокие значения из-за того, что $\lambda u=0,22$, что является величиной в два раза меньшей при которой было получено максимальное значение КПД (хотя и она также далека от глобального оптимума, что позволяет надеяться на получение более высокого значения КПД при условии наличия технической возможности повысить окружную скорость рабочего колеса).

На рис. 4 видно, что при максимальных значениях факторов наибольшее изменение η происходит при варьировании λu , на втором месте варьирование α_{1K} , остальные кривые имеют примерно одинаковый характер. Максимальное значение КПД в данном случае не отличается принципиально от КПД в первых двух случаях. Это связано, по всей видимости из-за недорасширения газа в соплах при $\alpha_{1K}=9^{\circ}$ (кривые 1, 3, 4, и 5, см. рис. 4) и несоответствии оптимальным значениям угла выхода сопел и угла установки входной кромки лопаток рабочего колеса (кривая 2, см. рис. 4), что делает неоптимальными углы атаки потока на них и приводит к отрыву потока при входе газа в каналы рабочего колеса.

Для повышения эффективности турбинных ступеней, рассмотренного типа предусмотрены работы по совершенствованию сопел сопловых аппаратов [5, 6] и рабочих колес [7, 8], а также определению параметров газа в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом [9, 10]. При необходимости переноса результатов исследования на другие условия работы турбины (в частности другое рабочее тело) следует использовать рекомендации по физическому моделированию газодинамических процессов, представленные в работе [11].

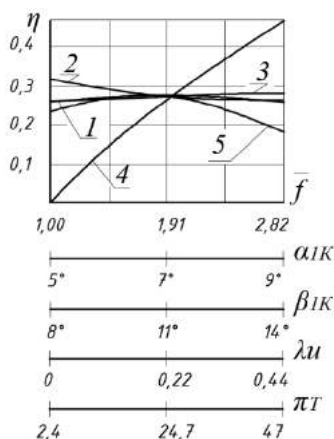


Рис. 3. Зависимость η при средних значениях факторов:

- 1 – $\eta = \xi_{\eta}(\bar{f})$ при $\alpha_{1K} = 7^\circ$; $\beta_{1K} = 11^\circ$; $\lambda u = 0,22$; $\pi T = 24,7$;
- 2 – $\eta = \xi_{\eta}(\alpha_{1K})$ при $\bar{f} = 1,91$; $\beta_{1K} = 11^\circ$; $\lambda u = 0,22$; $\pi T = 24,7$;
- 3 – $\eta = \xi_{\eta}(\beta_{1K})$ при $\bar{f} = 1,91$; $\alpha_{1K} = 7^\circ$; $\lambda u = 0,22$; $\pi T = 24,7$;
- 4 – $\eta = \xi_{\eta}(\lambda u)$ при $\bar{f} = 1,91$; $\alpha_{1K} = 7^\circ$; $\beta_{1K} = 11^\circ$; $\pi T = 24,7$;
- 5 – $\eta = \xi_{\eta}(\pi T)$ при $\bar{f} = 1,91$; $\alpha_{1K} = 7^\circ$; $\beta_{1K} = 11^\circ$; $\lambda u = 0,22$.

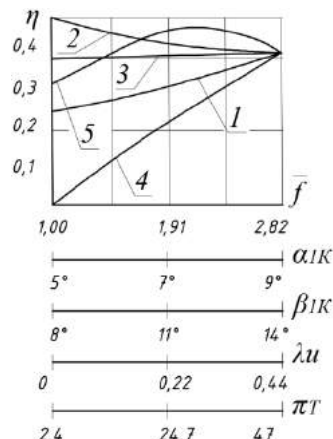


Рис. 4. Зависимость η при максимальных значениях факторов:

- 1 – $\eta = \xi_{\eta}(\bar{f})$ при $\alpha_{1K} = 9^\circ$; $\beta_{1K} = 14^\circ$; $\lambda u = 0,44$; $\pi T = 47$;
- 2 – $\eta = \xi_{\eta}(\alpha_{1K})$ при $\bar{f} = 2,82$; $\beta_{1K} = 14^\circ$; $\lambda u = 0,44$; $\pi T = 47$;
- 3 – $\eta = \xi_{\eta}(\beta_{1K})$ при $\bar{f} = 2,82$; $\alpha_{1K} = 9^\circ$; $\lambda u = 0,44$; $\pi T = 47$;
- 4 – $\eta = \xi_{\eta}(\lambda u)$ при $\bar{f} = 2,82$; $\alpha_{1K} = 9^\circ$; $\beta_{1K} = 14^\circ$; $\pi T = 47$;
- 5 – $\eta = \xi_{\eta}(\pi T)$ при $\bar{f} = 2,82$; $\alpha_{1K} = 9^\circ$; $\beta_{1K} = 14^\circ$; $\lambda u = 0,44$

Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено, что эффективность рассмотренных в статье ступеней малогабаритных турбин с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата может достигать 62%, что делает их перспективными для использования в энергетических установках различного назначения.

Работа выполнена при поддержке Фонда Целевого Капитала Дальневосточного федерального университета.

Литература

[1] Кириллов, И.И. Патент на изобретение № 857512 (СССР). Осевая турбина / Ленинградский политехнический институт, 1981.

[2] Фершалов, Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Дальневосточной государственной технической университет, Владивосток, 2000, 153 с.

[3] 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.

[4] Фершалов, М.Ю. Многофакторный анализ степени реактивности судовых осевых малорасходных турбин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 2014, 128 с.

[5] Fershalov, Yuriy Yu., Sazonov, Timofei V. (2014). Experimental research of the nozzles. Advanced Materials Research, 915-916, 345-348.

[6] Sazonov, Timofey V., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Andrey Yu., Ibragimov, Damir I. (2014). Experimental installation for the study of nozzles microturbines. Applied Mechanics and Materials, 635-637, 155-158.

[7] Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Sazonov, Timofey V. (2015). Results of the Study Rotor Wheels Supersonic Microturbines with a Large Angle of Rotation of the Flow. Applied Mechanics and Materials, 752-753 pp 884-889.

[8] Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Mikhail Yu., Sazonov, Timofey V., Ibragimov, Damir I. (2014), Analysis and optimization of efficiency rotor wheels microturbines. Applied Mechanics and Materials, 635-637, 76-79.

[9] Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Yuriy Yu. (2014). Calculation reactivity degree for axial low-account turbines with small emergence angles of nozzle devices. Advanced Materials Research, 915-916, 341-344.

[10] Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Andrey Yu., Sazonov, Timofey V., Ibragimov, Damir I. (2014). Microturbines degree of reactivity. Applied Mechanics and Materials, 635-637, 354-357.

[11] Fershalov, Yu. Ya. (2012). Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages. *Russian Aeronautics*, 4(55), 424-429.

References

- [1] Kirillov, I.I. Patent na izobreteniyе № 857512 (SSSR). *Osevaya turbine. Leningradskiy politekhnicheskyy institut, 1981.*
- [2] Fershalov, Yu.Ya. Sovershenstvovaniye sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, Vladivostok, 2000, 153 s.*
- [3] 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.*
- [4] Fershalov, M.Yu. Mnogofaktornyy analiz stepeni reaktivnosti sudovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, Vladivostok, 2014, 128 s.*
- [5] Fershalov, Juriy Yu., Sazonov, Timofei V. (2014). Experimental research of the nozzles. *Advanced Materials Research, 915-916, 345-348.*
- [6] Sazonov, Timofey V., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Andrey Yu., Ibragimov, Damir I. (2014). Experimental installation for the study of nozzles microturbines. *Applied Mechanics and Materials, 635-637, 155-158.*
- [7] Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Sazonov, Timofey V. (2015). Results of the Study Rotor Wheels Supersonic Microturbines with a Large Angle of Rotation of the Flow. *Applied Mechanics and Materials, 752-753 pp 884-889.*
- [8] Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Mikhail Yu., Sazonov, Timofey V., Ibragimov, Damir I. (2014). Analysis and optimization of efficiency rotor wheels microturbines. *Applied Mechanics and Materials, 635-637, 76-79.*
- [9] Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Andrey Yu., Fershalov, Juriy Yu. (2014). Calculation reactivity degree for axial low-account turbines with small emergence angles of nozzle devices. *Advanced Materials Research, 915-916, 341-344.*
- [10] Fershalov, Mikhail Yu., Fershalov, Yuriy Ya., Fershalov, Andrey Yu., Sazonov, Timofey V., Ibragimov, Damir I. (2014). Microturbines degree of reactivity. *Applied Mechanics and Materials, 635-637, 354-357.*
- [11] Fershalov, Yu. Ya. (2012). Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages. *Russian Aeronautics, 4(55), 424-429.*

КОМПЕНСАЦИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

Вьет Жа Нго

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

Константин Николаевич Сахно

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Судостроение и энергетические комплексы морской техники"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Аннотация

В представленной работе авторами рассматривается актуальная проблема повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектировании. Представлены пути решения вопроса изготовления и монтажа судовых трубопроводов без снятия размеров по месту. Рассмотрена возможность использования поворота пар параллельных участков труб совместно с технической операцией отрезки припусков для полной компенсации суммарных отклонений трасс трубопроводов, возникающих в процессе изготовления труб и сборки корпусных конструкций, а также механизмов и оборудования судовых систем. Составлен алгоритм определения компенсационного уровня трассы и разработана методика определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов и значений припусков, назначаемых на пригоняемых трубах трассы для расширения области компенсации в необходимых направлениях. Авторами представляются способ перемещения трассы с использованием поворотов пар параллельных участков труб для компенсации суммарных отклонений и технология монтажа трубопроводов из готовых труб, изготавливаемых по проектной информации без уточнения размеров по месту.

Ключевые слова: трубопроводы, судовые системы, проектирование, монтаж, отклонение, параллельные участки труб, область компенсации, припуск.

COMPENSATION FOR DEVIATION OF SHIP'S PIPELINE ROUTES

Viet G. Ngo

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com

Konstantin N. Sakhno

the associate professor, Dr. Sci. Tech., the professor of the department "Shipbuilding and marine power engineering complexes"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Abstract

In the article, the authors examine the problem of enhancing the technological features of ship's pipeline systems at the designing stage. Moreover, it introduces the solutions for questions of ship pipeline's manufacturing and assembling without measuring the actual size of the ship. The possibility of using the rotating method for paralleling pipe sections simultaneously with technical operation of removing the technical allowances of the pipelines is taken into consideration to fully compensate the

total deviations of pipelines routes, which was arisen not only in process of pipes' manufacturing but also in hull, mechanisms, and equipment's assembling. An algorithm for determining the compensation level of the pipeline route is established. Based on the results of the researching process, the method to determine the compensation possibilities of pipeline routes and values of technical allowances is established, which was appointed on fitting pipes for expansion in the compensation field in possible directions. The authors presents the method of pipeline displacement by using the rotation method to rotate the parallel sections of the pipelines for compensating total deviations, and the technology of assembling the pipeline systems from prepared pipes, which was produced by designing information without measuring the actual size of the ship.

Key words: pipelines, ship systems, design, installation, deviation, parallel sections of pipe, field of compensation, overdimension.

Введение

В работах [1-2] проведены теоретические исследования компенсационных возможностей трасс трубопроводов судовых систем и разработано математическое описание области компенсации. Установлено, что для компенсации суммарных отклонений и успешного монтажа трасс трубопроводов с пригоняемыми трубами необходимо в трассе иметь пары параллельных участков труб со свободными соединениями, которые в процессе монтажа дают возможность перемещать трассу, компенсируя возникающие отклонения как труб, так и соседних конструкций в направлениях, которые нельзя компенсировать за счёт припусков на пригоняемой трубе.

На основе результатов проведённых исследований разработаны методологические основы для повышения технологичности трубопроводов при выполнении судостроительных заказов:

- методика определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов и значений необходимых припусков, назначаемых на пригоняемых трубах;

- метод компенсации отклонений трасс трубопроводов вращением пар параллельных участков с использованием необходимых припусков при монтаже судовых систем.

1. Методика определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов

Результаты исследований, проведённых в работах [1-6], подтверждают возможность монтажа трасс трубопроводов без применения труб, конфигурацию которых требуется уточнять по месту (забойных труб). Вместо забойных труб используются пригоняемые трубы с назначением припусков при необходимости. При этом, все трубы трассы изготавливаются в задел в цехе по проектным размерам.

Для компенсации отклонений, возникающих в процессе изготовления труб и монтажа систем, определены к использованию параллельные участки с соединениями труб трасс трубопроводов. Параллельные участки являются элементом конфигурации трасс трубопроводов, повороты которых позволяют компенсировать

суммарные отклонения перемещением трассы трубопровода.

Во многих случаях использование пар параллельных участков труб не может полностью компенсировать отклонения, возникающие в процессе сборки трубопроводов судовых систем из готовых труб, которые изготавливаются по проектным размерам. Для полной компенсации суммарные отклонения компенсируются вращением пар параллельных участков труб совместно с выполнением технической операции – отрезка припусков при пригонке соединений на пригоняемой трубе. Данная операция изменяет только конструктивные размеры пригоняемой трубы и не влияет на её проектную конфигурацию.

Пары параллельных участков и указанная техническая операция используются для полной компенсации отклонений трасс трубопроводов судовых систем в следующих сочетаниях:

- 1) параллельные участки, не менее трёх пар;
- 2) параллельные участки и припуск (припуски);
- 3) припуски (не менее трёх).

Рассмотрим подробнее использование предполагаемых сочетаний:

1) В трассе имеется три или более пар параллельных участков, обладающих возможностью полной компенсаций отклонений в трёх направлениях. В данном случае не требуется назначать пригоняемую трубу с припусками, т. е. техническая операция отсутствует.

2) В трассе имеется две или более пар параллельных участков, вращение которых даёт возможность компенсации отклонения в двух направлениях. В этом случае для полной компенсации отклонений используется дополнительный припуск, который назначается на концевом участке пригоняемой трубы в оставшемся направлении.

Если наличие в трассе одной или более пар параллельных участков труб компенсирует отклонение полностью только в одном направлении, то для полной компенсации отклонений в трёх направлениях необходимо

назначить два припуска на пригоняемой трубе, концевые участки которой расположены в двух оставшихся направлениях. При отсутствии в трассе такой трубы необходимо найти два участка на разных трубах, расположенных в двух необходимых направлениях и на них назначить припуски для полной компенсации отклонений.

Если в трассе имеются пары параллельных участков, вращение которых не компенсирует

В указанных случаях для полной компенсации отклонений в трёх направлениях используется вращение пар параллельных участков с дополнительными припусками. При этом в дополнение к элементу компенсации – параллельным участкам – использована технологическая операция отрезки припусков.

3) Если в трассе нет пар параллельных участков, то для полной компенсации отклонений необходимо в трассе иметь три концевых участка, расположенных в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, и на них будут назначены припуски. Для таких трасс в процессе компенсации отклонений использована только технологическая операция отрезки припусков.

При отсутствии возможности компенсации (нет параллельных участков и достаточного количества концевых участков в необходимых направлениях компенсации) и экономической целесообразности использования трёх и более припусков, производится корректировка трассы.

Для реализации данной методики в трубопроводном производстве составлен алгоритм определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов (см. рис. 1).

По результатам проведенных исследований разработана методика определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов и значений необходимых припусков, назначаемых на пригоняемых трубах.

Основные положения методики заключаются в следующем:

1) анализ трасс трубопроводов и подготовка исходных данных. Под исходными данными понимаются координатные размеры трассы и положения свободных соединений в локальной системе координат, точка начала которой совпадает с точкой начала трассы;

2) поиск в трассе параллельных участков со свободными соединениями, которые необходимы для построения области компенсационных возможностей;

3) определение области компенсационных возможностей трассы. На основании результата

отклонения полностью ни в одном направлении, то для таких трасс требуется назначение трёх припусков в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. При этом припуски назначаются на двух или трёх пригоняемых трубах. Компенсация начинается вращением пар параллельных участков для частичной компенсации и использованием припусков для компенсации оставшихся отклонений.

поиска параллельных участков со свободными соединениями проведен расчёт области компенсационных возможностей трассы. Область компенсации представлена в виде максимального и минимального значений компенсационных возможностей в трёх координатных направлениях.

4) проведение сравнительного анализа параметров области компенсации и параллелепипеда отклонений по трём координатным направлениям;

5) определение уровня компенсации трассы и предполагаемого метода расширения области компенсации для полной компенсации суммарных отклонений;

6) определение значения назначаемых припусков, при необходимости;

7) проведение изменений размеров пригоняемых труб припусками в проектных чертежах для подготовки к изготовлению.

Если полученная область компенсации по результатам сравнительного анализа полностью поглощает параллелепипед отклонений, то все отклонения, возникающие в процессе монтажа трассы из готовых труб могут быть компенсированы с использованием поворотов пар параллельных участков со свободными соединениями. При этом в трассе не требуется назначение припусков.

Если область компенсации, полученная при вращении параллельных участков труб, не полностью поглощает параллелепипед отклонений, то в трассе необходимо назначить технические припуски. Припуски назначаются на концевых прямых участках пригоняемых труб в направлениях, совпадающих с направлениями отклонений. Таких участков в трассе может оказаться несколько, поэтому для каждого припуска необходимо выбрать самый оптимальный участок, на котором будут назначать припуск.

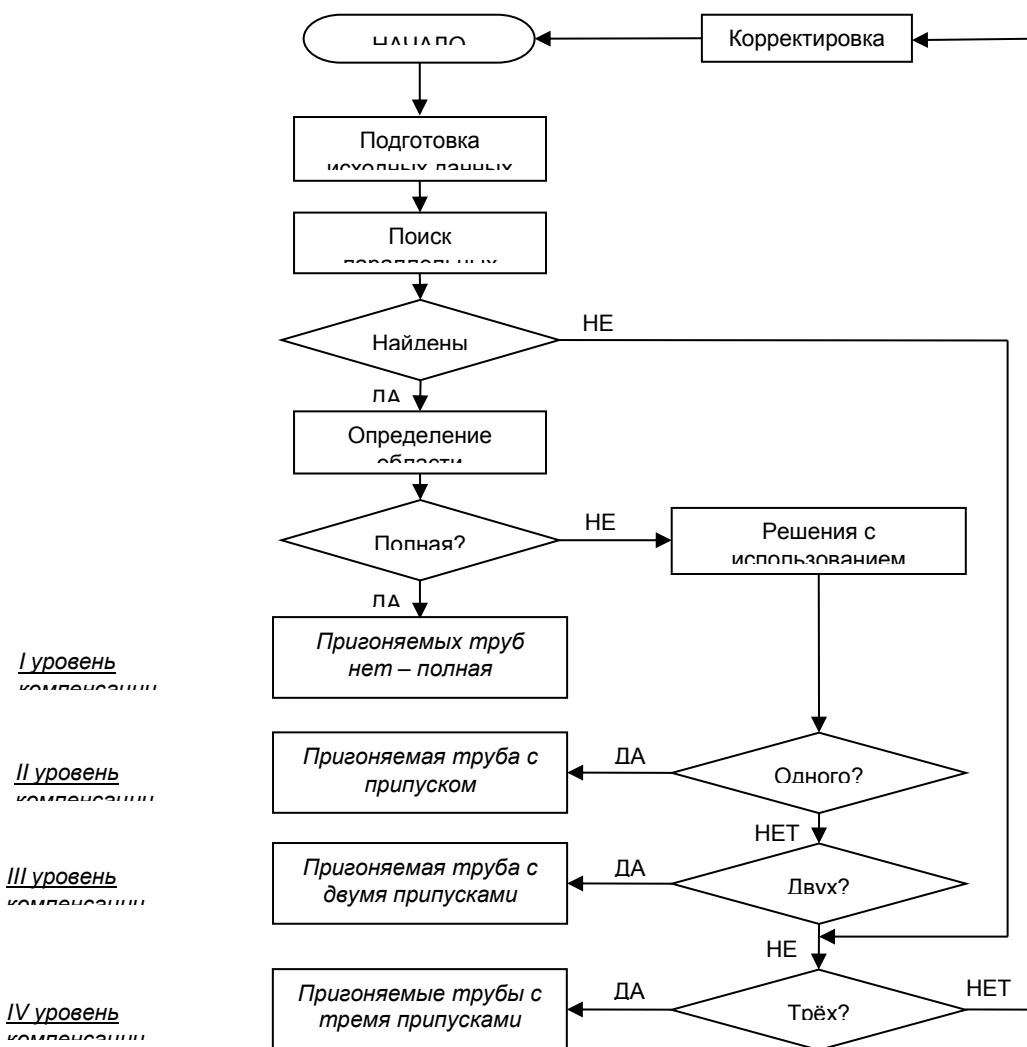


Рис. 1. Алгоритм определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов

Проводится выбор оптимального участка в следующей приоритетной последовательности (принципу):

1) Трасса с одним припуском:

- назначение припуска на участке трубы, которая расположена на краю трассы. При этом монтаж трассы осуществляется с другого края трассы;

- назначение припуска на участке трубы с достаточной длиной и удобного для технической операции отрезки лишнего припуска.

2) Трасса с двумя или тремя припусками:

- назначение двух припусков на двух концевых участках одной пригоняемой трубы в трассе с двумя припусками. В трассе с тремя припусками необходимо назначить два любых из них на двух концевых участках одной (пригоняемой) трубы, а оставшийся припуск назначается на другой пригоняемой трубе. В этом случае имеется одна пригоняемая труба в трассе с двумя припусками или две пригоняемые трубы в трассе с тремя припусками;

- назначение припусков на участках труб, расположенных на краях трассы. В этом случае монтаж трассы осуществляется от середины к краям;

- назначение припуска на участке трубы с достаточной длиной и удобного для технической операции отрезки лишнего припуска.

Если в трассе нет концевых участков, расположенных в необходимых направлениях для назначения припусков, то требуется корректировка трассы. После корректировки трассы необходимо проводить повторный расчёт области компенсационных возможностей трассы. Корректировка проектной трассы может быть проведена несколько раз до получения трассы с возможностью полной компенсации отклонений.

2. Метод компенсации отклонений трасс трубопроводов при их монтаже

Монтаж трасс, не имеющих пригоняемых труб

Трасса монтируется из готовых труб, изменение каких-либо конструктивных размеров которых не предполагается:

1. Ознакомиться с техническими чертежами и документацией трассы, касающимися порядка монтажа труб.
2. Начать монтаж трассы с начальной трубы трассы, т. е. с одной из труб, присоединяемых к жёстко фиксированному соединению.
3. Предварительно смонтировать все остальные трубы трассы.
4. Замерить величины отклонений между концом последней трубы трассы и положением второго жёстко фиксированного соединения.
5. Найти в выпускаемой документации и технических указаниях чертежа трассы предполагаемые методы компенсации отклонений в разных направлениях.
6. Проводить перемещение трассы с использованием поворотов указанных пар параллельных участков для совмещения конца трассы со вторым жёстко фиксированным соединением.
7. Зафиксировать положение трассы и собрать все соединения трассы окончательно.

Монтаж трасс, имеющих пригоняемые трубы с припусками

1. Ознакомиться с техническими чертежами и документацией трассы, касающимися порядка монтажа труб.
2. Начать монтаж трассы с указанной для начала монтажа трубы. Если в трассе имеется только одна пригоняемая труба, расположенная на краю трассы, непосредственно присоединяемая к жёстко фиксированному соединению, то монтаж начинается со стороны непригоняемой трубы, присоединяемой к

жёсткому соединению в противоположном направлении. Если пригоняемая труба расположена между двумя жёстко фиксированными соединениями, или в трассе имеются две пригоняемые трубы, то монтаж начинается с двух концевых направлений трассы.

3. Предварительно смонтировать все остальные трубы трассы.
4. Замерить величины отклонений между концом последней трубы трассы и положением второго жёстко фиксированного соединения.
5. Найти в выпускаемой документации и технических указаниях чертежа трассы предполагаемые способы перемещения трассы с использованием поворотов указанных пар параллельных участков в разных направлениях.
6. Проводить перемещение трассы с использованием поворотов указанных пар параллельных участков для частичной компенсации отклонений в возможных направлениях.
7. Зафиксировать положение трассы после её перемещения
8. Замерить величины отклонения (отклонений), оставшегося в направлении, на котором назначается припуск (припуски) и отметить на пригоняемой трубе положение совмещения соединений.
9. Осуществить техническую операцию отрезки лишних припусков на пригоняемой трубе.
10. После обработки пригоняемой трубы осуществить пригонку трассы.
11. Зафиксировать положение трассы и собрать все соединения трассы окончательно.

Рассмотрим порядок действий при монтаже трассы трубопроводов, схема которой изображена на рисунке

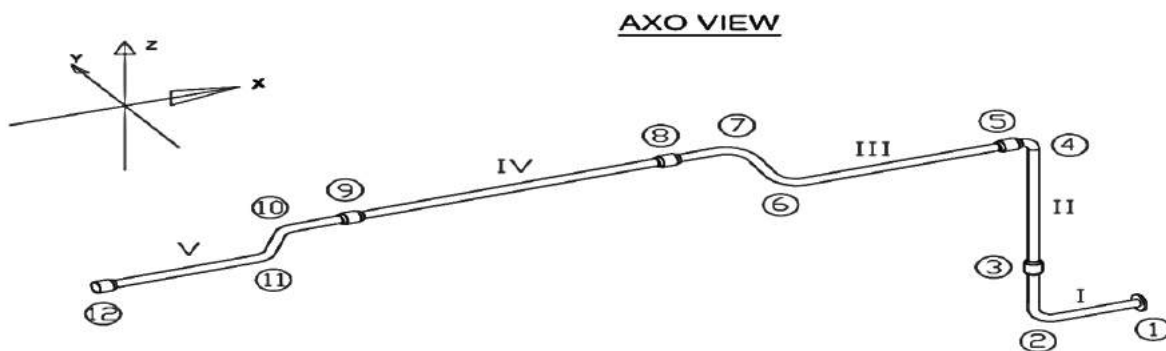


Рис. 2. Схема монтируемой трассы

Трасса состоит из пяти труб, соединённых свободными соединениями. Оба конца трассы

присоединяются к жёстко фиксированным соединениям.

В трассе имеются три пары параллельных участков (1-2 и 4-5; 5-6 и 7-8; 9-10 и 11-12), обладающие возможностью компенсации отклонений в двух направлениях Y и Z. Для полной компенсации всех возможных отклонений в трёх координатных направлениях необходимо назначить технический припуск на концевом участке пригоняемой трубы в направлении X. В качестве пригоняемой трубы принимают трубу 5.

Монтаж трассы начинается со стороны непригоняемой трубы, т.е. трубы 1. После монтажа трубы 1 к первому жёстко фиксированному соединению предварительно монтируем все остальные трубы трассы и замеряем величины отклонений между концом последней трубы трассы и положением второго жёстко фиксированного соединения.

Вращаем пару параллельных участков 1-2 и 4-5 для компенсации отклонения в направлении

оси Y. При неполной компенсации дополнительно используем вращение пары участков 9-10 и 11-12. Далее вращаем пару параллельных участков 5-6 и 7-8 для компенсации отклонения в направлении оси Z.

После этого замеряем величину отклонения, оставшегося в направлении оси X и отмечаем на пригоняемой трубе положение совмещения соединений. Пригоняемая труба снимается с трассы и отрезается лишний припуск в цехе. После этого осуществляем пригонку трассы и собираем все соединения окончательно. Монтаж трассы завершён.

На рисунке 3 показан пример монтажа трассы трубопроводов с компенсацией суммарных отклонений на судне типа «Damen Platform Supply Vessel 3300 CD» [7, 8].



Рис. 3. Монтаж трассы трубопроводов из готовых труб, изготавливаемых по проектной информации
 а – трубы, изготавливаемые по проектной информации, которые отправляются для монтажа на судне;
 б – фактические отклонения конца трассы в трёх координатных направлениях;
 в, г – положения совмещения соединений трассы после компенсации отклонений.

Способ перемещения трассы с использованием поворотов пар параллельных участков труб

Для перемещения трассы с использованием поворотов пар параллельных участков необходимо после обработки результатов расчёта области компенсации выпускать документацию, в которой указаны пары параллельных участков и направления, в которых можно осуществить перемещение трассы. Каждая пара параллельных участков даёт возможность перемещения трассы только в одном направлении, поэтому для полной компенсации отклонений необходимо в трассе иметь три или более пар параллельных участков.

Порядок перемещения трассы вращением пар параллельных участков:

1. Замерить величины отклонений конечной точки трассы после предварительного монтажа в трёх координатных направлениях.

2. Оценить влияние вращения одной пары параллельных участков в одном координатном направлении на отклонения конца трассы в других направлениях и повернуть трассу в месте первого соединения пары параллельных участков.

2.1. При положительной оценке, т. е. вращение пары параллельных участков не влияет на положение конца трасс в других направлениях, поворачивается труба, которой принадлежит первый параллельный участок так, чтобы последнее соединение трубы, которой принадлежит второй параллельный участок, переместилось на замеренную величину. В результате поворота первого параллельного участка ось второго параллельного участка и точка теоретического положения конца трассы, или положение жёстко фиксированного соединения расположены в одной плоскости, перпендикулярной направлению перемещения трассы, т. е. направлению, в котором проведена компенсация отклонения.

2.2. При отрицательном оценке, т. е. вращение пары параллельных участков влияет на положение конца трассы в других направлениях, в зависимости от направления и значения этого смещения поворачивается труба, которой принадлежит первый параллельный участок так, чтобы последнее соединение трубы,

которой принадлежит второй параллельный участок, переместилось на величину, близкую к замеренной величине. Далее проводим поворот другой пары параллельных участков для компенсации этого смещения и проверяем положение соединения второго параллельного участка. Поворот пар параллельных участков может быть осуществлен несколько раз. В результате поворота первого параллельного участка ось второго параллельного участка и точка теоретического положения конца трассы, или положение жёстко фиксированного соединения, должны быть расположены в одной плоскости, перпендикулярной направлению перемещения трассы, т. е. направлению, в котором проведена компенсация отклонения.

3. Повернуть трассу в месте второго соединения в обратном направлении на угол поворота первого участка для сохранения параллельности участков части трассы, расположенной за вторым параллельным участком.

Заключение

В представленной работе рассмотрена возможность использования поворота пар параллельных участков труб совместно с технической операцией отрезки припуски для полной компенсации суммарных отклонений трасс трубопроводов судовых систем. Установлено, что для компенсации суммарных отклонений и успешного монтажа трасс трубопроводов с пригоняемыми трубами необходимо в трассе иметь пары параллельных участков труб со свободными соединениями, которые дают возможность перемещать трассу, компенсируя возникающие отклонения в направлениях, которые нельзя компенсировать за счёт припусков на пригоняемой трубе.

Составлен алгоритм определения компенсационного уровня трасс и разработана методика определения компенсационных возможностей трасс трубопроводов и значений необходимых припусков, назначаемых на пригоняемых трубах.

Представлены способ перемещения трассы с использованием поворотов пар параллельных участков труб для компенсации суммарных отклонений и технология монтажа трубопроводов из готовых труб, изготавливаемых по проектной информации без уточнения размеров по месту.

Литература

1. Нго Ж. В. Исследование компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов судовых систем / Ж. В. Нго, К. Н. Сахно // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 157–164.
2. Сахно К. Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / К. Н. Сахно. – Астрахань, 2012. – 353 с.
3. Сахно К. Н. Преимущества использования взаимно параллельных участков трубопровода при проектировании труб, проходящих под зашивкой судовых помещений / К. Н. Сахно, Во Чунг Куанг // Вестник

Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2014. – № 2. – С. 99–104.

4. Сахно К. Н. Исследование компенсационных возможностей прямых труб в трассах с погибами / К. Н. Сахно, Нго Жа Вьет // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, – 2016. – № 1. – С. 29–37.

5. Сахно К. Н. Технология изготовления и монтажа трасс трубопроводов по проектной информации / К. Н. Сахно, Во Куанг Чунг, Нго Вьет Жа // Естественные и технические науки. Серия: технические науки. – Изд. «Спутник+» – 2017. – № 2 (104). – С. 103–108.

6. Kim S.-H. The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization / S.-H. Kim, W.-S. Ruy, B. S. Jang // International journal of naval architecture and ocean engineering. – 2013. – Vol. 5. – Is. 3. – Pp. 468–477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.

7. Damen platform supply vessel 3300 CD. Damen shipyard gorinchem.

8. Platform supply vessel – Damen PSV series. Damen shipyard gorinchem.

References

1. Ngo G. V. Issledovanie kompensatsionnykh vozmozhnostey proektnoy trassirovki truboprovodov sudovykh sistem / G. V. Ngo, K. N. Sakhno // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. – 2017. – Т. 9. – № 1. – P. 157–164
2. Sakhno K. N. Nauchnye osnovy povysheniya tekhnologichnosti truboprovodov sudovykh sistem na stadii proektirovaniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk / K. N. Sakhno. – Astrakhan', 2012. – 353 s.
3. Sakhno K. N. Preimushchestva ispol'zovaniya vzaimno parallel'nykh uchastkov truboprovoda pri proektirovanii trub, prokhodyashchikh pod zashivkoy sudovykh pomeshcheniy / K. N. Sakhno, Vo Chung Kuang // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2014. – № 2. – С. 99–104.
4. Sakhno K. N. Issledovanie kompensatsionnykh vozmozhnostey pryamykh trub v trassakh s pogibami / K. N. Sakhno, Ngo Gia Viet // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – Astrakhan', – 2016. – № 1. – С. 29–37.
5. Sakhno K. N. Tekhnologiya izgotovleniya i montazha trass truboprovodov po proektnoy informatsii / K. N. Sakhno, Vo Kuang Chung, Ngo Viet Gia // Estestvennye i tekhnicheskije nauki. Seriya: tekhnicheskije nauki. – Izd. «Sputnik+» – 2017. – № 2 (104). – С. 103–108.
6. Kim S.-H. The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization / S.-H. Kim, W.-S. Ruy, B. S. Jang // International journal of naval architecture and ocean engineering. – 2013. – Vol. 5. – Is. 3. – Pp. 468–477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.
7. Damen platform supply vessel 3300 CD. Damen shipyard gorinchem.
8. Platform supply vessel – Damen PSV series. Damen shipyard gorinchem.

УДК 629.12.001

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА СУДНА ИЗ ЛИСТОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Максим Ильич Мальцев

аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: max1212993@mail.ru

Анатолий Рашидович Рубан

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты научно-исследовательской работы, проводимой на кафедре судостроения и энергетических комплексов морской техники Астраханского государственного технического университета. Объект исследования – технология изготовления корпуса судна на основе применения неметаллических конструкционных материалов. Цель работы – разработка технологии постройки и внедрение неметаллических конструкционных материалов в судостроении и судоремонте. В работе рассмотрен способ изготовления корпуса судна, включающий в себя изготовление матрицы корпуса, в соответствии с размерами и формой проектируемой лодки, обшивку матрицы лентами из композиционного материала, соединяемых по пазам лент, извлечение матрицы с последующим формированием продольно-поперечного набора, заполнением корпуса судна теплоизоляционным слоем и накладыванием с внутренней части корпуса полос из стеклоткани, образующих пол судна.

Получен патент Российской Федерации на изобретение «Способ формирования корпуса судна из листового композиционного материала» (регистрационный № 2625389).

Ключевые слова: судостроение, формирование корпуса судна, композиционные материалы, стеклопластик, поточная сборка судов.

TECHNOLOGY OF THE HULL FORMATION FROM SHEET COMPOSITE MATERIAL

Maksim I. Maltsev

the postgraduate student of department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: max1212993@mail.ru

Anatoliy R. Ruban

the associate professor, Cand. Sci. Tech.,
the head of department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Abstract

The article presents the results of research work carried out at the Department of shipbuilding and power complexes of marine engineering of Astrakhan State Technical University. The object of research is the manufacturing technology of the hull based on the use of non – metallic structural materials. The purpose of the work is the development of construction technology and the implementation of non – metallic structural materials in shipbuilding and ship repair. The paper considers the method of manufacturing the hull, which includes manufacturing of the hull matrix, in accordance with the size and shape of the projected boat, matrix trim strips of composite material connected by the grooves of the tapes, extraction of the matrix, followed by the formation of a longitudinal-transverse set, filling the hull with a heat-insulating layer and superimposing of the fiberglass strips forming the vessel floor from the inside of the hull.

The patent of the Russian Federation for an invention "A method of forming the hull from sheet composite material" has been received (registration No. 2625389).

Key words: shipbuilding, formation of a hull, composite materials, fiberglass, line assembly of vessels.

Введение

Аддитивная технология сегодня оказывает существенное влияние на целый ряд производственных сфер. В их число входят медицина, строительство, автомобилестроение и космонавтика. Но на этом развитие технологий не останавливается. Композиционные материалы постепенно входят в повседневную жизнь человека. Сегодня почти каждый, так или иначе сталкивается с композиционными материалами пусть это детали автомобиля, декоративные изделия, трубы в квартире или лодка построенная собственноручно [2].

В настоящее время в научных центрах России проводят исследования с целью создания более удобных и дешевых в производстве композиционных материалов.

Проанализировав технические и нормативные источники, характеризующие производство разнообразных конструкций и объектов из композиционных материалов, можно сделать вывод о том, что технология создания корпусов судов из композиционных материалов является еще недостаточно изученной, многие разработки являются «ноу-хау» и широко не освещены в печати.

Актуальность темы изучения композиционных материалов обусловлена необходимостью обновления и модернизации Российского рыболовного флота, предусмотренной Государственной Программой Российской Федерации «Развитие судостроения на 2013-2030 годы».

На данный момент износ рыболовного флота составляет от 70% и выше, а средний возраст промысловой техники превышает установленные сроки эксплуатации. По оценке «Объединенной судостроительной корпорации» (ОСК) в ближайшие 10...15 лет рыбакам города Астрахань потребуется 150...200 новых судов. При этом на рынке отмечается «яхтенный бум». За последние 10 лет потребность у населения в приобретении и использовании водно-моторной

техники возросла. Эксперты объясняют это увеличением доходов среднего класса. Однако, спрос удовлетворяется в основном за счет поставок иностранной техники. Впрочем, по оценкам ОСК в связи с повышением стоимости валюты относительно рубля у отечественных производителей появился шанс занять долю на рынке [1].

1. Анализ и разработка технологии изготовления слоистых конструкций из конструкционного композиционного материала

В настоящее время, технологии изготовления конструкций из композиционного материала заключаются в формировании изделия на специальную форму. При формировании изделий из стеклопластиков на специальную форму, повторяющую конфигурацию детали, наносят слой стеклоармирующего наполнителя определенной толщины, который тут же пропитывается жидким связующим. Затем форму либо закрывают, либо оставляют открытой (в зависимости от принятой технологии). Через несколько часов связующее затвердевает (полимеризуется), и готовое изделие извлекают из формы. Существуют различные методы формирования изделий из стеклопластика: контактный; одновременного напыления рубленного стекловолокна и связующего; формирование эластичным пуансоном; формирование в двух жестких формах без приложения большого давления; формирование гидравлическими прессами; намотка стекловолокнистых материалов с одновременной пропиткой связующим (см. таблицу 1)[3,5].

Данные технологии имеют множество недостатков. Главные из них это: повышенный расход материала, высокая трудоемкость, невозможность поточного производства и т.д.

Таблица 1

Удельная ударная вязкость в зависимости от способа изготовления

Способ изготовления	Предел прочности МПа				Удельная ударная вязкость, Дж/см ²
	растяжение	сжатие	изгиб	срез	
Контактный	220	190	320	87	17
Вакуумное обжатие	250	120	190	100	17
Прессование	150	110	120	70	16
Напыление	10	105	110	-	12

Высокий технический результат можно прогнозировать, благодаря технологии формирования корпуса судна из листового композиционного материала, раскраиваемого на полосы и собираемого по пазам. Данный способ можно использовать в серийном производстве судов из композиционного материала.

2. Отработка методики испытаний слоистых материалов из композиционных материалов

В ходе работы были изготовлены 2 партии образцов из композиционного материала. Первая партия образцов изготовлена с применением

самой трудоемкой технологии – ручным формованием. Все образцы были испытаны на растяжение по ГОСТ 11262-80 на гидравлической универсальной машине «АМСЛЕР». Методика испытания образцов подробно описана в ГОСТ 11262-80. В результате испытаний были получены величина силы P (или нагрузки) при которой происходит разрыв (или разрушение) и σ временное сопротивление разрыву [4,5].

Вторая партии образцов изготовлена с помощью технологии вакуумной инфузии. Была изготовлена пластина с применением технологии вакуумной инфузии. Данная пластина также была разрезана на образцы для испытания их на растяжение. После проведения испытаний образцы показали значительное увеличение временному сопротивлению разрыву которое составило в среднем 167,4 МПа. Это значение в 3,1 раза больше, чем у образцов изготовленных ручной формовкой. Испытанные образцы представлены на рис. 1.



Рис. 1. Испытанные образцы

Образцы, изготовленные ручной формовкой и вакуумной инфузией, подвергались температурному воздействию по режиму: температура нагрева – 200 °С, время выдержки (нагрева) - 5 часов.

Средняя величина силы, при которой происходит разрыв образцов, не подвергшихся воздействию высокой температуры равна 800 кг, а среднее временное сопротивление разрыву составило 54 МПа. Образцы, которые подверглись температурному воздействию, показали среднюю величину силы, при которой происходит разрыв 500 кг, а среднее временное сопротивление разрыву 46 МПа.

Также была определена твердость данных образцов по результатам пятнадцати кратных измерений по Роквеллу: среднее значение для образцов не подвергающихся отжигу составило 60 HRA, что соответствует 167 HB; для образцов подвергшихся отжигу твердость составила 24 HRC, что соответствует 248 HB.

Данные испытания показали, что образцы, изготовленные с помощью ручной формовки с использованием в качестве армирующего материала стеклоткани, имеют среднее значение временному сопротивлению разрыву 54 МПа, что

на 15 % выше, чем у образцов подвергшихся отжигу. Однако образцы подвергшиеся отжигу показали значение твердости 248 HB, что на 33 % больше, чем у образцов, не подвергшихся воздействию высокой температуры. Исходя из анализа полученных данных, можно полагать, что при воздействии температуры (отжиг) происходит изменение в структуре поверхностного слоя материала. Он становится хрупким и менее пластичным, что отрицательно скажется на механических характеристиках конечного изделия.

3. Проектирование 3D модели опытного образца малого судна

Проектирование, связанное с разработкой и создания 3D модели опытного образца, целесообразно начать с изучения Правил классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП)– далее по тексту Правил.

Приняв во внимание все требования производим проверочный расчет общей прочности.

Изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{изг} = D \times L / K,$$

где: $D = 0,67$ т – водоизмещение судна; $L = 6,64$ м – длина судна; $K = 10$ – коэффициент пропорциональности.

Подставляем слагаемые в формулу и получим $M_{изг} = 0,67 \times 6,64 / 10 = 4,32$ кН×м.

Нормальные напряжения, действующие в корпусе судна должны быть не более значений опасных нормальных напряжений, определяемых по формуле:

$$\sigma_0 = k \times R_m = 0,8 \times 245,25 = 196,2 \text{ МПа},$$

где: $k = 0,8$ – коэффициент снижения прочности свойств материала; $R_m = 245,25$ МПа – временное сопротивление стеклопластика.

Согласно п.8.3.5 Правил при расчетах общей прочности допускаемые нормальные напряжения принимаются равными $0,6 \times \sigma_0$.

Следовательно, допускаемые нормальные напряжения равны:

$$[\sigma] = 0,6 \times \sigma_0 = 0,6 \times 196,2 = 117,75 \text{ МПа}$$

Эквивалентный брус, соответствующий поперечному сечению корпуса судна на миделе представлен на рис. 2.

Расчет сечения производим в системе Компас 3D. Были получены следующие данные:

- момент инерции сечения: $I_x = 2 \times 2,86 \times 10^{-4} = 5,72 \times 10^{-4}$ м⁴;

- отстояние ЦТ сечения от нейтральной оси $e = 0,33$ м.

Момент сопротивления определяется по формуле:

$$W = I_x / e_{\max} = I_x / (H - e) = 5,72 \times 10^{-4} / (0,732 - 0,33) = 1,42 \times 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Напряжения, возникающие в сечении:

$$\sigma = M/W = 4,32 \times 10^3 / 1,42 \times 10^{-3} = 3,04 \text{ МПа} < [\sigma] = 117,72 \text{ МПа}.$$

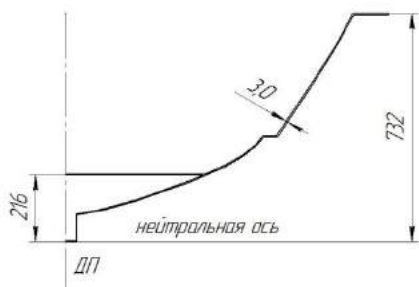


Рис. 2. Эквивалентный брус

Прочность корпуса судна обеспечивается. Согласно выполненным расчетам в программном обеспечении КОМПАС-3D подетально выстраиваем детали корпуса малого рыболовецкого судна. Детали внутренней обшивки и продольно-поперечного набора были изготовлены с применением технологии FDM «FusedDepositionModeling» печати на 3D принтере. Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели (см. рис.3).

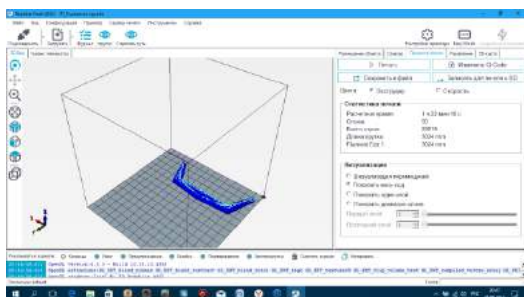


Рис. 3. Слайсинг модели

Модель в формате STL (формат файла, используемый для хранения трехмерных моделей объектов) делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования. Пластиковая нить разматывается с катушки и «скармливается» в экструдер (см. рис.4).

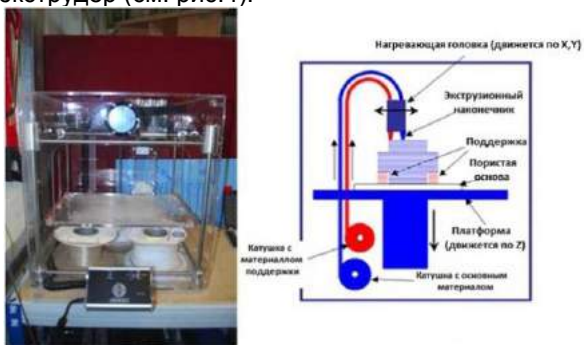


Рис. 4. Схема работы типичного FDM принтера

После того как детали были изготовлены они монтируются на корпусе лодки, тем самым формируется корпус лодки и обеспечивается необходимая прочность (см. рис.5).



Рис. 5. Продольно-поперечный набор судна

4. Изготовление и натурные испытания имитационной модели и (или)опытного образца. Анализ полученных результатов

Имитационная модель лодки была собрана с применением новой технологий «Способ формирования корпуса судна из листового композиционного материала» патент на изобретение № 2625389 [6].

Технология включает в себя несколько стадий:

1. Создание каркаса судна.

Для создания корпуса судна за основу берется теоретический чертеж судна. Судно делится на L/нсечений, начиная с носа. По каждому из сечений изготавливается шаблон диаметральной плоскости в натурный размер. После чего все шаблоны сечений собираются воедино на расстоянии друг от друга и фиксируются (см. рис.6). Материал, применяемый для изготовления шаблона (дерево, алюминий, стеклопластик, пластик).



Рис. 6. Изготовление шаблонов по теоретическому чертежу

2. Создание лент для первого слоя обшивки.

Для создания лент первого слоя обшивки берется за основу теоретический чертеж и изготавливается развертка корпуса судна. После чего борт делится на N лент, размером $l \times b \times h$. Из листа композиционного материала толщиной вырезаются ленты размером $l \times b \times h$ (см. рис.7).



Рис. 7. Разделка корпуса на ленты

3. Сборка корпуса и продольно-поперечного набора.

Каркас обшивается лентами размером $l \times b \times h$ с помощью ручного формования стык в стык по пазам (см. рис. 8). После этой операции выкладывается и формируется с помощью ручной формовки продольный и поперечный наборы для придания заданной прочности. Продольно-поперечный каркас изготавливается на 3D принтере.



Рис. 8. Каркас лодки

4. Создание изоляционного слоя.

Через внутреннюю часть, корпус равномерно заполняется изоляционным материалом на толщину слоя b .

5. Сборка второго слоя обшивки.

Из внутренней части корпус, покрытый изоляционным материалом, равномерно покрывается с помощью ручного формования тремя слоями стеклоткани пропитанной полиэфирной смолой.

Предлагаемая технология позволяет обеспечить поточную сборку судов из композиционного материала, позволяя равномерно загрузить сборочный и формовочный цехи на предприятии.

Полезная модель технологии позволяет сократить количество матриц до одной, упростить извлечение готового судна из матрицы и улучшить характеристики судов.

Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Проанализирована и разработана технология изготовления слоистых конструкций. Получен патент Российской Федерации на изобретение «Способ формирования корпуса судна из листового композиционного материала» (регистрационный № 2625389.)

2. Отработана методика изготовления слоистых материалов из композиционных материалов. Анализ результатов полученных при проведении лабораторных испытаний показал, что стеклопластиковые образцы, состоящие из полиэфирной смолы в качестве связующего материала, и стеклоткани как армирующего материала показывают самые высокие прочностные свойства. Данные материалы подходят для использования в качестве конструкционного материала для постройки малого рыбопромыслового судна, но необходимо продолжить работу по изучению физических, механических и эксплуатационных свойств.

3. Проведены испытания образцов из композиционных материалов.

Были изготовлены образцы с применением технологий вакуумной инфузии и ручной формовки для испытания их на растяжение по ГОСТ 25.601-80. После проведения испытаний образцы, изготовленные с применением вакуумной инфузии показали значительное увеличение временного сопротивления разрыву, которое составило в среднем 167,4 МПа. Это значение в 3,1 раза больше чем у образцов, изготовленных ручной формовкой. Анализ результатов испытаний показал, что технология вакуумной инфузии является наиболее подходящей для изготовления пластин из композиционного материала. Данные пластины будут в дальнейшем применяться при изготовлении судна из композиционного материала по представленной в статье технологии.

4. Разработана математическая модель имитационного и (или) опытного образца малого судна. В процессе работы проводились расчеты: главных размерений проектируемого судна, плавучести опытного образца судна, нагрузки масс, основанные на методиках приближенного определения масс, общей прочности малого рыбопромыслового судна. По результатам расчетов определен класс судна – « $\times O2,0$ ». Район эксплуатации – внутренние водные бассейны, включая устьевые участки с морским режимом судоходства.

5. Спроектирована 3D модель опытного образца малого судна. На базе данной модели изготовлена имитационная модель судна. Корпус построен с применением технологии «Способ формирования корпуса судна из листового композиционного материала» (регистрационный № 2625389), а внутренняя обшивка и продольно-поперечный набор с применением технологии FDM «FusedDepositionModeling». Анализ

полученных испытаний показал, что судно классификации и постройки судов внутреннего полностью отвечает требованиям правил плавания.

Литература

1. Васильев, В.В. Композиционные материалы / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. М.: Машиностроение, 1990. – 512с.
2. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композиционных материалов в судостроении [Электронный ресурс] // V Международный студенческая электронная научная конференция: [сайт]. [2013]. URL: <http://www.scienceforum.ru>. (дата обращения: 7.03.2016).
3. Карпов, Я.С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я.С. Карпов, О.В. Ивановская. Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т, 2001. – 153с.
4. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. М.: Машиностроение, 1990. – 527с.
5. ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах».
6. Способ формирования корпуса судна из листового композиционного материала: пат. № 2625389 Рос. Федерация: RU 2 625 389 C1 / Мальцев М.И., Рубан А.Р.: патентообладатель Мальцев Максим Ильич, Рубан Анатолий Рашидович. – № 2016136113; заявл.07.09.2016; опубл. 13.07.2017, Бюл. № 20. – 3 с.

References

1. Vasil'ev, V.V. Kompozicionnye materialy. M.: Mashinostroenie, 1990.
2. Gumenjuk N.S., Grushin S.S. "Primenenie kompozicionnyh materialov v sudostroenii" [Jelektronnyjresurs]: V Mezhdunarodnyj studencheskajaj elektronnoj nauchnoj konferenciji: [sajt]. [2013]. URL: <http://www.scienceforum.ru>. (datao brashhenija: 7.03.2016).
3. Karpov, Ja.S. Kompozicionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdelija. Har'kov: Nacional'nyj ajerokosmicheskij un-t, 2001.
4. Lahtin, Ju.M. Materialovedenie. M.: Mashinostroenie, 1990.
5. GOST 25.601-80 "Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mehanicheskikh ispytanij kompozicionnyh materialov s polimernoj matricej (kompozitov). Metod ispytaniya ploskih obrazcvo na rastjazhenie pri normal'noj, povyshennoj i ponizhennoj temperaturah".
6. Sposob formirovanija korpusa sudna iz listovogo kompozicionnogo materiala: pat. № 2625389 Ros. Federacija: RU 2 625 389 C1 / Mal'cev M.I., Ruban A.R.: patentoobladatel' Mal'cev Maksim Il'ich, Ruban Anatolij Rashidovich. № 2016136113; zajavl.07.09.2016; opubl. 13.07.2017, Bjul. № 20.

УДК 629.12.037

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА СУДНА ПРОЕКТА ВКМ-3

Гурий Алексеевич Кушнер

аспирант, ассистент кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Виктор Андреевич Мамонтов

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

Алексей Александрович Халявкин

кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Газпром добыча Астрахань»
414000, г. Астрахань, ул. Ленина, 30
e-mail: sopromat112@mail.ru

Василий Владимирович Шахов

старший преподаватель кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: vaskas@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена экспериментальному исследованию поперечных колебаний валопровода натурного судна. Рассматриваются результаты исследования влияния зазора в кормовом дейдвудном подшипнике на частоту и амплитуду поперечных колебаний валопровода судна проекта ВКМ-3. Приведена принципиальная схема измерительного комплекса для регистрации упругих деформаций вращающегося вала. Произведен расчет резонансных частот исследуемого валопровода в двух плоскостях согласно Правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС). Измерения произведены на базе аккредитованного РМРС испытательного центра «Marine Technology Service» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет». По результатам измерений построены тензограммы поперечных колебаний. Получены зависимости нормальных напряжений на поверхности гребного вала от зазора в кормовом дейдвудном подшипнике. Отмечена возможность возникновения резонанса поперечных колебаний в диапазоне рабочей частоты вращения валопровода. Полученные результаты подчеркивают необходимость изучения поперечных колебаний.

Ключевые слова: судовой валопровод, судно проекта ВКМ-3, тензометрирование, резонанс поперечных колебаний, нормальные напряжения, дейдвудный подшипник, поперечные колебания.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TRANSVERSE VIBRATIONS OF PROJECT VKM-3 SHIP SHAFT

Guriy A. Kushner

postgraduate student, the assistant of department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering"
Astrakhan State Technical University,
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Victor A. Mamontov

the assistant professor, Dr. Sci. Tech.,
the professor of department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering"
Astrakhan State Technical University,
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: v.mamontov@mail.ru

Alexei A. Khaljavkin

Cand. Sci. Tech., Lead Engineer of the Gazprom Dobycha Astrakhan Ltd.,
Lenina, 30, Astrakhan, 414000, Russian Federation
e-mail: sopromat112@mail.ru

Vasily V. Shakhov

Senior Lecturer of department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering"
Astrakhan State Technical University,
Tatisheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: vaskas@mail.ru

Abstract

The study of ship's vibrations is of particular importance. The article describes the experimental study of ship shafting vibrations. The authors studies transverse vibrations of ship shaft lines. The article focuses on full-scale experiment on a ship project VKM-3. A schematic diagram of the measuring complex by Astech Electronics and experimental data presented. The resonant frequencies are calculated in accordance with the Rules of «Russian Maritime Register of Shipping» (RMRS). The measurements were carried out on testing center "Marine Technology Service" of the Federal State Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State Technical University". The authors carried out measurements and described tensograms of transverse vibrations. It is noted that the oscillation frequency depends on bearing clearance. The study demonstrated that resonance of transverse vibrations is possible in operating range of rotation frequency. The results confirm the need to study transverse vibrations.

Key words: ship shafting, stern bearing, ship project VKM-3, strain gauge, transverse resonance, tension, transverse vibrations.

Введение

Судовой валопровод в процессе эксплуатации подвергается периодическим знакопеременным нагрузкам, которые приводят к возникновению колебаний. Напряжения, обусловленные вынужденными колебаниями, обычно не представляют опасности для прочности валопровода. При совпадении частоты изменения внешней нагрузки с одной из собственных частот валопровода возникает явление резонанса, длительная работа при котором приведет к поломке. Правила Российского морского регистра судоходства (РМРС) [1] не допускают возникновения поперечных колебаний на всех режимах работы валопровода ещё на этапе проектирования. Согласно результатам исследований [2,3], износ дейдвудного подшипника оказывает значительное влияние на собственную частоту и амплитуду поперечных колебаний валопровода, при которой возникает резонанс поперечных колебаний.

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния величины зазора в дейдвудном подшипнике на частоту и амплитуду поперечных колебаний валопровода маломерного судна проекта VKM-3. В работе поставлена цель экспериментально оценить воздействие поперечных колебаний на работоспособность валопровода с учетом увеличения зазора в дейдвудном подшипнике.

1. Описание измерительного комплекса

Для регистрации и измерения параметров упругих изгибных деформаций гребного вала использован метод динамического

тензометрирования, позволяющий регистрировать упругие деформации вала в условиях быстроизменяющихся нагрузок. На судно устанавливается программно-аппаратный комплекс «Astech Electronics», имеющий Сертификат РМРС, как средство измерения, допустимое для проведения подобных испытаний. В качестве первичных преобразователей применены компенсационные фольговые тензорезисторы.

Испытания проводились в соответствии с Правилами РМРС [1], и инструкцией по эксплуатации измерительного комплекса «Astech Electronics» [4].

На судне установлен стационарный дизель, который размещен в районе мидель-шпангоута. Коленчатый вал двигателя соединен через редуктор карданным валом с подвижным шлицевым соединением и гребным валом с винтом (линейная схема валопровода). Конструкция валопровода позволяет проводить измерения непосредственно на гребном вале. В качестве контрольных точек измерений деформаций выбрано доступное сечение гребного вала с возможным максимальным прогибом при колебаниях (рис. 1).

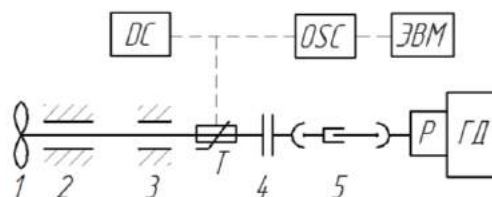


Рис. 1. Схема комплекса измерений колебаний валопровода:

1 - гребной винт; 2,3 - кормовой и носовой дейдвудные подшипники соответственно; 4 - упорный подшипник; 5 - карданный вал; Р - редуктор; ГД - главный двигатель; Т - тензорезисторы; DC - источник постоянного тока; OSC - аппаратный комплекс Astech Electronics; ЭВМ - персональный компьютер с программным обеспечением Astech Electronics

2. Расчет поперечных колебаний согласно правилам РМРС

В состав машинно-двигательного комплекса судна проекта ВКМ-3 входят: главный двигатель СД-240 (4С11/12,5) мощностью 40 кВт с номинальной частотой вращения коленчатого вала 1500 об/мин; реверс-редуктор МА142 с передаточным отношением 3:1; карданный вал с подвижным шлицевым соединением; гребной вал диаметром 40 мм; трёхлопастной винт фиксированного шага.

Согласно РД 5.4307 [5] рабочая частота вращения валопровода не должна быть в критической зоне частот, при прохождении которой возникают поперечные колебания. Расчет проводится по алгоритму, основанному на методе Шиманского Ю.А.

Резонансные частоты поперечных колебаний для данного судна:

- в вертикальной плоскости - 12,4 Гц, частота вращения гребного вала: 744 об/мин;
- в горизонтальной плоскости - 10,3 Гц, частота вращения гребного вала: 618 об/мин.

Следует отметить, что нагрузки на валопровод в горизонтальной плоскости обычно малы, поэтому наличие резонанса вблизи номинальной частоты вращения валопровода не представляет опасности.

3. Результаты экспериментального исследования

Для исследования влияния величины зазора в дейдвудном подшипнике на частоту и амплитуду поперечных колебаний судового валопровода были изготовлены кормовые дейдвудные подшипники из капролона согласно РТМ 31.5034 [6] трёх разновидностей с диаметрными зазорами: 1 мм, 2 мм, 4 мм.

Методика эксперимента заключалась в следующем. После монтажа подшипников, на гребной вал устанавливались тензорезисторы и подключались к измерительной системе. Изменяя частоту вращения валопровода в диапазоне 200-600 об/мин, регистрировались упругие деформации гребного вала. Учтены требования проведения измерений при малой выборке, в эксперименте использовано небольшое число параллельных измерений. Полученные результаты подверглись статистической обработке при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

По средним значениям результатов исследования построены тензограммы поперечных колебаний. В соответствии с рис. 2, при зазоре 1 мм не выявлено резонанса колебаний в рабочем диапазоне частоты вращения валопровода.

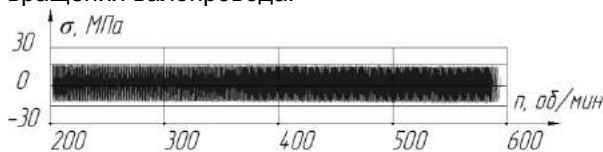


Рис. 2. Тензограмма поперечных колебаний при зазоре 1 мм

В соответствии с рис. 3, на тензограмме поперечных колебаний при зазоре 2 мм выявлена резонансная зона колебаний в рабочем диапазоне частоты 560-590 об/мин.

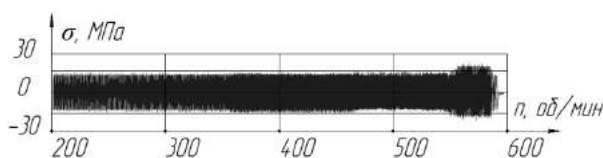


Рис. 3. Тензограмма поперечных колебаний при зазоре 2 мм

В соответствии с рис. 4, на тензограмме поперечных колебаний при зазоре 4 мм выявлена резонансная зона колебаний в рабочем диапазоне частоты 530-580 об/мин.

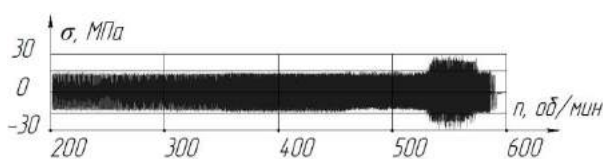


Рис. 4. Тензограмма поперечных колебаний при зазоре 4 мм

Рассчитанные нормальные напряжения при резонансе поперечных колебаний при зазоре 2 и 4 мм составили 20 и 27 МПа соответственно.

Заключение

Экспериментальное исследование на натурном судне позволило изучить влияние зазора в дейдвудном подшипнике на частоту поперечных колебаний гребного вала, а также рассчитать нормальные напряжения при резонансе. Износ элементов валопровода судна приводит к снижению собственной частоты и увеличению амплитуды поперечных колебаний. Эксплуатация валопровода при резонансных частотах может привести к его поломке. Изучение поперечных колебаний позволит глубже понять процессы, происходящие в судовых валах и прогнозировать работоспособность валопровода с учетом износа его элементов.

Дополнительная информация

В заключение авторы выражают благодарность руководителю д.т.н., проф. М.Н. Покусаеву и сотрудникам аккредитованного РМРС испытательного центра «Marine Technology Service» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет» в лице к.т.н., доц. А.Н. Глухова и доц. М.М. Горбачева за предоставленные оборудование и материалы для исследований.

Литература

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов, Часть VII. Механические установки. НД №2-020101-095, 2017. – 66 с.
2. Кушнер Г.А. Исследование изменений формы и коэффициента жесткости моделей дейдвудных подшипников из капролона/ Г.А. Кушнер, В.А. Мамонтов, А.А. Халявкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 6 (34). - С. 151-157.
3. Мамонтов В.А. Экспериментальное исследование поперечных и крутильных колебаний валопроводов буксира типа ОТ-2400 / В.А. Мамонтов, А.Н. Глухов, М.М. Горбачев, Г.А. Кушнер. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2017. - № 46/47. - С. 86-88.
4. Astech Electronics Limited. Operating Instructions Rotary Telemetry System, 2012 – 20 p.
5. РД 5.4307-79. Валопроводы судовые. Правила и нормы проектирования.- Взамен РС-735-68. Введ. с 01.01.81.-Л.: Изд-во судостр. пром-сти, 1979.- 146 с.
6. РТМ 31.5034-78 Подшипники гребных и дейдвудных валов капролоновые. Технологические требования к изготовлению и монтажу при судоремонте (с Изменением). Введ. с 01.01.1979.-Севастополь.: Изд-во ЧЦПКБ, 1978.- 89 с.

References

1. Rossijskij Morskoy Registr Sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskix sudov, Chast' VII. Mehanicheskie ustanovki. [Rules for the Classification and Construction of Ships of Russian Maritime Register of Shipping. Vol. VII Mechanical installations]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping Publ., 2017. 66 p.
2. Kushner G.A. Mamontov V.A., Haljavkin A.A. Issledovanie izmenenij formy i koefefficienta zhestkosti modelej dejdvudnyh podshipnikov iz kaprolona [research of changes in the shape and stiffness coefficient of stern bearing caprolon models] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova [Scientific journal "State University of Marine and River Fleet named Admiral Makarov S.O."], 2015, no. 6, pp. 151-157. (In Russian).
3. Mamontov V.A., Glukhov A.N., Kushner G.A., Haljavkin A.A. Jeksperimental'noe issledovanie poperechnykh i krutil'nykh kolebanij valoprovodov buksira tipa OT-2400 [EXPERIMENTAL RESEARCH ON TRANSVERSE AND TORSIONAL VIBRATIONS OF TYPE OT-2400 SHIP SHAFT] Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Scientific journal of the Russian Maritime Register of Shipping], 2017, no. 46/47, pp. 86-88. (In Russian).
4. Astech Electronics Limited. Operating Instructions Rotary Telemetry System, 2012. 20 p.
5. RD 5.4307-79. Valoprovody sudovye. Pravila i normy proektirovanija. Vzamen RS-735-68. Vved. s 01.01.81.-L.: Izd-vo sudostr. prom-sti, 1979.- 146 s.
6. RTM 31.5034-78 Podshipniki grebnyh i dejdvudnyh valov kaprolonovyje. Tehnologicheskie trebovanija k izgotovleniju i montazhu pri sudoremonte (s Izmenenijem) Vved. s 01.01.1979.-Sevastopol'.: Izd-vo ChCPKB, 1978.- 89 s.

УДК 658.232

О ФОРМАХ ОРГАНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Борис Александрович Горелик

Доктор технических наук, профессор кафедры технологии судового машиностроения
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: gorelik38@mail.ru

Ирина Евгеньевна Колобкова

Кандидат экономических наук, доцент кафедры управления судостроительным производством
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
198262, Санкт-Петербург, Ленинский пр., д.101
e-mail: volatile2006@mail.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в том, чтобы на основании организационно-экономического анализа обосновать необходимость сохранения существующих машиностроительных мощностей на российских судостроительных предприятиях. Методологической основой исследования выступали труды отечественных и зарубежных ученых в области организации судостроительного производства. Эмпирическая база исследования сформирована на основе практического опыта работы российских судоверфей, выявления и анализа ключевых проблем, стоящих перед подотраслью судового машиностроения. Основными результатами исследования явилось выявление факторов, содействующих отделению судового машиностроения и специализации верфей на корпусных работах, а также определение причин, не позволяющих российскому судостроению воспринять западную модель организации производства и побуждающих сохранять и совершенствовать существующую машиностроительную базу верфей.

В результате сопоставления двух групп выявленных факторов показано, что в настоящих условиях функционирования ликвидация производственных мощностей судового машиностроения не только нецелесообразна, но и по многим причинам невозможна. Таким образом, при проведении территориальной и структурной реорганизации верфей следует отказаться от вариантов, предполагающих упразднение механических цехов либо сокращение их технологических возможностей.

Ключевые слова: судоверфь, судовое машиностроение, организация судостроительного производства, специализация, кооперация, импортозамещение, единичное производство, мелкосерийное производство.

ABOUT FORMS OF ORGANIZATION MARINE ENGINEERING INDUSTRY ON SHIPYARDS

Boris A. Gorelik

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of marine engineering
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: gorelik38@mail.ru

Irina E. Kolobkova

Cand.Econ.Sci.,
associate professor of department of Shipbuilding production management
State marine technical university of Saint-Petersburg
Leninsky prosp., 101, St. Petersburg 198262, Russian Federation
e-mail: volatile2006@mail.ru

Abstract

The research objective is to prove the need of saving the existing technologies in marine engineering existing on the Russian shipyards, based on the organizational and economic analysis. The methodological basis of the research were works of domestic and foreign scientists in the field of shipbuilding and production organization. Empirical research base is formed on the basis of practical experience of Russian shipyards, identification and analysis of the key challenges facing the industry of marine engineering. The main results of the research was to identify factors, that contribute to the

separation of marine engineering and specialization shipyard on a hull works, as well as identifying the reasons for not allowing the Russian shipbuilding industry to accept the Western model of the organization, and encourage maintain and improve all existing technologies in mechanical marine engineering.

As a result of the comparison of the two groups of identified factors, it is shown that in the present operating conditions the liquidation of the production capacities of marine engineering is not only impractical, but for many reasons impossible. Thus, in carrying out the territorial and structural reorganization of shipyards, options should be abandoned that imply the liquidation of mechanical workshops or the reduction of their technological capabilities.

Keywords: shipyard, marine engineering, organization of shipbuilding industry, specialization, cooperation, import substitution, single manufacture, small-scale production.

Введение

При организации судостроительного производства за рубежом превалирует принцип специализации – верфи занимаются в основном постройкой корпуса, а необходимые комплектующие изделия, механизмы и системы приобретают у предприятий, которые специализированы на их производстве [3]. Следует отметить, что эта особенность свойственна не только отрасли судостроения. В рамках концернов, холдингов, промышленных групп существуют предприятия, занятые производством радиоэлектроники, электротехники, автомобилей, продукции химической и металлургической промышленности и многие другие. Руководство принципом специализации позволяет создавать упрощенные организационные структуры, вследствие чего снижается уровень косвенных статей затрат, а также максимально сосредоточить внимание на собственных технологиях и производственных процессах. Это благотворно влияет на процессы улучшения качества и содействует снижению себестоимости продукции по прямым статьям – расходам на оплату труда, вспомогательные материалы и энергоресурсы, содержание и эксплуатацию оборудования.

Предприятия судового машиностроения при этом не связаны обязательствами только с конкретной верфью и в целом с отраслью судостроения. Они имеют возможность заключать контракты и выполнять заказы предприятий других отраслей и просто отдельных частных заказчиков. Названные причины и стоят у истоков идеи о том, что российские верфи также должны быть специализированы на осуществлении корпусных видов работ [3, 4]. При этом детальный анализ сложившейся ситуации позволяет сделать несколько иные выводы и оспорить положение о пригодности зарубежной модели для России, чему и посвящена данная статья.

Настоящее исследование актуально, так как в текущей практике работы судоверфей не прекращаются процессы их технического переоснащения. Одновременно, идет процесс комплексной реорганизации отрасли в целом [1, 3]. Судостроение – фондоемкая отрасль, и объемы инвестиций в ее долгосрочное развитие

весьма существенны. Следовательно, необходимо разносторонне анализировать как успешную практику работы коллег, так и сложившиеся особенности организации и работы предприятий в текущих российских условиях.

Преимущества специализации

Из числа наиболее существенных факторов, содействующих отделению судового машиностроения, и специализации верфей на осуществлении только корпусных работ, можно выделить те, которые подтверждают предпосылки к наследованию зарубежного опыта работы:

1. Необходимость наличия на предприятиях производственных площадей, зданий, сооружений и оборудования, необходимых для производства изделий судового машиностроения. Потребность обслуживать и содержать эти дополнительные фонды и включать расходы по ним в цеховые косвенные статьи затрат, что ведет к росту себестоимости конечной продукции судового машиностроения.

2. Усложнение организационной структуры верфей, и, как следствие, системы внутренних взаимоотношений, систем документооборота и учета, численности основного и вспомогательного персонала. Это приводит к росту себестоимости продукции судостроения по статье общехозяйственных затрат.

3. Возникновение сложностей в системе проектно-конструкторской и технологической подготовки производства, т.к. собственное машиностроение крайне сложно учесть на стадии проектирования судна или корабля, что приводило к увеличению сроков подготовки и освоения производства.

4. Возникновение сложностей в системе материально-технического обеспечения, обусловленных ростом видов применяемых материалов, при этом потребность во многих из них незначительна.

Рассматривая первый фактор, следует отметить, что судостроение в целом является очень фондоемкой отраслью. К наиболее дорогостоящей части основных фондов относят построечные места (стапели, доки, эллинги), глубоководные достроечные набережные, крановое оборудование большой грузоподъемности, специализированные поточные линии автоматизированной и

механизированной резки, сборки и сварки судовых конструкций (секций и блоков) [4]. Оборудование машиностроительных цехов не столь дорогостоящее. Его обслуживание и содержание не требует особого подхода, больших площадей и т.д. Уровень расходов на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО) по машиностроительным цехам примерно на 40% ниже, чем по цехам корпусным [6]. Уровень цеховых накладных расходов примерно одинаков. Если учесть, что удельный вес трудоемкости работ по машиностроению в общей годовой трудоемкости работ верфи не значителен (около 10%), объединение машиностроения и корпусостроения не влечет значительного увеличения абсолютного размера цеховых косвенных затрат по предприятию. При изготовлении изделий машиностроительной номенклатуры на специализированных предприятиях уровень цеховых косвенных расходов будет несколько ниже. При этом, одного данного обстоятельства не достаточно для того, чтобы изменять существующую организационную структуру, налаживать новые связи с предприятиями машиностроения России, осваивать производство новых для них изделий.

Второй фактор часто считается одним из наиболее существенных, что объясняется актуальным стремлением к снижению уровня общецеховых (общехозяйственных) накладных расходов. Оценивая действие этого фактора, следует отметить, что, например, на ФГУП «Адмиралтейские верфи» сейчас функционирует около 100 структурных подразделений, из них 30 производственных цехов. Из этих 30 цехов только 3 специализированы на выпуске изделий машиностроения. Удельный вес трудоемкости предприятия, приходящейся на машиностроительное производство, как уже отмечалось, составляет около 10%. Средний уровень оплаты труда в корпусных и механических цехах примерно одинаков. Исключение составляют только корпусостроительные цеха. Специфика выполняемых ими работ требует наивысшей квалификации судовых сборщиков и сварщиков. Существенно влияют на уровень заработной платы вредные условия работы, а также – всегда ощущаемый верфями дефицит в таких рабочих. Таким образом, кооперация корпусостроения и машиностроения не влечет усложнения структуры предприятия в том объеме, который мог бы существенно сказаться на результатах его финансово-хозяйственной деятельности, а также негативно влиять на протекание основных производственных процессов. Специализация повлекла бы за собой сокращение технологических возможностей. Следовательно, сократился бы и портфель заказов в условиях сложности заключения контрактов на постройку судов и кораблей в условиях неполной загруженности предприятий судостроительной отрасли.

Представленные цифры и рассмотренные особенности позволяют сделать вывод о том, что в первую очередь на уровень общехозяйственных расходов влияет пассивная часть организационной структуры, а не производственные подразделения. Именно эта сфера и должна являться объектом упрощения и организационного совершенствования, поскольку за ней стоят наиболее значительные резервы снижения себестоимости продукции, вследствие которого будут сохранены технологические возможности предприятия.

Действие факторов три и четыре более ощутимо с практической точки зрения. Проектная документация на судно или корабль не учитывает объемов работ для изготовления изделий машиностроения. Трудоемкость и материалоемкость машиностроительной части может с достаточной степенью точности оцениваться только при постройке серии заказов по одному проекту. Таким образом, на начальных стадиях строительства нового судна эти обстоятельства затрудняют внутреннюю предконтрактную оценку, а также требуют корректировки и изменения цены уже на стадии строительства, что весьма проблематично для верфи, т.к. требует выполнения большого объема работ, направленных на обоснование изменения [3]. Заказчики судостроительной продукции больше склонны верить оценкам специализированных фирм (если изделия машиностроения приобретаются на других предприятиях), нежели верфи, занятой производством собственной машиностроительной продукции. Много сложностей связано с заказом, производством и получением материалов для изделий машиностроения. Номенклатура этих материалов очень велика (в сравнении с номенклатурой для изготовления корпуса). При этом по многим позициям потребность столь незначительна, что изготовители просто отказываются поставлять такое ничтожное количество своей продукции.

Отметим, что подобные сложности возникают и в случае заказа «на стороне», что неизбежно сказывается на цене покупки. Часто задачи материального обеспечения могут быть решены путем определения годовой (квартальной, месячной) потребности в том или ином виде материала по опыту работы, и приобретения данного количества на запланированный производственный период.

Одновременно и выполнение работ конструкторско-технологической части не влечет необходимости привлечения дополнительных специалистов, создания специальных подразделений и т.д. Специализированные отделы верфи в любом случае сами проектируют и производят оснастку (постели, стенды, траверсы, спусковые устройства), специальные инструменты и приспособления. Потребность в них, а также необходимость собственного изготовления диктуется техническими особенностями продукции судостроения –

сложностью, уникальностью технологических процессов, единичным типом производства.

Факторы, содействующие кооперации корпусостроения и судового машиностроения

Рассмотренные выше причины слабого действия факторов «за специализацию» в основном обусловлены особенностями продукции судостроения, имеющего ярко выраженную специфику по сравнению с другими промышленными секторами, производство в которых массовое или крупносерийное. Факторы, содействующие кооперации, в большинстве обусловлены тем же. Это видно из их перечня, приведенного далее.

1. Сравнительно небольшая потребность в количестве одинаковых и однотипных изделий машиностроения – по статистике не более 100 единиц, а чаще десятка [5]. При этом, минимальный заказ таких изделий на другом предприятии составляет от 1000 единиц и более. Потребность в практическом использовании оставшихся изделий может и не возникнуть. Производственная программа судостроительных предприятий часто меняется. На размещение заказов помимо экономических влияют также технологические и политические факторы. В среднем, суда по одному проекту строятся не более 3-5 лет. Заказ на постройку пяти одинаковых судов в настоящее время является для любой верфи крупной серией. Для специализированного предприятия машиностроительной отрасли такое количество изделий ничтожно по объему. Следовательно, и стоимость заказа маленькой партии будет рассчитываться на специальных условиях, либо на размещение такого заказа сразу же будет получен отказ.

2. Значительная потребность в изделиях машиностроения, имеющих свои особенности, которые зависят от:

- применения в изделиях специальных марок сталей и сплавов;
- использования специальных покрытий;
- необходимости обеспечения специальных свойств, что требует особой технологии изготовления;
- наличия повышенных требований к качеству изготовления и т.п.

Примерами могут служить крепеж из коррозионностойких и маломагнитных марок сталей, изделия из цветных сплавов (меди, латуни, алюминия), элементы конструкций повышенной прочности, повышенной свариваемости, проходящие особые условия испытаний. Даже заготовки для изготовления таких изделий часто производится металлургическими заводами по специальному заказу. Промышленность не изготавливает такие изделия серийно, и приобрести их на рынке практически невозможно.

3. Полностью обеспечивается своевременность поставки машиностроительных

изделий собственного производства, чего нельзя гарантировать в случае заказа на других предприятиях. При этом, срыв сроков поставки влечет увеличение производственных циклов строительства судов и кораблей, что недопустимо и влечет наложение существенных штрафных санкций. Организация производства в судостроении требует жесткого соблюдения календарных сроков строительства [2]. Рост степени зависимости от других предприятий неизбежно повлечет за собой увеличение случаев сбоя в производстве по вине сторонних поставщиков. Можно отметить, что система поставок «just in time» фактически оправдала себя только в Японии (там она имеет название «кан-бан»). Даже за рубежом в крупных городах работа по этой системе часто нарушается.

Действие рассматриваемого фактора усугубляется также тем, что верфи северо-западного региона (в первую очередь Санкт-Петербурга) находятся в центральных частях города на пересечении большого количества транспортных путей. Это существенно снижает вероятность своевременных поставок, а также практически исключает возможность оперативного обеспечения производства необходимыми изделиями машиностроения, тем более если в них возникает экстренная потребность.

4. При монтаже на судне сложных изделий судового машиностроения (рули, баллеры и т.д.) требуется их подгонка (доработка). Часто подгонка осуществляется даже в несколько этапов, что обусловлено очень высокими требованиями к точности базирования и в целом к качеству монтажа. В идеале само проектирование таких изделий должно производиться без отрыва от проектирования сопряженных с ними корпусных конструкций – фундаментов, изготовления которых на других предприятиях делает такой подход невозможным, но и доработки становятся длительными и недопустимо дорогостоящими.

5. Разрыв сложившихся в доперестроечный период связей с поставщиками комплектующего оборудования, систем и механизмов, главным образом с предприятиями на территории бывших союзных республик. Причинами могут быть ликвидация предприятий или их конверсия. Так, исторически гидравлическое оборудование поставлялось из Казахстана (г. Алма-Ата), где его выпускал специализирующийся на этом завод. Сейчас правительство Казахстана намерено ликвидировать это предприятие и построить на его месте гостиничный комплекс. Производство признано нерентабельным, и площади планируется использовать с большим доходом для государства. Торпедные аппараты для подводных лодок поставлялись с завода Красное Сормово в Нижнем Новгороде. Завод «сворачивает» это производство из-за малой в них потребности (штучные заказы, получаемые не постоянно). Поэтому необходимо, чтобы сами судостроительные предприятия организовывали

свои собственные производства. Это отвечает перспективам развития машиностроительного комплекса и планам возрождения отечественного судового машиностроения.

6. Концентрация судостроения и машиностроения на одном предприятии позволяет использовать производственный задел в виде отходов металла, оставшихся от изготовления корпуса. В случае специализации этот задел остался бы невостребованным. И отделение машиностроения увеличило бы материалоемкость своего производства. При этом, пути снижения заказанного количества металла представляют для предприятия колоссальный интерес и, как правило, большую сложность. Даже незначительное сбережение материальных ресурсов влечет прямой экономический эффект. При росте объемов производства масштабы такого эффекта соразмерно увеличиваются.

7. Сложности или даже невозможность поставки изделий машиностроительной части по экспорту. Такие поставки, как правило, осуществляются через большое количество посредников. Предприятие оплачивает надбавку к цене каждого из них плюс таможенные пошлины и сборы, величина которых иногда необъяснимо завышена. Исключение таких явлений предполагает сохранение и развитие как машиностроительного комплекса судостроительных предприятий, так и в целом возрождение судового машиностроения, как особой специализированной отрасли науки и производства. Сложная политическая обстановка последних лет: запрет экспортных поставок, прерывание сложившихся деловых контактов с зарубежными фирмами, объявленный государством курс на импортозамещение во всех отраслях производства – побуждают по-новому

взглянуть на обозначенную проблему и учесть здесь не только экономические факторы.

8. Производство дорогостоящей и технически сложной продукции с длительным сроком эксплуатации (автомобили, катера и яхты, самолеты, суда и корабли) неотъемлемо от организации обеспечения покупателей запасными частями и сменными комплектующими частями. В некоторых отраслях (например, автомобилестроение) такая необходимость формирует по сути обособленный формально существующий род бизнеса, причем весьма эффективный. Плавающие сооружения в обязательном порядке обеспечиваются двумя комплектами запасных частей – так называемым бортовым, необходимым для устранения неисправностей в рейсе, и береговым, который служит для пополнения бортового запаса, а также проведения профилактических и иных ремонтных работ во время стоянки. Комплект этих запасных частей в большей части состоит из изделий машиностроения, причем специальных, изготовленных по проектным чертежам заводом-строителем самой морской техники. Естественно, и владелец за пополнением фонда этих запчастей обращается к судостроительному заводу. Объемы таких сделок достигают сотен млн. долл. в год. Т.е. для верфи это высокодоходный бизнес, основа которого – наличие собственной машиностроительной базы: документации по изделиям, опыта изготовления, технологического оборудования и оснастки. Сроки службы морской техники составляют 20-25 лет, и в течение всего этого времени судостроительный завод, сдавший судно или корабль заказчику, фактически обеспечен работой, приносящей прибыль.

Схематично все рассмотренные доводы обобщены на рисунке 1.

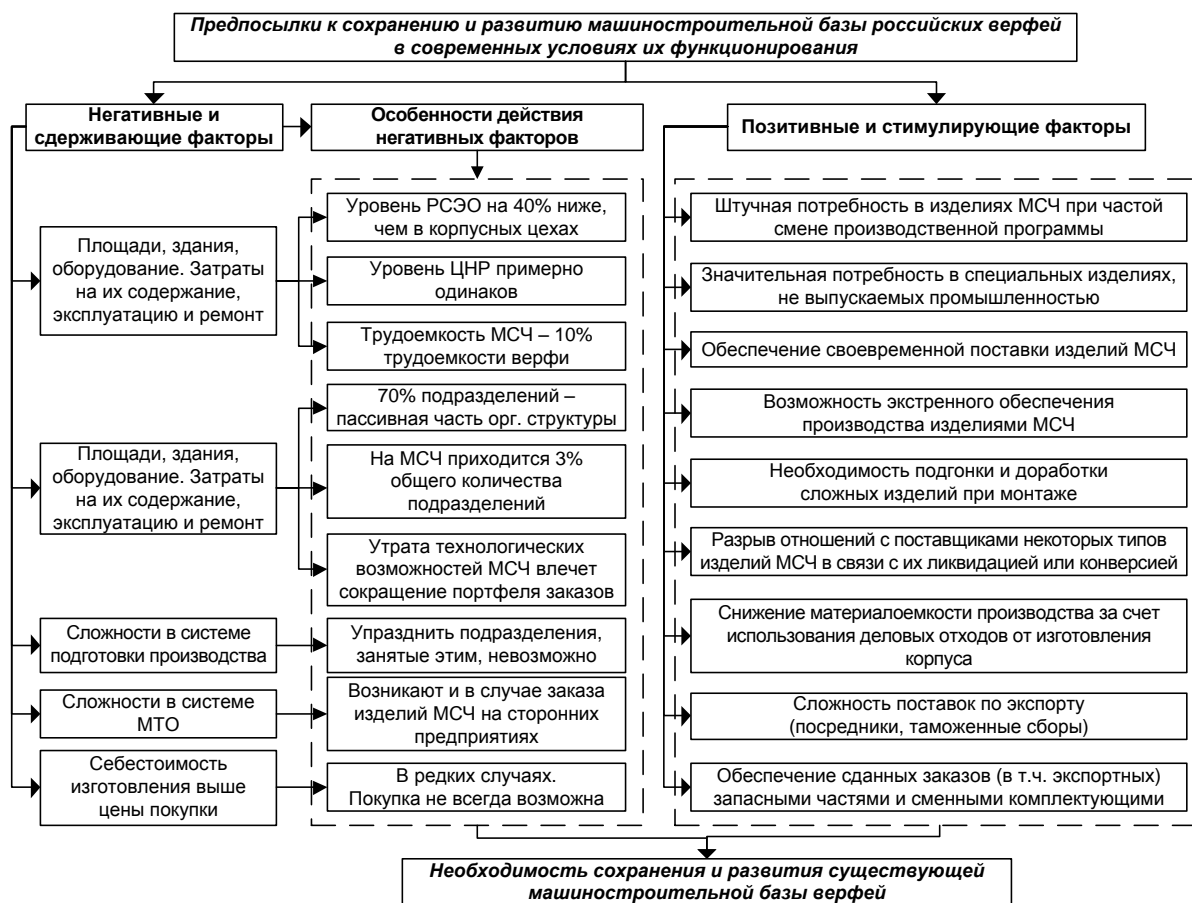


Рис. 1 Предпосылки к сохранению и развитию машиностроительной базы российских верфей

Выводы

1. Существующие на российских верфях машиностроительные мощности значительно расширяют технологические возможности предприятий. Это оказывает влияние как на количество заказов предприятия, так и позволяет верфям получать дополнительные прибыли.
2. Благодаря наличию машиностроительной части обеспечивается высокий уровень качества работ за счет обеспечения их своевременности, а также сокращения сроков и стоимости изготовления сложных изделий.
3. Цена покупки изделия машиностроения не всегда превышает себестоимость его изготовления. Это объясняется тем, что покупка не всегда возможна; изготовление изделий по спец. заказу влечет значительное увеличение их цены; уровень наценки на изделия, поставляемые по экспорту, очень велик.
4. Работу по упрощению организационной схемы и снижению уровня косвенных расходов предприятий следует в первую очередь проводить в направлении пассивной части организационных структур, а не активной, т.к. с этим связаны значительно большие резервы снижения себестоимости конечной продукции.
5. В сложившейся ситуации возрождение и развитие судостроительной отрасли необходимо осуществлять при одновременном развитии подотрасли судового машиностроения, т.к. это

позволит избежать в будущем существенных затрат, а также повысить долю стоимости, принесенной в суда и корабли непосредственно верфями. Данное обстоятельство позволит в свою очередь повысить стабильность и эффективность судостроительного производства.

Следовательно, ликвидация производственных мощностей судового машиностроения не только нецелесообразна, но и по многим причинам невозможна. При проведении территориальной и структурной реорганизации верфей следует отказаться от вариантов, предполагающих упразднение механических цехов либо сокращение их технологических возможностей. В первую очередь речь идет о таких производствах, как механическое, литейное, производство РТИ, в том числе формовых. Экономическая эффективность функционирования названных цехов, а также необходимость создания новых участков в условиях северо-западного региона неоднократно подтверждалась расчетами. Объединенная Судостроительная Корпорация может полностью координировать эти аспекты, обеспечивая наличие необходимой технологической базы в каждом регионе.

Литература

1. Конкурентоспособность и инновационный потенциал судостроительной промышленности. / А.В. Абрамов [и др.]. // Региональные проблемы преобразования экономики. Махачкала : Институт социально-экономических проблем ДНЦ РАН. 2016. № 5. С. 15-22.
2. Абрамов А.В., Николаев Ю.А. Механизм устойчивого регулирования инновационного потенциала промышленного предприятия. // Креативная экономика. М. : ООО «Экономика». 2015. Т. 9, № 4. С. 485-494.
3. Александров В.Л., Перелыгин А.В., Соколов В.Ф. Судостроительное предприятие в условиях рынка: проблемы адаптации и развития / под общ. ред. В.Л. Александрова. СПб. : Судостроение, 2003. 424 с.
4. Технология и технологическое оборудование корпусообработывающих цехов судостроительных предприятий / А.А. Васильев [и др.]. СПб. : Изд-во АО «ЦТСС», 2016. 199 с.
5. Волостных В.В., Иванкович А.В. Ресурсопотребление в судостроении // Известия Калининградского государственного технического университета. 2013. № 30. С. 46-52.
6. Грицан А.Б. Методы инженерно-экономического анализа в ценообразовании на суда и плавсредства. СПб. : «Бостон-спектр», 2004. 492 с.

References

1. Abramov A.V., Aleksandrov V.L., Gorelik B.A., Makarov V.G., Smirnov A.Yu. Konkurentosposobnost' i innovacionnyj potencial sudostroitel'noj promyshlennosti. [Competitiveness and innovative potential of the shipbuilding industry]. Regional'nye problemy preobrazovanija ekonomiki - Regional problems of economic transformation, Mahachkala, Institut social'no-jekonomicheskikh problem DNC RAN, 2016, no. 5, pp. 15-22.
2. Abramov A.V., Nikolaev Yu.A. Mehanizm ustojchivogo regulirovanija innovacionnogo potenciala promyshlennogo predpriyatija. [The mechanism of sustainable regulation of the innovative potential of an industrial enterprise] Kreativnaja ekonomika – Creative economy, Moskow, «Ekonomika» Publ., 2015, vol. 9., no. 4, pp. 485-494.
3. Aleksandrov V.L., Perelygin A.V., Sokolov V.F. Sudostroitel'noe predpriatie v uslovijah rynka: problemy adaptacii i razvitija (pod obshh. red. V.L. Aleksandrova) [Shipbuilding enterprise in market conditions: problems of adaptation and development]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003. 424 p.
4. Vasil'ev A.A., Dogadin A.V., Levshakov V.M., Nevskaya A.N. Tehnologija i tehnologicheskoe oborudovanie korpusoobrabatyvajushhih cehov sudostroitel'nyh predpriyatij [Technology and technological equipment of hull-shops of shipbuilding enterprises]. Saint-Petersburg, JSC «CTSS» Publ., 2016. 199 p.
5. Volostnyh V.V., Ivankovich A.V. Resursopotreblenie v sudostroenii [Resource consumption in shipbuilding]. Izvestija Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – News of the Kaliningrad State Technical University, 2013, no. 30, pp. 46-52.
6. Gritsan A.B. Metody inženerno-ekonomičeskogo analiza v cenoobrazovanii na suda i plavsredstva [Methods of engineering-economic analysis in pricing for ships and boats]. Saint-Petersburg, «Boston-spektr» Publ., 2004. 492 p.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 614.842/847: 614.842/844: 614.842/894

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОМЕЩЕНИЙ СУДОВ

Андрей Дмитриевич Ищенко

кандидат технических наук,
профессор кафедры пожарной тактики и службы
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4
e-mail: adinko@mail.ru

Владимир Васильевич Роенко

кандидат технических наук, профессор
профессор кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4
e-mail: piroemail@bk.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор, директор
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13 (4 этаж)
e-mail: malygin_com@mail.ru

Аннотация

В работе приведены результаты анализ пожаров на судах в Российской Федерации с 2010 года. Рассмотрены основные закономерности возникновения, развития и последствий пожаров, как в количественном, так и стоимостном аспектах. Уделено внимание распределению пожаров по помещениям возникновения и связанным с ними особенностям тушения пожаров – распространению опасных факторов пожара, влияющих на тактику и сложность тушения. Представлен характер использования средств защиты органов дыхания и зрения при тушении пожаров на речных и морских судах при достижении опасными факторами пожара предельных значений в помещении пожара, статистика повреждений у спасенных и погибших при катастрофах, связанных с пожарами на судах с указанием основных видов повреждений и основных причин летальности. Отмечено влияние пожаров в различных помещениях судов на общую жизнеспособность судна. Рассмотрен характер развития пожара в помещении с энергетической установкой судна и способы его тушения, указаны особенности тушения пожара и применяемые для этого способы и приемы, а также определены перспективы совершенствования способов и средств тушения.

Ключевые слова: пожар, последствия, тушение, причины, средства защиты органов дыхания и зрения, судовая (корабельная) энергетическая установка, машинно-котельное отделение.

FIRE HAZARDS AND FIRE EXTINGUISHING FEATURES OF POWER PLANTS AND COMPARTMENTS OF SHIPS

Andrey D. Ishchenko

Cand.Tech.Sci.,
the professor of DEPARTMENT OF FIRE FIGHTING MANAGEMENT AND SERVICE
ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA
BorisaGalushkina, 4, Moscow, 129366
e-mail: adinko@mail.ru

Vladimir V. Roenko

the professor, Cand.Tech.Sci.,
the professor of DEPARTMENT OF FIRE AND RESQUE TECHNOLOGY

ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA
 BorisaGalushkina, 4, Moscow, 129366
 e-mail: piroemail@bk.ru

Igor G. Malygin

the professor, Dr.Sci.Tech.,director

THE INSTITUTE OF TRANSPORT PROBLEMSN.S.SOLOMENKO OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
 12-ya liniya VO, 13(4th floor), Saint-Petersburg, 199178
 e-mail: malygin_com@mail.ru

Abstract

The research presents the results of the analysis of fires on ships in the Russian Federation since 2010. The main regularities of occurrence, development and consequences of fires, both in quantitative and cost aspects, are considered. Attention is paid to the distribution of fires on the compartments of origin and the related features of extinguishing fires - the spread of dangerous fire factors that affect the tactics and difficulty of extinguishing. The nature of the use of respiratory and vision protection in fighting fires in river and sea ships when fire hazards reaches the limit values in the fire room, the statistics of injuries to rescued and killed in catastrophes associated with fires on ships, indicating the main types of damage and the main causes mortality are presented. The effect of fires in various ship compartments on the overall viability of the ship was noted. The nature of the fire development in the room with the ship's power plant and its methods of extinguishing is considered, the features of fire extinguishing and the methods and techniques used for this are specified, and the prospects for improving the methods and means of extinguishing are determined.

Keywords: fire, consequences, firefighting, causes, respiratory protection and vision protection, ship power plant, machine-boiler department.

Введение

На территории Российской Федерации ежегодно происходит от 60 до 90 пожаров на речных и морских судах. Несмотря на стабильное и малое количество пожаров, прямой ущерб с 2015 г. вырос на порядок в сравнении с 2010 по 2014 гг. (с 3-8 млн. рублей до 49,9-74,6 млн. рублей), что говорит о растущей проблеме профилактики и тушения пожаров на речных и морских судах.

По данным ВНИИПО МЧС России с 2010 по 2016 год всего произошло 537 пожаров на речных и морских судах, которые принесли прямой материальный ущерб на 160 миллионов рублей. Несмотря на сравнительную небольшую часть от общего количества пожаров происходящих на территории Российской Федерации, пожары на речных и морских судах требуют отдельного рассмотрения с точки зрения тушения пожара, так как неправильные действия при тушении пожара часто приводят к полной потере судна. А в зависимости от груза и судна, его потеря может иметь большой социальный и экономический ущерб.

1. Последствия пожаров судов

На рисунке 1 показано изменение количества пожаров произошедших на речных и морских судах в Российской Федерации и прямой материальный ущерб от пожаров.

Согласно статистическим данным в среднем в год случается 76 пожаров на речных и морских судах, в свою очередь с 2015 года произошел рост ущерба на порядок. Данные по ущербу также косвенно подтверждают

необходимость более подробного изучения тушения пожаров на речных и морских судах.

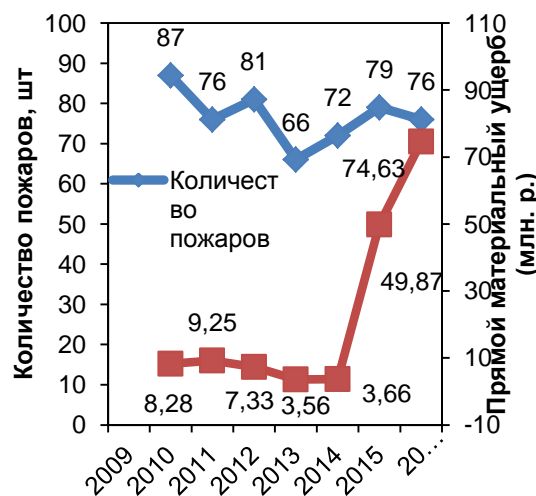


Рисунок 1 – Распределение количества пожаров и ущерб от них с 2010 по 2016 год
 * Примечание – статистика за 11 месяцев 2016 года

Возникновение и развитие пожаров на судах значительно отличаются от аналогичных процессов в наземных сооружениях. Основные причины отличия связаны с различием в объемно-планировочных и конструктивных решениях судов и наземных сооружений, в использовании разных конструктивных и отделочных материалов, а также с организацией внутри судов развитой системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Несмотря на многообразие типов судов,

пожары, возникающие на них, условно разделяются на три группы:

- 1) пожары в жилых и служебных помещениях;
- 2) пожары в машинно-котельных отделениях (МКО);
- 3) пожары в грузовых помещениях [1, 2].

Место возникновения пожара существенно влияет на тактику тушения, а соответственно и на требования к пожарно-спасательной технике и оборудованию для эффективного тушения пожара. На судах согласно статистическим данным, пожар возникает в 40 % случаев в транспортном отсеке, в 20 % случаев в жилых и помещениях с продолжительным пребыванием людей (каюты, помещения для персонала), в 10 % случаев в МКО. Остальные 25 % пожаров также возникают в помещениях различного назначения и лишь в 5 % случаев пожары начинаются на открытой поверхности судна (рисунок – 2).



Рисунок 2 – Распределение мест возникновения пожаров на речных и морских судах

Таким образом, пожары на речных и морских судах, как правило, возникают в замкнутых объемах.

Соответственно тушение пожаров будет осложняться распространением зоны задымления, повышения температуры, а также учитывая сложные объемно-планировочные решения судов, в большинстве случаев будет затруднен доступ к зоне горения для непосредственной подачи огнетушащих веществ [1-6].

2. Применение средств защиты при тушении пожаров судов и характер повреждений у пострадавших

Анализ статистики использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения (СИЗОД) свидетельствует о том, что при тушении пожаров на речных и морских судах организация звеньев газодымозащитной

службы (ГДЗС) для работы в непригодной для дыхания среде происходит на каждом третьем пожаре (рисунок 3). Данный факт также подчеркивает сложность организации тушения пожаров на судах и повышенные технические требования к пожарным подразделениям для успешного решения возложенных на них задач.



Рисунок 3 – Статистика использования СИЗОД при тушении пожаров на речных и морских судах

В современных работах изучающих моделирование пожаров, в том числе и пожаров, происходящих в судовых помещениях показывают, что ОФП достигают предельных значений в помещении пожара уже на первых минутах [2-6]. По этим моделям при типовом пожаре в корабельном помещении среднеобъемная температура поднимается до 200 °С в первые минуты пожара. Таким образом, в большинстве случаев ОФП будут достигаться предельные значения в корабельных помещениях на первых минутах и если корабль находится у причальной стенки, то еще до прибытия первых подразделений пожарной охраны. Причем во всех работах отмечается, что, прежде всего, происходит резкое снижение видимости из-за распространения дыма и возникают высокие тепловые потоки, которые препятствуют продвижению пожарных подразделений к очагу

пожара и ставят трудно разрешимую проблему подачи огнетушащих веществ в очаг пожара.

Анализ повреждений у спасенных и погибших при катастрофах, связанных с пожарами на кораблях и судах показывает, что основными видами повреждений являются [7]:

у спасенных - острые ингаляционные отравления угарным газом легкой степени на фоне изолированных поверхностных ожогов (60,8%), комбинированные двухфакторные механо-ожоговые травмы (14,7%), трехфакторные механо-ожогово-холодовые травмы (22,5%) и ожогово-химические повреждения (2,0%);

у погибших - острые ингаляционные отравления угарным газом тяжелой степени на фоне изолированных ожогов различной степени тяжести (29,5%), утопления без травматических повреждений (25,3%), комбинированные тяжелые двухфакторные механо-ожоговые травмы (23,5%), тяжелые трехфакторные механо-ожогово-холодовые травмы (15,1%) и ожогово-химические повреждения (6,6%).

На основании проведенного в работе [7] анализа, сделаны следующие выводы:

При морских пожарах на судах, возникает необходимость спасения и оказания медицинской помощи большому количеству людей с отравлением угарным газом, изолированными ожоговыми, комбинированными механо-ожоговыми, механо-ожогово-холодовыми и ожогово-химическими повреждениями.

Основными повреждениями у спасенных пострадавших при пожаре на море являются отравления угарным газом легкой степени с поверхностными ожогами I-II степени с ограниченной площадью (60,8%), комбинированные 2-х факторные механо-ожоговые травмы (14,7%), комбинированные 3-х факторные механо-ожогово-холодовые травмы (22,5%) и химические ожоги (2%).

Основные причины летальности: острые ингаляционные отравления угарным газом тяжелой степени на фоне поверхностных ожогов I-II степени (29,5%); утопления (25,3%); комбинированные 2-х факторные механо-ожоговые травмы (23,5%); комбинированные 3-х факторные механо-ожогово-холодовые травмы (15,1%).

Быстрое задымление и распространение открытого пламени в ограниченных по объему помещениях, большая удаленность от береговой черты, тяжелый характер пожара с последующим затоплением судна и пребыванием в условиях низких температур значительно увеличивают число пострадавших с различными видами комбинированных повреждений и уровень летальности.

3. Особенности развития и тушения пожаров в судовых помещениях

На основании этих выводов следует заключить, что основное направление в борьбе

с пожарами на судах – борьба с дымом и высокой температурой в замкнутых объемах.

Также следует отметить, что в кораблестроении наиболее современные методы, материалы и технологии применяют в военных кораблях и судах особого назначения (например, ледоколах). Современные технологии предупреждения и ликвидации пожаров внедряют в первую очередь на этих кораблях и судах, а системы пожаротушения на грузовых, пассажирских и грузопассажирских судах обновляются намного медленнее, так как большая их часть находится в море во время открытой навигации [2]. Поэтому важная роль в предотвращении и первоочередном тушении пожара отводится автоматическим системам пожарной сигнализации и пожаротушения, а также возможности установки современных систем пожаротушения на уже эксплуатирующихся кораблях и судах.

Особенно опасен пожар судовой (корабельной) энергетической установки, которая находится в машинно-котельном отделении (МКО), так как он может привести к потере хода.

МКО на судне является пожароопасным настолько, что в нем создается пожарный пост. В связи с этим важно подавить горение в такие сроки, при которых огонь и опасные факторы пожара не привели бы к остановке энергетической установки судна (корабля).

Описанная ситуация аналогична последствиям пожара на объектах энергетики. На этих объектах прекращение подачи тепловой и электрической энергии, особенно в условиях низких температур окружающего воздуха, зачастую приводит к возникновению чрезвычайной ситуации (ЧС) на территории населенных пунктов и целых регионов. То есть неработоспособность судовой энергетической установки – это ЧС масштаба судна.

Основными причинами пожаров в МКО являются [8]:

- воспламенение топлива или масла от нагретых поверхностей и открытого огня;
- неисправность электросети и перегрузка фидеров в ГРЩ;
- неисправность котлов и выхлопного тракта двигателей;
- нарушение эксплуатации энергетических установок;
- огневые работы.

При возникновении пожара в МКО продукты горения быстро заполняют его, нагревая оборудование и переборки. Через неплотности дверей, открытые иллюминаторы, воздухопроводы системы вентиляции дым распространяется в другие помещения. Скорость распространения горения по МКО составляет 8,0-10,0 м · мин⁻¹.

При горении разлившегося топлива на площади 3-5 м² МКО задымляется в течение 2-3 минут. При этом температура пожара через 10 минут достигает 400⁰С и происходит воспламенение краски и других материалов,

прилегающих к переборкам в смежных с МКО помещениях. Средняя температура в МКО при развившихся пожарах достигает 800-1000⁰С. Возникает угроза взрыва воздушных баллонов, топливных емкостей.

Распространение горения в МКО происходит главным образом в вертикальном направлении вследствие создающего во время пожара газообмена. Во всех случаях пожар за 20-30 минут распространяется на жилые и служебные помещения надстройки при наличии открытых отверстий, после чего практически вся надстройка оказывается в огне.

МКО, как правило, имеют не менее двух выходов в коридоры жилой надстройки. Кроме этого, помещения имеют связь с надстройкой через вентиляционные каналы и другие коммуникации.

Одним из важнейших аспектов, предотвращающих дальнейшее развитие возникшего пожара, является организация непрерывного тушения пожара с момента начала подачи огнетушащих средств до ликвидации.

Возможным методом прекращения открытого горения в помещении МКО с наличием опасных для жизни и здоровья человека факторов является объемное тушение. При объемном способе пожаротушения прекращение открытого горения осуществляется без входа человека в помещение пожара. Поэтому риск воздействия на человека опасных факторов пожара существенно уменьшается. Важно также использовать такую технологию объемного пожаротушения, при которой помимо прекращения открытого горения осуществляется также уменьшение температуры внутри помещений, а также осаждение дыма и токсичных газов.

Для тушения пожаров в МКО предусматриваются стационарные установки пожаротушения, которые в качестве огнетушащего вещества (ОТВ) применяют воздушно-механическую пену и газовые составы (чаще углекислоту).

Для их работы создается запас соответствующего ОТВ, который рассчитывается исходя из расчетного времени тушения пожара и коэффициента запаса. Вполне закономерно, что при таком подходе не может быть обеспечено объемное пожаротушение всех или большинства помещений судна (корабля) по технико-экономическим соображениям.

Расчетная методика и стоимостные соображения не позволяют иметь на судне (корабле) достаточно большой запас ОТВ, даже для пожароопасных помещений.

Условия развития реального пожара не всегда могут быть учтены методикой. Например, для тушения газовыми составами необходима определенная герметичность горящего помещения, иначе имеющийся запас

ОТВ не позволит создать требуемую огнетушащую концентрацию. Для этого достаточно неплотно закрытой двери, открытого иллюминатора или незакрытого воздуховода системы вентиляции.

Для повышения эффекта тушения установка объемного пожаротушения должна иметь производительность, позволяющую компенсировать утечку ОТВ из горящего помещения, и запас ОТВ, превышающий расчетное время тушения пожара. Сложность реализации состоит в создании требуемого запаса огнетушащего вещества, которое сможет обеспечить огнетушащую концентрацию в помещении пожара с учётом его негерметичности [9].

Наиболее распространенными средствами объемного тушения являются газы и сложные химические составы, которые опасны для людей.

Вода является наиболее эффективным и распространенным средством тушения пожаров благодаря ее доступности, дешевизне, подвижности, ее химической нейтральности и отсутствию токсичности [9]. При этом вода, как огнетушащее вещество, применяется чаще всего в качестве средства поверхностного тушения.

В ряду возможных способов объемного тушения пожаров также применяется паротушение. Особенностью установки паротушения является подключение её к постоянно действующим производственным паропроводам [10]. Место подключения паротушения к постоянно действующим производственным паропроводам на технологических установках выбирается в пределах данной установки, а к паропроводной сети предприятия – в пределах не более 50 м от границы установки или объекта. Для тушения пожара в системах паротушения применяется насыщенный, отработанный (мятый) водяной пар или перегретый пар технологического назначения.

При этом насыщенный водяной пар является более эффективным для пожаротушения по сравнению с перегретым паром.

Для подачи пара в закрытые помещения перфорированные трубы прокладываются по всему внутреннему периметру помещения на высоте 0,2 – 0,3 м от пола. При этом отверстия труб располагаются так, чтобы выходящие из них струи пара были направлены горизонтально внутрь помещения. Основным показателем системы паротушения является интенсивность подачи пара, которая определяется в зависимости от наличия проемов, либо их отсутствия.

Системы паротушения имеют существенные недостатки, такие как:

- защищаемый объем помещения не должен превышать 500 м³;
- ограничение расстояния между местом подключения и защищаемым помещением;

- размещение внутренних распределительных паропроводов на путях движения обслуживающего персонала.

Механизм тушения паром таков, что при 35% объемном содержании пара пламенное горение прекращается из-за низкого объемного содержания (менее 16%) кислорода. Улучшение огнетушащего эффекта наблюдается при температуре в помещении более 100°С. Данное обстоятельство исключает возможность нахождения в нем людей.

Заключение

Пожар является одной из двух бед на море.

Ежегодно происходит до ста пожаров на российских речных и морских судах, при этом за последние годы значительно вырос ущерб от них, что говорит о растущей проблеме профилактики и тушения пожаров на речных и морских судах (кораблях).

Пожары на судах требуют отдельного рассмотрения с точки зрения тушения пожара, так как неправильные действия при тушении пожара часто приводят к полной потере судна. А в зависимости от груза и судна, его потеря может иметь большой социальный и экономический ущерб.

Пожары на судах (кораблях), как правило, возникают в замкнутых объемах. Соответственно тушение пожаров будет осложняться распространением зоны задымления, повышения температуры, а также учитывая сложные объемно-планировочные решения судов, в большинстве случаев будет затруднен доступ к зоне горения для непосредственной подачи огнетушащих веществ. Опасные факторы пожара достигают предельных значений в помещении пожара уже на первых минутах, поэтому применение средств защиты происходит на каждом третьем пожаре. Прежде всего, происходит резкое снижение видимости из-за распространения дыма, возникают высокие тепловые потоки, которые препятствуют продвижению к очагу пожара и ставят трудно разрешимую проблему подачи огнетушащих веществ в очаг пожара.

При пожарах на судах, возникает необходимость спасения и оказания медицинской помощи большому количеству людей с отравлением угарным газом, изолированными ожоговыми, комбинированными механо-ожоговыми, механо-ожогово-холодовыми и ожогово-химическими повреждениями.

На основании этих выводов следует заключить, что основное направление в тушении пожаров на судах и кораблях – борьба

с дымом и высокой температурой в замкнутых объемах.

Особенно опасен пожар судовой (корабельной) энергетической установки, так как он может привести к потере хода. В связи с этим важно подавить горение в такие сроки, чтобы огонь и опасные факторы пожара не привели бы к остановке энергетической установки судна (корабля).

Одним из важнейших аспектов, предотвращающих дальнейшее развитие возникшего пожара, является организация непрерывного тушения пожара с момента начала подачи огнетушащих средств до ликвидации.

Возможным методом прекращения открытого горения с наличием опасных для жизни и здоровья человека факторов является объемное тушение. При объемном способе пожаротушения прекращение открытого горения осуществляется без входа человека в помещение пожара, поэтому риск воздействия на человека опасных факторов пожара существенно уменьшается. Важно также использовать такую технологию объемного пожаротушения, при которой помимо прекращения открытого горения осуществляется также уменьшение температуры внутри помещений, а также осаждение дыма.

Для тушения пожаров предусматриваются стационарные установки пожаротушения, которые в качестве огнетушащего вещества применяют различные ОТВ.

Расчетная методика и стоимостные соображения не позволяют иметь на судне (корабле) достаточно большой запас ОТВ даже для пожароопасных помещений, а условия развития реального пожара не всегда могут быть учтены методикой.

Для достижения стабильного эффекта тушения установка объемного пожаротушения должна иметь производительность, позволяющую компенсировать утечку ОТВ из горящего помещения, и запас ОТВ, превышающий расчетное время тушения пожара.

Наиболее распространенными средствами объемного тушения являются газы и сложные химические составы, которые опасны для людей.

Поэтому перспективным направлением совершенствования способов тушения пожаров на судах (кораблях) является объемное тушение веществом, запас которого может быть создан на судне в избытке и безопасного для людей.

Литература

1. Разработка рекомендаций для подразделения ФПС МЧС России по тушению пожаров на наземных береговых сооружениях портов и судах, находящихся у причалов и пристанях морских портов и на внутренних водных путях / Отчет о НИР (заключительный). П.СП.Д.07.2004. Ч. 1, 2: «Тушение судов». М.: ВНИИПО, 2004. 76 с., 150 с.

2. Курятников В.В., Карпов А.В., Хасанов И.Р. Моделирование развития пожара в корабельных помещениях // Пожарная безопасность. 2015. № 3. С. 91-99.
3. Шедько С.В. Компьютерное моделирование динамики развития корабельного пожара // Труды Крыловского государственного научного центра. 2010. № 54. С. 91-98.
4. Руднев Е.В. О проблемах пожаротушения в морских портах и на судах в условиях низких температур // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2017. № 1 (21). С. 43-52.
5. Ершов А.В. Исследование эффективности тушения пожаров в замкнутых объемах кораблей и судов комбинированными огнетушащими составами на основе воды / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: СПбИ ГПС МЧС России, 2002.
6. Третьяков А.В., Колесник В.А. Моделирование развития пожарной ситуации в корабельном отсеке на основе методов системного анализа с использованием аппарата структурных матриц // Морской вестник. 2011. № 3. С. 81-86.
7. Закревский Ю.Н., Матвеев Р.П., Мануйлов В.М. Характеристика повреждений у спасенных и погибших при катастрофах, связанных с пожарами на кораблях и судах // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2011. № 4. с. 49-53.
8. Кузнецов С.А., Фесенко Ю.С., Халупенко В.А., Жаворонков В.В., Халупенко А.В. Подготовка специалистов по борьбе с пожаром: Учебно-методическое пособие // Библиотека журнала «Торговое мореплавание» (Серия: Правовое регулирование торгового мореплавания). №21/II. 2005. 56 с.
9. Средства пожарной автоматики. Область применения. Выбор типа: Рекомендации. М.: ВНИИПО МЧС России, 2004. 96 с.
10. ВУПП-88 Ведомственные нормы технологического проектирования. Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Миннефтехимпром СССР, 1989. 48 с.

Referencesⁱ

1. Razrabotka rekomendacij dlja podrazdelenija FPS MChS Rossii po tusheniju pozharov na nazemnyh beregovykh sooruzhenijah portov i sudah, nahodjashhijhsja u prichalov i pristanjah morskikh portov i na vnutrennih vodnyh putjah / Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj). P.SP.D.07.2004. Ch. 1, 2: «Tushenie sudov». M.: VNIIPPO, 2004. 76 s., 150 s.
2. Kurjatnikov V.V., Karpov A.V., Hasanov I.R. Modelirovanie razvitija pozhara v korabel'nyh pomeshhenijah Pozharnaja bezopasnost'. 2015. № 3. S. 91-99.
3. Shed'ko S.V. Komp'juternoe modelirovanie dinamiki razvitija korabel'nogo pozhara Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2010. № 54. S. 91-98.
4. Rudnev E.V. O problemah pozharotushenija v morskikh portah i na sudah v uslovijah nizkikh temperatur Prirodnye i tehnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2017. № 1 (21). S. 43-52.
5. Ershov A.V. Issledovanie jeffektivnosti tushenija pozharov v zamknutyh ob'emah korablej i sudov kombinirovannymi ognetushashhimi sostavami na osnove vody / Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. SPb.: SPbI GPS MChS Rossii, 2002.
6. Tret'jakov A.V., Kolesnik V.A. Modelirovanie razvitija pozharnoj situacii v korabel'nom otseke na osnove metodov sistemnogo analiza s ispol'zovaniem apparata strukturnyh matric / Morskoj vestnik. 2011. № 3. S. 81-86.
7. Zakrevskij Ju.N., Matveev R.P., Manujlov V.M. Harakteristika povrezhdenij u spasennyh i pogibshih pri katastrofah, svjazannyh s pozharami na korabljah i sudah Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah. 2011. № 4. s. 49-53.
8. Kuznecov S.A., Fesenko Ju.S., Halupenko V.A., Zhavoronkov V.V., Halupenko A.V. Podgotovka specialistov po bor'be s pozharem: Uchebno-metodicheskoe posobie // Biblioteka zhurnala «Torgovoe moreplavanie» (Serija: Pravovoe regulirovanie torgovogo moreplavanija). №21/II. 2005. 56 s.
9. Sredstva pozharnoj avtomatiki. Oblast' primenenija. Vyor tipa: Rekomendacii. M.: VNIIPPO MChS Rossii, 2004. 96 s.
10. VUPP-88 Vedomstvennye normy tehnologicheskogo proektirovanija. Vedomstvennye ukazanija po protivopozharnomu proektirovaniju predpriyatij, zdaniij i sooruzhenij neftepererabatyvajushhej i neftehimicheskoj promyshlennosti. M.: Minneftehimprom SSSR, 1989. 48 s.

УДК 629.54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ В СУДОВОМ ВОДООЧИСТНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Ирина Германовна Берёза

доктор технических наук, профессор,
профессор Кафедры техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: irina.beryoza@mail.ru

Тамара Сергеевна Брюшковская

аспирант Кафедры техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: tamara.bryushkovskaya@ya.ru

Ксения Александровна Балакирева

аспирант Кафедры техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: balakireva-kseniya@mail.ru

Татьяна Панайотовна Аванесова

кандидат педагогических наук, доцент,
доцент Кафедры иностранных языков
Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: avanesova1@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований сорбционной доочистки судовых нефтесодержащих вод с использованием природных сорбционных материалов.

В процессе разработки технологии доочистки судовых нефтесодержащих вод методом сорбции были исследованы следующие природные минералы: шунгит и монтмориллонит. На опытной установке определены параметры процесса статической и динамической сорбции нефтепродуктов из раствора льяльных вод. Установлено, что наиболее эффективным материалом для процессов динамической адсорбции мелкодисперсных частиц нефтепродуктов по времени защитного действия сорбционного фильтра является монтмориллонит. Разработана математическая модель процесса динамической сорбции, позволяющая определять эффективность процесса в зависимости от исходных концентраций нефтепродуктов в воде и режима очистки.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждены в ходе испытаний на промышленной установке судового сепаратора. Установлена экономическая целесообразность применения природных сорбционных материалов на завершающем этапе очистки судовых льяльных вод.

Ключевые слова: предотвращение загрязнения морской среды, сепараторы судовых льяльных вод, природные сорбенты

THE USE OF NATURAL SORBENTS IN THE SHIP WATER PURIFICATION EQUIPMENT

Irina G. Beryoza

Doctor of Engineering Science, Professor,
Professor of the "Transport Technosphere Safety Chair"
Admiral Ushakov Maritime State University
93, Lenina Avenue, Novorossiysk
e-mail: irina.beryoza@mail.ru

Tamara S. Bryushkovskaya

postgraduate of the "Transport Technosphere Safety Chair"
Admiral Ushakov Maritime State University
93, Lenina Avenue, Novorossiysk
e-mail: tamara.bryushkovskaya@ya.ru

Ksenia A. Balakireva

postgraduate of the "Transport Technosphere Safety Chair"
Admiral Ushakov Maritime State University
93, Lenina Avenue, Novorossiysk
e-mail: balakireva-kseniya@mail.ru

Tatiana P. Avanesova

Cand.SC. (Pedagogy), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Foreign Languages, PhD
Admiral Ushakov Maritime State University
93, Lenina Avenue, Novorossiysk
e-mail: avanesova1@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of the final sorption purification of ship oily water by means of natural sorbent materials.

Nowadays activated charcoal of various brands is used as filter materials in the ship's bilge water separators during the final stage of processing. The cost of them is quite high both in Russia and abroad due to the complicated process of manufacturing, requiring much time and expenses. These circumstances result in searching new cheaper sorbents.

Such natural resources as shungite and montmorillonite have been investigated in the process of working out the technology of final bilge water solution purification. The parameters of both static and dynamic sorption of petroleum products from the bilge water solution have been defined by means of the experimental installation. It is stated that montmorillonite is the best natural resource for the dynamic adsorption of oil fine particles according to the duration of the sorption filter protection. The mathematical model of the dynamic process of sorption for determining the efficiency of the process depending on the initial concentrations of petroleum products in water and cleaning mode has been worked out.

Obtained results of experimental researches have been approved in the process of experimental work with the help of the industrial vessel separator installation. The economic efficiency of natural sorption materials during the final stage of ship bilge water treatment has been defined.

Key words: prevention of the marine environmental pollution, marine bilge water separators, natural sorbents.

Введение

Предотвращение загрязнения морей нефтесодержащими смесями (НСС) в настоящее время считается одной из приоритетных экологических задач, поскольку нефть и нефтепродукты являются наиболее распространенными и пагубными загрязнителями водных экосистем.

К судовым НСС относят, в том числе, льяльные воды машинно-котельных отделений судов. В соответствии с требованиями Конвенции МАРПОЛ 73/78 и резолюцией МЕРС.107(49) в Международных водах разрешается сбрасывать за борт очищенные льяльные воды с концентрацией нефтепродуктов не более 15 млн^{-1} [1, 2]. Достижение таких показателей загрязнений в очищенной воде (с учетом концентрации нефтепродуктов в исходной воде $\sim 1000 - 2000 \text{ млн}^{-1}$) возможно лишь при многоступенчатой обработке льяльных вод.

Как известно из практики очистки льяльных вод, адсорбция является практически единственным методом, позволяющим очищать НСС от мелкодисперсных частиц нефтепродуктов до минимальных остаточных концентраций.

В настоящее время в судовом очистном оборудовании в качестве фильтрующих материалов на последней стадии обработки используют в основном активированные угли различных марок [3, 4, 5]. Процесс изготовления активированных углей сложен и длителен, требует значительных затрат энергии, поэтому стоимость данных материалов достаточно высока как в России, так и за рубежом.

Данные обстоятельства приводят к поиску новых более дешевых сорбентов.

1. Постановка задачи

В процессе разработки технологии доочистки судовых льяльных вод методом сорбции были исследованы следующие природные минералы: шунгит и монтмориллонит.

Адсорбция из водных растворов – процесс чрезвычайно сложный и поэтому, несмотря на длительное практическое использование, отсутствуют расчетные зависимости, пригодные для всех случаев. Основную информацию об эффективности применения конкретных материалов в качестве сорбентов содержат: максимальная сорбционная емкость материала (A_{max}); кинетические характеристики процесса в конкретных гидродинамических условиях [6, 7].

Экспериментальные исследования сравнения сорбционных характеристик материалов проводились на льяльной воде, прошедшей первую стадию обработки с исходной концентрацией нефтепродуктов – $15-75 \text{ мг/дм}^3$ в статическом режиме процесса.

2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Величина равновесной адсорбции рассчитывалась по формуле

$$A_p = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где A_p - адсорбция, мг/г; C_0 , C_p - исходная и равновесная концентрации нефтепродуктов в растворе соответственно, мг/дм³; V - объем исследуемого раствора, дм³; m - масса образца

сорбента, г.

Максимальная удельная адсорбция (A_{max}) является одним из основных критериев оценки сорбционных свойств исследуемых материалов и определяет максимальную поглотительную емкость сорбента в условиях равновесия [7].

Таблица 1

Экспериментальные данные статической сорбции

Адсорбент: монтмориллонит							
C_0 , мг/ дм ³	8,7	22,6	24,4	25,3	35,2	60,2	72,0
C_{pi} , мг/ дм ³	1,3	2,0	2,4	2,8	5,2	14,5	20,0
A_i , мг/г	3,9	4,6	5,0	5,3	6,7	10,2	11,6
Адсорбент: шунгит							
C_0 , мг/ дм ³	18,7	22,6	24,4	25,3	35,2	60,2	72,0
C_{pi} , мг/ дм ³	4,4	5,7	6,4	7,0	11,4	22,1	28,2
A_i , мг/г	4,2	4,5	5,7	5,9	6,9	8,6	9,3

Установлено, что степень извлечения нефтепродуктов из раствора увеличивается в ряду - шунгит < монтмориллонит.

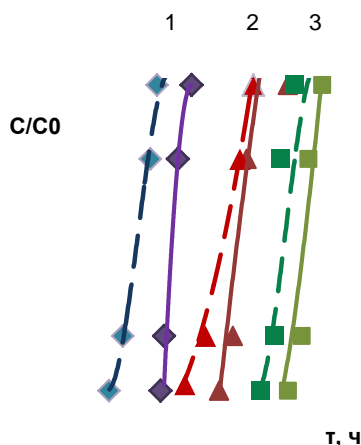


Рис.1 Содержание нефтепродуктов в подвижной фазе при движении потока воды через неподвижный слой сорбента на уровнях фиксации 1 – 3: 1 – L = 0,5 м; 2 – L = 0,75 м; 3 – L = 1,0 м; (-) - монтмориллонит, (- -) - шунгит

Исследование кинетических характеристик системы «нефтеводяной раствор – адсорбент» позволили установить внешнедиффузионный механизм массопереноса процесса сорбции.

Динамические характеристики процесса сорбции нефтяных веществ из раствора (длина неподвижного слоя, время защитного действия, скорость потока) определялись на опытной установке, моделирующей технологию очистки. Исследования проводились на нефтесодержащих водах с исходной концентрацией нефтепродуктов 20 - 50 мг/дм³ при скорости потока $v = 2 - 6$ м/ч.

Результаты экспериментальных исследований динамической сорбции представлены на рис. 1.

Выходные кривые 1 - 3 получены при длине слоя сорбента в колонке 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м. Как

следует из полученных данных, кривая 2 уже воспроизводит кривую 3 и совмещается с ней при смещении по оси абсцисс, т.е. устанавливается постоянная скорость фронта сорбционной волны (зоны массопередачи) вдоль слоя сорбента.

Таблица 2

Параметры уравнения динамического процесса адсорбции

Показатели	Адсорбент	
	Монтмори ллонит	Шунгит
Кoeffициент защитного действия, ч/м	122	98
Потеря времени защитного действия, ч	6	4

В результате статистической обработки данных экспериментальных исследований получены основные параметры уравнений динамического процесса сорбции нефтепродуктов из НСС, которые представлены в таблице 2.

Как следует из полученных данных, монтмориллонит обладает большей сорбционной емкостью по отношению к нефтяным загрязнениям. Так, коэффициент защитного действия фильтра с восходящим потоком при очистке НСС с исходной концентрацией нефтепродуктов 50 мг/дм³ до концентрации в очищенной - 10 мг/дм³ для монтмориллонита составил 122 ч/м, для шунгита – 98 ч/м (таблица 2).

Выходные кривые динамического процесса адсорбции были также получены теоретически при разработке математической модели процесса [8, 9].

Теоретическая модель динамики адсорбции в неподвижном плотном слое загрузки включала уравнения материального баланса веществ, кинетики адсорбции, изотермы адсорбции и соответствующие краевые условия.

Уравнение материального баланса

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} + \varepsilon_n \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

где $a(x,t)$ - удельная адсорбция, отнесенная к единице объема слоя (с учетом насыпной плотности); $C(x,t)$ - концентрация вещества в жидкости; t - время; x - расстояние от входа в слой до уровня замера; ε_n - порозность слоя.

Уравнение кинетики процесса

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta(C - C_p). \quad (3)$$

где C и C_p - концентрации вещества в растворе в данный момент времени и при равновесии соответственно; β - коэффициент массопереноса.

Уравнение изотермы адсорбции

$$a = KC^n \quad (4)$$

Краевые условия: при $t = 0$ $a = 0$ $C = C_0$ (5)

На основании совместного решения уравнений (2), (3) 4) с учетом краевых условий (5), при использовании пакетов компьютерной математики MatLAB и Maple получена математическая модель процесса динамической адсорбции частиц нефтепродуктов из раствора льяльных вод.

$$c(x, t) = D_1 D_2 e^{d_1 x} e^{-\frac{d_1 t \varepsilon_n}{v}} e^{\frac{t \beta}{v}} + D_1^{-1} D_2 C_p e^{-\frac{\beta x}{\varepsilon}} \quad (6)$$

где D_1 D_2 d_1 - константы, определяемые из начальных условий.

Как следует из анализа полученных графиков, теоретически определенные выходные кривые адекватно описывают экспериментально установленные выходные кривые

3. Результаты производственных испытаний

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждены в ходе испытаний на промышленной установке судового сепаратора, установленной на береговых очистных сооружениях нефтеперевалочной базы. В процессе производственных испытаний сравнивалась эффективность работы адсорбционных фильтров загруженных активированным углем марки CENTAUR и монтмориллонитом Астраханского месторождения с размером фракций 0,8 мм [10].

Результаты производственных испытаний с использованием в качестве адсорбента монтмориллонита приведены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели очистки

Исходная НСВ, поступающая на фильтры, мг/дм ³	20 - 50
Очищенная вода, мг/дм ³	3-10
Эффективность очистки, %	80 - 85

Также определены оптимальные технологические параметры процесса сорбционной очистки нефтесодержащей воды:

- адсорбционная емкость монтмориллонита (относительно извлекаемых нефтепродуктов) – 12,5 мг/г;
- коэффициент защитного действия адсорбционного фильтра – 122 ч/м;
- скорость движения потока воды в фильтре – 2 м/ч;
- высота фильтрующего слоя – 2 м.

Таким образом, в процессе проведения производственных испытаний эффективность извлечения нефтепродуктов из НСВ составила – (80 - 85) %, содержание нефтепродуктов в очищенной воде, при этом, не превышало 10 мг/дм³, что приблизительно составляет 11,5 млн⁻¹.

Выводы

1. На основании результатов экспериментальных исследований разработана технология глубокой очистки судовых льяльных вод от мелкодисперсных частиц нефтепродуктов с использованием природного сорбирующего материала монтмориллонита.

2. Разработана математическая модель процесса динамической сорбции, позволяющая определять эффективность процесса в зависимости от исходных концентраций нефтепродуктов в льяльной воде и режима очистки.

3. Найден оптимальные режимы процессов сорбционной доочистки льяльных вод, обеспечивающие содержание нефтепродуктов в очищенной воде менее 15 млн⁻¹. Установлено, что для монтмориллонита значение коэффициента защитного действия фильтра при скорости потока - 2 м/ч составляет величину - 122 ч/м; адсорбционная емкость минерала (относительно извлекаемых нефтепродуктов) - 12,5 мг/г.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждены в ходе испытаний на промышленной установке судового сепаратора.

Литература

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973, измененная и дополненная, протоколом к ней 1978 г., или, сокращенно, МАРПОЛ 73/78: в 2 т. - М.: Изд-во ЦНИИМФ, 2012. – 762 с.
2. Резолюция МЕРС.107(49) Пересмотренные руководство и технические требования по оборудованию для предотвращения загрязнения из льял машинных помещений судов. – С-Пб: ЦНИИМФ, 2004.
3. Тихомиров Г.И. Модернизация судовых нефтеводяных сепараторов // Морской флот.- 2003.- №6. - С.40-41.
4. Тихомиров Г.И. Анализ методов и технических средств очистки льяльных вод вод / Г.И. Тихомиров // Транспортное дело России. – 2015. – № 6 – С. 288– 292
5. Михрин Л.М. Предотвращение загрязнения морской среды с судов и морских сооружений. – СПб.: «ИПК Бионт», 2005.
6. Решняк В. И., Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: монография – СПб: СПбГУВК, 2011. – 207с.
7. Когановский А. М. Адсорбция органических веществ из воды / А. М. Когановский, Н. А. Клименко. - С-Пб: Химия, 1990.
8. Фролов В.А. Процессы и аппараты химической технологии / В.А. Фролов. – С-Пб: Химиздат, 2003.
9. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды / В.И. Кичигин. – М.: АСВ, 2008. – 230с.
10. Береза И.Г. Очистка судовых нефтесодержащих вод / И.Г. Береза, А.А. Кучинская // Транспортное дело России. – 2011. – № 9. – С. 103-105.

References

1. The International Convention for the prevention of pollution from ships, 1973, cor-rected and supplemented by the Protocol of 1978, or, in abbreviated form, MARPOL 73/78: in 2 T. Moscow, Publishing house CNIIMF, 2012. 762 p.
2. Resolution МЕРС.107(49) Revised guidelines and specification for pollution preven-tion equipment for machinery space bilges of ships. S-Pb, CNIIMF, 2004.
3. Tikhomirov G.I. Modernizatsiya sudovykh neftevodnykh separatorov. Mor-skoy flot, 2003, №6. pp. 40-41.
4. Tikhomirov G.I. Analiz metodov i tekhnicheskikh sredstv ochistki l'yal'nykh vod. Transportnoe delo Rossii, 2015, № 6. pp. 288– 292.
5. Mikhrin L.M. Predotvrashchenie zagryazneniya morskoy sredy s sudov i mor-skikh sooruzheniy. SPb, «IPK Biont», 2005.
6. Reshnyak V. I., Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchey podslanevoy vodoy pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok: mono-grafiya. SPb, SPbGUVK, 2011. 207 p.
7. Koganovskiy A. M. Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody. S-Pb, Khimiya, 1990.
8. Frolov V.A. Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. S-Pb, Khimizdat, 2003.
9. Kichigin V.I. Modelirovanie protsessov ochistki vody. V.I. Moscow, ASV, 2008. 230 p.
10. Beryoza I.G. Ochistka sudovykh neftesoderzhashchikh vod. Transportnoe delo Ros-sii, 2011, № 9. pp. 103-105.

УДК 629.124

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ФИРМЫ «CATERPILLAR» CAT 3512 ГРУНТОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ЗЕМСНАРЯДА ПО ВИБРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

Евгений Владимирович Хекерт

доктор технических наук, профессор, проректор
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Николай Иванович Николаев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые тепловые двигатели
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Виктор Васильевич Герасиди

кандидат технических наук, доцент кафедры судовые тепловые двигатели
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93
e-mail: gerasidi@rambler.ru

Аннотация

В статье описываются проблемы технической эксплуатации судов дноуглубительного флота. В статье приведены результаты контроля технического состояния двигателя фирмы «Caterpillar» CAT 3512 грунтонасосной установки земснаряда на различных режимах эксплуатации по параметрам вибрации. Полученные результаты анализа позволили оценить техническое состояние двигателя по существующим в настоящее время нормативным документам. В статье выявили, что в настоящее время, нет нормативных документов, по которым можно оценить техническое состояние по параметрам вибрации турбокомпрессора двигателя. В статье был выполнен сравнительный анализ параметров вибрации турбокомпрессора аналогичного двигателя фирмы «Caterpillar» CAT 3516HD, находящегося в нормальном техническом состоянии, который показал, что техническое состояние турбокомпрессора двигателя CAT 3512 находится в неудовлетворительном состоянии.

Ключевые слова: грунтонасосная установка, контроль, параметры вибрации, двигатель, турбокомпрессор, нормы, программа испытаний.

INSPECTION OF ENGINE COMPANY CATERPILLAR CAT 3512 GRUNTOVALNOY THE INSTALLATION OF THE DREDGE FOR VIBRATION PARAMETERS

Evgeny V. Hekert

the professor, Dr.Sci.Tech., pro-rector
Admiral Ushakov State Maritime University
Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Nikolay I. Nikolaev

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of marine heat engines
Admiral Ushakov State Maritime University
Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93

Viktor V. Gerasidi

Can..Sci.Tech., the docent of department of marine heat engines
Admiral Ushakov State Maritime University
Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93
e-mail: gerasidi@rambler.ru

Abstract

The paper describes the problems of technical operation of ships of the dredging fleet. The article presents the results of technical inspection of Caterpillar CAT 3512 gruntovalnoy installation of the dredger at various modes of operation for vibration parameters. The results of analysis allowed to evaluate the technical condition of the engine

according to the current regulations. The article pointed out that currently, there are no normative documents on which it is possible to evaluate the technical condition by vibration parameters of the turbocharger of the engine. The article made a comparative analysis of vibration parameters of the turbocharger, the same engine of the firm "Caterpillar" CAT 3516HD in the normal condition, which showed that the technical condition of the turbocharger engine CAT 3512 is in poor condition.

Key words: gruntovalnoy installation, monitoring, vibration parameters, engine, turbocharger, standards, testing program

Введение

Нормальная работа и функционирование портов, водных путей, увеличение их грузооборота и пропускной способности невозможно без постоянного поддержания и обеспечения судоходных глубин, расширения габаритов и увеличения проходных осадок на акваториях портов, каналах и водных путях Российской Федерации. В настоящее время также увеличивается спрос на нерудные строительные материалы (песок, гравий), которые добываются многочерпаковыми земснарядами и землесосами. Дноуглубительный флот играет большую роль в

развитии объектов портовой инфраструктуры в морских портах России [1]. Эффективная работа дноуглубительного флота во многом определяется техническим состоянием технологического оборудования, которое можно определить методами безразборной технической диагностики [2].

1. Объект исследования

В состав грунтонасосной установки судна т/х «Трофа» (Земснаряд) предназначенное для производства дноуглубительных работ и добычи нерудных строительных материалов, входит дизель, редуктор и насос, которые находятся на одном фундаменте (рис.1)

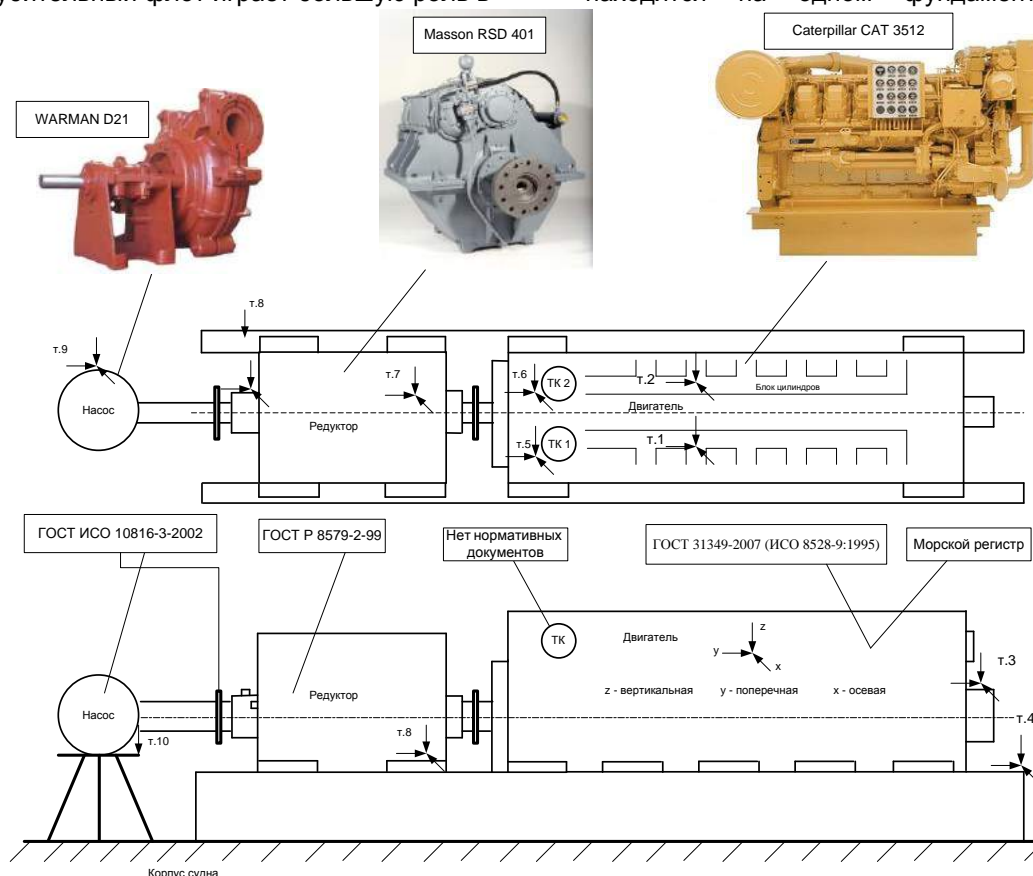


Рис. 1. Принципиальная схема грунтонасосной установки двигателя CAT 3512 с указанием место установки датчиков и нормативными документами контроля вибрации

В качестве дизеля установлен двигатель с наддувом фирмы «Caterpillar» модели CAT 3512 мощностью 1200 кВт. При максимальной нагрузке двигателя происходит снижение технико-экономических параметров двигателя и всей грунтонасосной установки в целом. Повышается температура отработавших газов, двигатель не набирает необходимой нагрузки, с

трубы отработавших газов идет черный дым. Все эти неисправности привели к необходимости проведения оценки технического состояния двигателя и всей грунтонасосной установки судна [3,4].

В качестве метода контроля был использован безразборный метод диагностики по вибрационным параметрам

[5,6]. В связи с этим была разработана программа испытаний, которая включает:

1. Объект контроля: двигатель с наддувом фирмы «Caterpillar» модели CAT 3512; турбокомпрессор (ТК) с радиально-осевой турбиной фирмы «Caterpillar» с максимальной частотой вращения $60 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ (1000 Гц).

2. Режим работы ДВС: 1) $n = 12 \text{ Гц} = 720 \text{ мин}^{-1}$; 2) $n = 16 \text{ Гц} = 960 \text{ мин}^{-1}$; 3) $n = 20 \text{ Гц} = 1200 \text{ мин}^{-1}$; 4) $n = 22 \text{ Гц} = 1320 \text{ мин}^{-1}$.

3. Схема проведения контроля: рисунок 1. Контроль выполнен измерительными средствами: анализатор шума и вибрации:

2. Двигатель с наддувом фирмы «Caterpillar» модели CAT 3512

На рисунке 2, в качестве примера, представлен спектр виброскорости ВОД фирмы Caterpillar с наддувом, где указаны частоты характеризующие работу двигателя. Основные

портативный прибор «VIBXPERT I VIB 5.310», заводской номер 031476 с последующей обработкой полученных результатов на персональном компьютере [7].

Из рисунка 1 видно, что контроль вибрации был выполнен в: точка 1,2 на двигателе в районе коллектора отработавших газов с двух сторон; точке 3 – на двигателе в районе блока цилиндров ближе к картеру; точке 4 на корпусе судна; точках 5,6 – на корпусе ТК; точке 7 на корпусе редуктора; точке 8 на фундаменте редуктора; точке 9 на корпусе насоса; точке 10 на фундаменте насоса. колебания на $\frac{1}{2}$ оборотной и оборотной f_0 частоты вращения коленчатого вала двигателя и ТК [8,9].

Для характеризующих частот работы двигателя (до 13 пункта, рис.2) до $12f_0$ равной 300 Гц есть нормы виброскорости в среднегеометрических $\frac{1}{3}$ октавных частот указанных в РМРС [9], а для ТК $\frac{1}{2} f_{0\text{ТК}}$ и $f_{0\text{ТК}}$ (14,15 пункт, рис.2) нет.

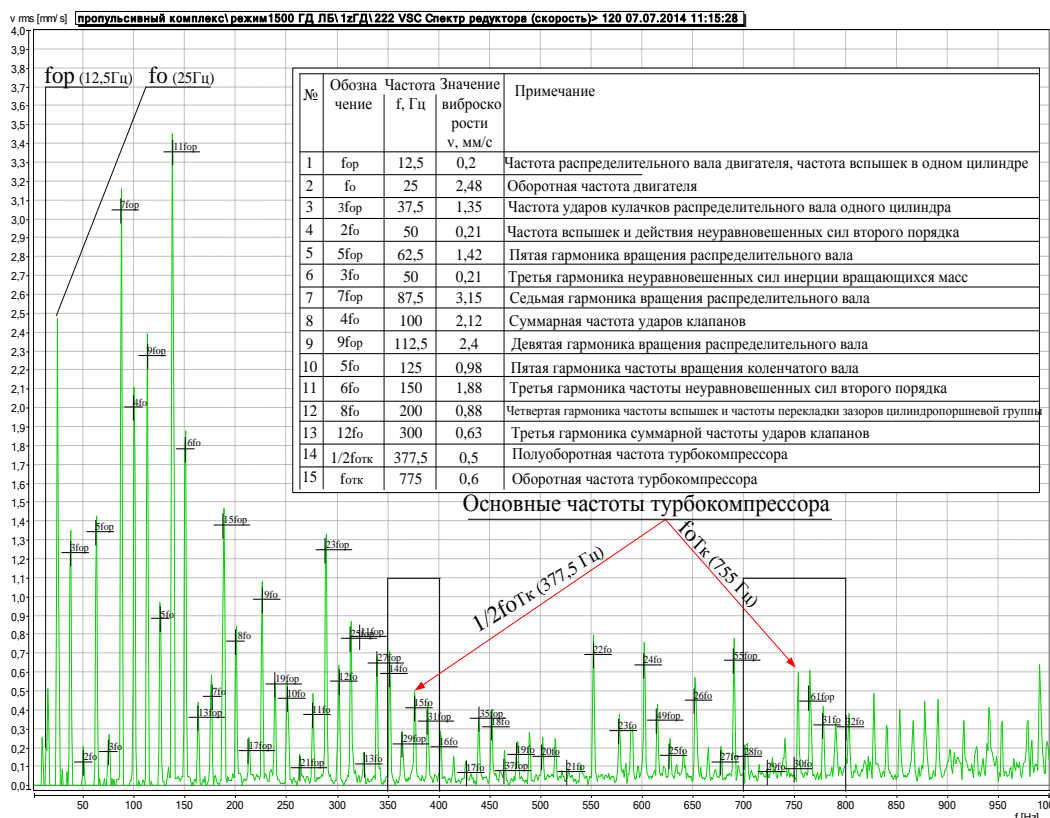


Рис.2. Спектр виброскорости в вертикальном направлении z высокооборотного двигателя с наддувом

На рисунке 3 представлены спектры виброскорости во всех направлениях вибрации (z,x,y) двигателя с наддувом CAT 3512 под нагрузкой 22 Гц (1320 мин^{-1}) в точках 1,2 на которых нанесены полосы среднегеометрических частот с указанными нормами (зеленый - зона А нового оборудования - желтый - зона В оборудования в эксплуатации; красный - неудовлетворительное состояние оборудования). Из рисунка 3 видно:

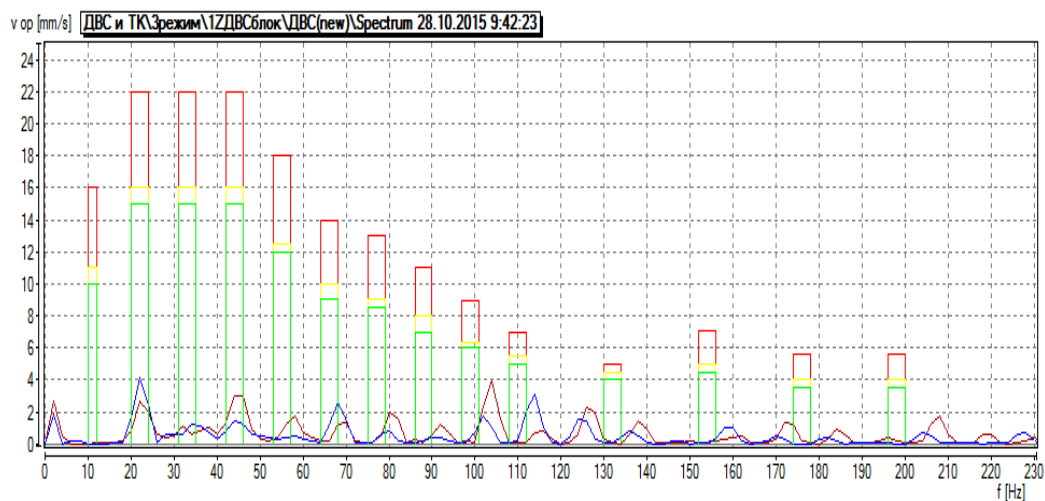
1) во всех направлениях вибрации (z,x,y) двигатель с наддувом CAT 3512 под нагрузкой 22 Гц

(1320 мин^{-1}) в точка 1,2 не превышает нормам [10,11].

2) однако видно, что на рисунке 3 в поперечном (x) и осевом (y) в направлении вибрации в точках 1,2 максимальное значение вибрации составляет на оборотной частоте 22 Гц значение виброскорости составляет 8 мм/с, что в два раза больше вертикальной составляющей (z) 4мм/с. Это говорит о том, что двигатель нагружен в этих направлениях [x,y]. Причем в поперечном направлении вибрации

(x) в точке 1 больше чем в точке 2, что говорит о раскачивании двигателя. Что касается осевой составляющей вибрации двигателя (y) это

говорит о влиянии редуктора на двигатель или состояние опорно-упорного подшипника двигателя [3,4].



Рим. 3. Вибрационные параметры в вертикальном направлении двигателя с наддувом CAT 3512 под нагрузкой 22 Гц (1320 мин^{-1}) в точках 1-----; 2-----

3. Турбокомпрессор двигателя фирмы «Caterpillar» модели CAT 3512

В настоящее время нет нормативных документов для оценки технического состояния по виброакустическим параметрам ТК с РОС турбин с подшипниками скольжения с двойным масляным клином и частотой вращения ротора более $n_{\text{тк}} \geq 30 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Таким образом, для анализа вибрации ТК можно сравнить:

- 1) на различных нагрузках двигателя (рисунок 4);
- 2) с ТК аналогичного двигателя с наддувом CAT 3512HD, который находится в нормальном техническом состоянии, у которого наработка после переборки составляет 2000 часов (рисунок 5).

Из рисунка 4 видно, что при увеличении нагрузки на двигатель значение виброскорости оборотной частоты вращения ТК левого борта не меняется, как и правого борта.

Например, на рисунке 5 на ТК аналогичного двигателя под нагрузкой CAT 3516 HD лопаточная составляющая ТК в вертикальном направлении вибрации находится в районе 5500 Гц, а для исследуемых ТК под нагрузкой двигателя CAT 3512 составляет около 3000 Гц. Это говорит о том, что ТК не набирает оборотов и в связи с этим, давление наддува двигателя недостаточное для полноценного и качественного процесса сгорания топлива в цилиндрах двигателя. Это свидетельствует о неудовлетворительном состоянии подшипниковых узлов ТК. В связи с этим необходимо его ремонт или полная замена.

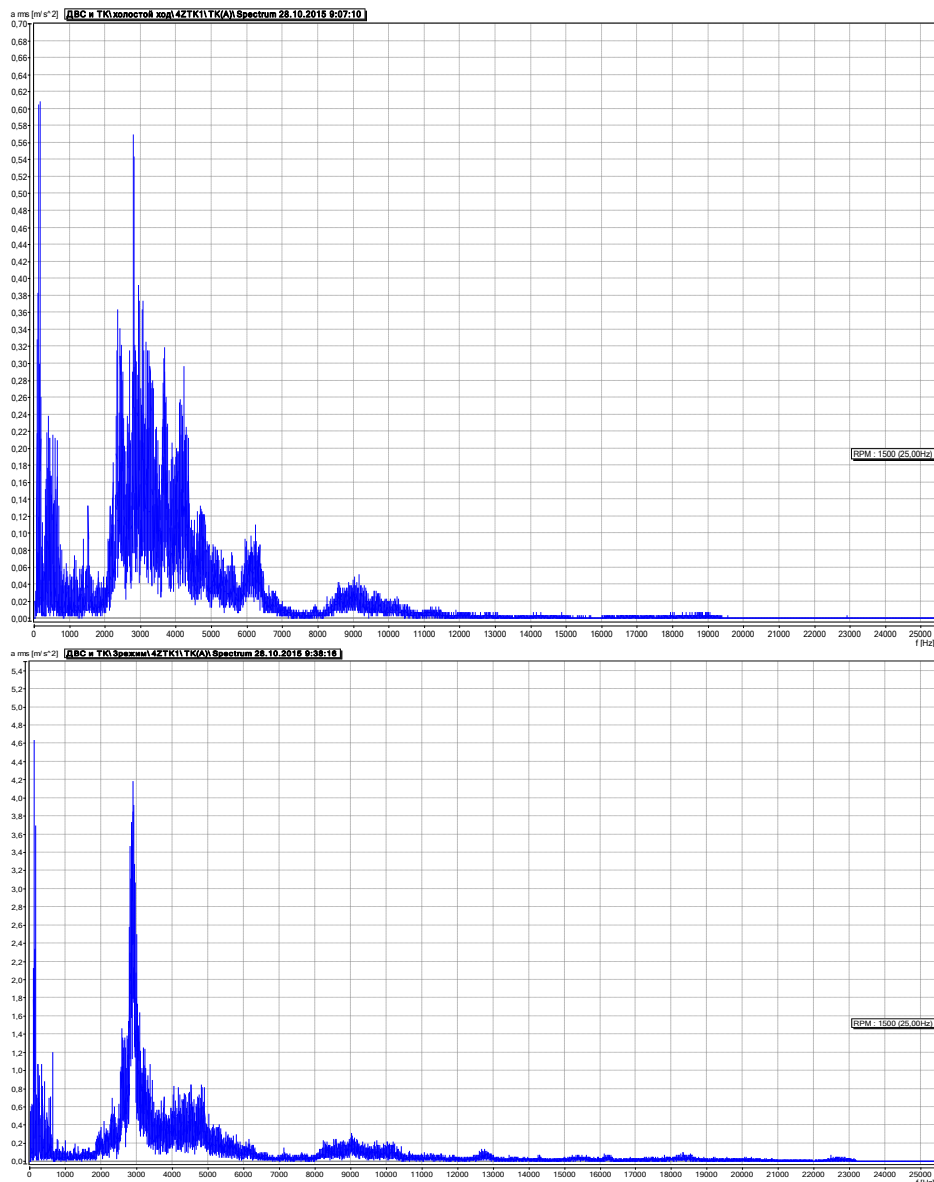


Рис. 4. Вибрационные параметры в вертикальном направлении (Z) ТК двигателя CAT 3512v в точке 5 на режиме холостого хода 12 Гц (720 мин^{-1}); при нагрузке 22 Гц (1320 мин^{-1})

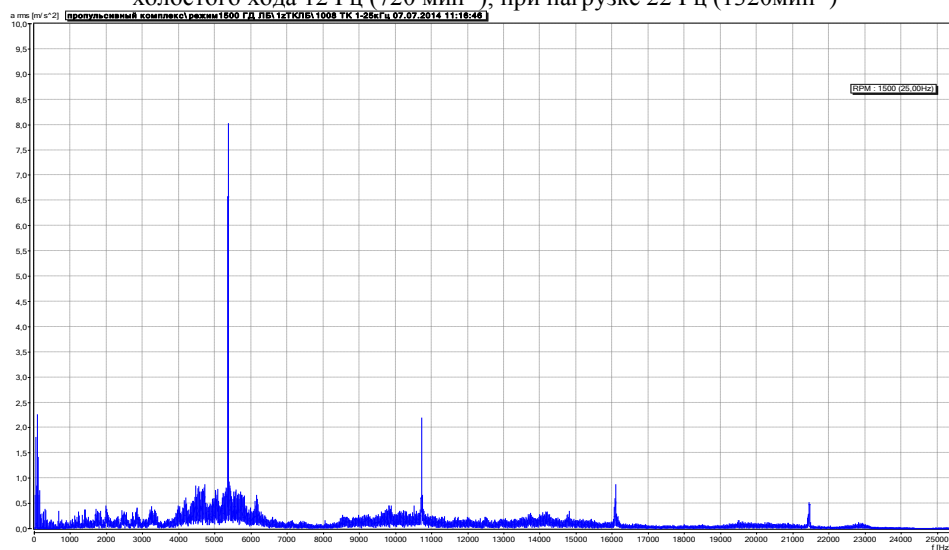


Рис. 5. Вибрационные параметры в вертикальном направлении (Z) ТК двигателя CAT 3516 HD при нагрузке 22 Гц (1320 мин^{-1})

Заключение

Выполненный контроль вибрации двигателя с наддувом фирмы «Caterpillar» модели CAT 3512 показал что:

1. Техническое состояние двигателя по параметрам вибрации удовлетворительное не превышают значений указанных в [10,11] и

соответствует категории "В" (состояние механизмов во время нормальной эксплуатации).

2. Техническое состояние ТК двигателя CAT 3512 находится в неудовлетворительном состоянии, при сравнении с ТК аналогичного двигателя под нагрузкой CAT 3516 HD.

Литература

1. РД 31.74.04-2002 «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним», Ростов-на-Дону: Морфлот, 2004.
2. Вибродиагностика: Моногр. / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др.; под ред. Г.Ш. Розенберга. - СПб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.
3. Герике Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие / Б.Л. Герике, Г.И. Козовой, В.С. Квагинидже, А.А. Хорешок, П.Б. Герике. Москва, 2012. – 400 с.
4. Герике П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: Институт угля Сибирского отделения РАН. – М. – изд-во «Горная книга». – 2013. - №ОБ 6. – С. 440 – 446.
5. ГОСТ Р ИСО 53964-2010 Вибрация. Измерения вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений. М.: Стандартинформ, 2011.
6. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 (ИСО 13373-2:2005) «Контроль состояния и диагностика машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации». М.: Стандартинформ, 2010
7. Мобильные приборы для мониторинга состояния VIBXPERT II: [сайт]. URL: <http://www.pruftechnik.com/ru/produkcija/monitoring-sostojanija/mobilnye-pribory-dlja-monitoringa-sostojanija/vibxper-ii.html> (дата обращения 18.11.2017).
8. Попков В.И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. Судостроение, 1974. –с. 220.
9. Возницкий И.В., Камкин С.В., Шмелев В.П., Остащенко В.Ф. Рабочие процессы судовых дизелей. М.: Транспорт, 1979.
10. Российский морской регистр судоходства / Правила классификации и постройки морских судов; Том 2- НД «2-020101-077», 2013.
11. ГОСТ 31349-2007 (ИСО 8528-9:1995) «Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния». М.: Стандартинформ, 2008

References

1. RD 31.74.04-2002 «Tehnologija promernih rabot pri proizvodstve dnouglubitel'nyh rabot i pri kontrole glubin dlja bezopasnosti plavanija sudov v morskikh portah i na podhodah k nim», Rostov-na-Donu: Morflot, 2004.
2. Vibrodiagnostika: Monogr. Rozenberg G.Sh., Madorskij E.Z., Golub E.S. i dr.; pod red. G.Sh. Rozenberga. - SPb.: PJeIPK, 2003. – 284 s.
3. Gerike B.L. Diagnostika gornyh mashin i oborudovanija. Uchebnoe posobie / B.L. Gerike, G.I. Kozovoj, V.S. Kvaginidzhe, A.A. Horeshok, P.B. Gerike. Moskva, 2012. – 400 s.
4. Gerike P. B. Vibrodiagnostika oborudovanija ugol'noj i gornorudnoj promyshlennosti. Otdel'nyj vypusk Gornogo informacionno-analiticheskogo bjulletenja: Institut uglja Sibirskogo otdelenija RAN. – M. – izd-vo «Gornaja kniga». – 2013. - №OV 6. – S. 440 – 446.
5. GOST R ISO 53964-2010 Vibracija. Izmerenija vibracii sooruzhenij. Rukovodstvo po provedeniju izmerenij. M.: Standartinform, 2011.
6. GOST R ISO 13373-2-2009 (ISO 13373-2:2005) «Kontrol' sostojanija i diagnostika mashin. Chast' 2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'tatov izmerenij vibracii». M.: Standartinform, 2010
7. Mobil'nye pribory dlja monitoringa sostojanija VIBXPERT II: [sajt]. URL: <http://www.pruftechnik.com/ru/produkcija/monitoring-sostojanija/mobilnye-pribory-dlja-monitoringa-sostojanija/vibxper-ii.html> (data obrashhenija 18.11.2017).
8. Popkov V.I. Vibroakusticheskaja diagnostika i snizhenie vibroaktivnosti sudovyh mehanizmov. Sudostroenie, 1974. –s. 220.
9. Voznickij I.V., Kamkin S.V., Shmelev V.P., Ostashhenko V.F. Rabochie processy sudovyh dizelej. M.: Transport, 1979.
10. Rossijskij morskoy registr sudohodstva / Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov; Tom 2- ND «2-020101-077», 2013.
11. GOST 31349-2007 (ISO 8528-9:1995) «Jelektroagregaty generatornye peremennogo toka s privodom ot dvigatelja vnutrennego sgoranija. Chast' 9. Izmerenie vibracii i ocenka vibracionnogo sostojanija». M.: Standartinform, 2008

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МАЛООБОРОТНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА

Александр Владимирович Туркин

кандидат технических наук, доцент кафедры Техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: alekstur@yandex.ru

Владимир Антонович Туркин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: turvla@mail.ru

Анатолий Юрьевич Самойленко

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: say-nvrsk@yandex.ru

Аннотация

Выполнено моделирование рабочих процессов малооборотного судового двигателя MAN D&T серии MC с целью снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами. Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, влияющих на эмиссию NO_x. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного ДВС, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-ПК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию базового двигателя. Получена математическая модель в виде уравнения регрессии, описывающая влияние исследуемых параметров на целевую функцию – удельный выброс оксидов азота. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование факторного эксперимента второго порядка. На основе полученных математических моделей может быть выполнена многопараметрическая оптимизация малооборотного судового двигателя.

Ключевые слова: судовой малооборотный двигатель, оксиды азота, отработавшие газы, моделирование, удельный выброс.

SHIP LOW-SPEED ENGINE WORKING PROCESSES MODELING TO REDUCE THE NITROGEN OXIDES EMISSION

Aleksandr V. Turkin

Cand. Sci. Tech.,
Docent of the department of Technosphere safety in transport
Admiral Ushakov Maritime University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: alekstur@yandex.ru

Vladimir A. Turkin

Professor, Dr. Sci. Tech.,
Professor of the department of Technosphere safety in transport
Admiral Ushakov Maritime University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: turvla@mail.ru

Anatoly Yu. Samoilenko

Dr. Sci. Tech.,
Professor of the department of Operation of ship electrical equipment and automation
Admiral Ushakov Maritime University

Lenin Avenue, 93, Novorossiysk 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: say-nvrsk@yandex.ru

Abstract

The MAN D & T MC series ship low-speed engine working processes modeling to reduce exhaust gases nitrogen oxides emissions is performed. The aim of the simulation is to search for constructive and operational solutions that affect the emission of NO_x. When performing the calculation study, a mathematical model of a combined internal combustion engine was used, implemented in the computer program DIESEL-RK. The compression ratio, the injection timing and the fuel injection duration are adopted as studied variables, the values of which can be set without making significant changes to the design of the basic engine. A mathematical model in regression equation form that describes the studied parameters influence to the objective function - the nitrogen oxides specific emission is obtained. To determine the coefficients of the regression equation, a second-order factorial analysis is implemented. On the basis of the mathematical models obtained, multiparametric optimization of a low-speed marine engine can be performed.

Keywords: ship low-speed engine, nitrogen oxides, exhaust gases, modeling, specific emission.

Введение

Задачей данного расчетного исследования было моделирование рабочего процесса серийного судового дизельного двигателя. В качестве объекта исследования выбран двухтактный малооборотный судовый дизель MAN D&T 6S60MC. Главные судовые малооборотные двигатели MAN D&T серии MC отличаются надежностью, большим моторесурсом и высокой экономичностью. По оценкам многих судовых механиков дизели этой серии являются самыми надежными в своем классе [1]. Эти двигатели заслуженно получили наибольшее распространение на морском транспортном флоте [2, 4].

Дизели компании “MAN D&T” занимают, примерно, 85% всех МОД мирового морского флота и всего за период с 1982 г. по 2009 г. было построено 16,283 двигателей моделей MC/C[3]. 88% главных малооборотных двигателей, установленных на судах компании ОАО “Новошип”, составляют двигатели моделей SMC и SMC/C [4]. Поэтому в качестве объекта расчетного исследования был выбран двигатель этой серии.

Двигатели моделей MC[3] – это судовые малооборотные крейцкопфные реверсивные двигатели с постоянным наддувом, прямоточно-клапанной продувкой, охлаждением поршней маслом и традиционным выхлопным клапаном. Цилиндровая размерность двигателей от 260 до 980мм с ходом поршней от 980 до 3,450 мм. Характеризуются механическим приводом ТНВД и выхлопного клапана каждого цилиндра с регулировкой максимального давления сгорания в цилиндрах с помощью системы коррекции угла опережения впрыска топлива VIT. Максимальное давление сгорания в цилиндре – 150 бар при среднем индикаторном давлении – 19 бар. Двигатели данных моделей соответствуют значениям требований TIERII по выпускам NO_x в отработавших газах до 14.4 г/кВтч. Для исследования выбран МОД модели 6S60MC. Двигатели этой модели установлены на 13 судах ОАО “Новошип” “С” класса. Номинальная

мощность двигателя составляет 11327 кВт (15400 л.с.) при 97 мин⁻¹.

1. Выбор исследуемых параметров и метода моделирования

Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, направленных на снижение эмиссии оксидов азота. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива. Значения этих параметров можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию базового двигателя.

При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного ДВС, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-РК [5]. Этапу проведения расчетных исследований предшествовал этап проверки точности математической модели путем сравнения расчетных данных с результатами натуральных экспериментов. Использовались данные, полученные на морских судах компании ОАО “Новороссийское морское пароходство” (Новошип), группа компаний “Совкомфлот”, характеризующие эксплуатационные параметры работы малооборотных двигателей компании “MAN Diesel & Turbo” моделей SMC/-C в широком диапазоне изменения нагрузок [4].

Исходные данные для создания проекта средствами программного комплекса ДИЗЕЛЬ – РК представлены в таблице.

Таблица

Исходные данные двигателя 6S60MC для создания проекта средствами программы ДИЗЕЛЬ – РК

№	Наименование данных, размерность	Значение
1	Изготовитель	MAN Diesel & Turbo
2	Модель двигателя	6S60MC
3	Обозначение	6ДКРН60

		/2292
4	Число цилиндров, i	6
5	Диаметр цилиндра D , мм	600
6	Ход поршня S , мм	2292
7	Тип конструкции (V – V-образный, L – рядный)	L
8	Степень сжатия, ϵ	15
9	Количество клапанов в крышке цилиндра	1
10	Количество форсунок в крышке цилиндра	2
11	Частота вращения n , мин^{-1}	97
12	Максимальная мощность N_e , кВт	11327
13	Максимальное давление в цилиндре P_z , бар	150

Сравнение эксплуатационных и расчетных значений параметров на режимах работы, соответствующих 85, 75, 50 и 25 % от полной мощности представлены на рисунках 1, 2.

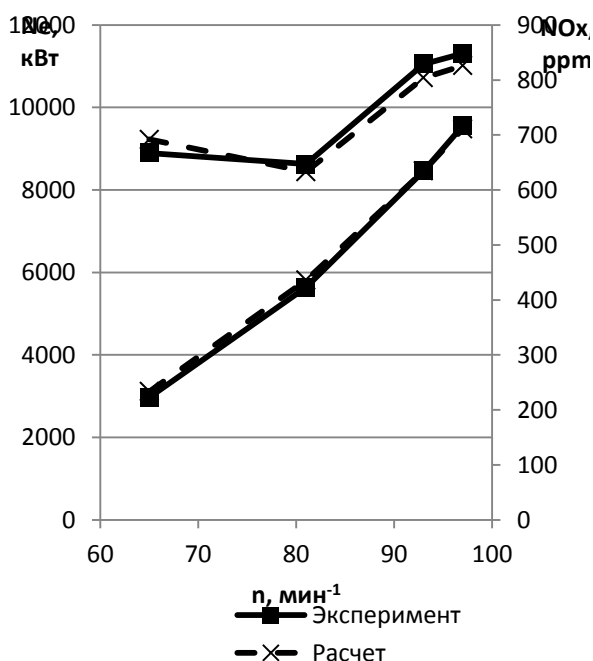


Рис. 1. Изменение мощности и концентрации NO_x в отработавших газах на разных режимах

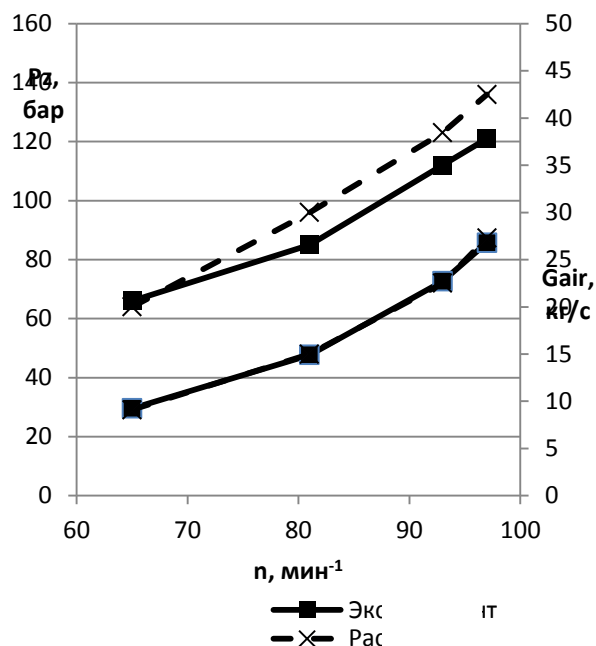


Рис. 2. Изменение максимального давления цикла и массового расхода воздуха на разных режимах

Анализ полученных данных показывает в целом хорошее согласование эксперимента с расчетом, исключение составляет значение максимального давления цикла. Значение данного параметра при эксплуатационных испытаниях ниже расчетных, что связано с нарушением регулировок системы VIT на исследуемых судах.

Для определения диапазонов изменения исследуемых переменных применялся метод двумерного сканирования, реализованный в программе ДИЗЕЛЬ – РК.

2. Моделирование параметров рабочих процессов судового малооборотного двигателя

При решении исследовательских задач, связанных с поиском рационального сочетания сразу нескольких параметров двигателя, зачастую бывает трудно спланировать и обработать численный эксперимент с большим количеством варьируемых факторов. В этом случае очень эффективным средством является многопараметрическая оптимизация, когда поиск рационального сочетания варьируемых факторов возлагается на формальную процедуру нелинейного программирования, а исследователю остается только грамотно сформулировать задачу оптимального поиска и проанализировать полученное решение. Использование многопараметрической оптимизации эффективно при решении задач, направленных на снижение эмиссии вредных веществ двигателем.

При решении оптимизационных задач, основное время счета компьютера потребляется математической моделью ДВС, а не алгоритмами нелинейного программирования, поэтому при

выборе методов отыскания оптимума в первую очередь следует руководствоваться экономичностью метода в плане количества потребных расчетов рабочего процесса. Существенным недостатком методики и программы многопараметрической оптимизации рабочих процессов ДВС, реализованной в программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК, является невозможность решения оптимизационных задач сразу на нескольких режимах работы двигателя. В программе реализована только возможность последовательного нахождения набора оптимальных параметров для каждого из режимов, что может не привести к требуемому результату. Так, например, оптимальное значение величины степени сжатия может быть различным для каждого из режимов, а этот параметр задается конструктивно и не подлежит изменению при переходе двигателя на другой режим работы.

Для решения этой задачи необходимо получить математическую модель в виде уравнения регрессии, описывающую влияние исследуемых параметров на целевую функцию. При этом зависимость удельных выбросов оксидов азота в отработавших газах от исследуемых факторов носит явно нелинейный характер. Следовательно, для математического описания может быть достаточно уравнения регрессии в виде полинома второго порядка, при условии соответствия его критерию адекватности, для которых гораздо лучше разработаны алгоритмы оптимизации с учетом наличия ограничительных параметров.

Для получения уравнения регрессии используются планы факторного эксперимента соответствующего порядка. Применение полного факторного эксперимента для получения отдельных оценок коэффициентов полинома второго порядка не является рациональным, так как характеризуется резким увеличением объема эксперимента. Поэтому для получения приемлемого числа опытов с указанными тремя независимыми факторами было реализовано ортогональное композиционное планирование второго порядка [6]. Благодаря ортогональности матрицы планирования все коэффициенты уравнения регрессии определяются независимо друг от друга по формуле.

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}$$

Для удельных выбросов оксидов азота, г/кВт·ч:

$$NO_{x_{970\sigma}} = 10,82 - 0,241x_1 - 2,18x_2 + 0,227x_3 - 0,684x_1x_2 - 0,362x_1^2 + 1,336x_2^2;$$

$$NO_{x_{930\sigma}} = 8,88 + 0,417x_1 - 1,401x_2 + 0,153x_3 + 1,704x_2^2 + 0,353x_3^2;$$

$$NO_{x_{810\sigma}} = 11,32 - 0,281x_1 - 2,642x_2 + 0,243x_3 - 0,624x_1x_2 + 0,617x_2^2;$$

$$NO_{x_{650\sigma}} = 13,51 + 0,625x_1 - 4,285x_2 + 0,418x_3 - 0,282x_1x_2 - 0,517x_2^2.$$

Оценки коэффициентов регрессии выполняются для свободного члена, линейных слагаемых, попарных взаимодействия и центрированных квадратичных переменных. Значимость всех коэффициентов уравнения регрессии оценивается по критерию Стьюдента. Адекватность уравнения результатам эксперимента проверяется по критерию Фишера. Разработка плана осуществлялась с учетом рекомендаций теории планирования эксперимента [6].

Так как при расчете суммарной эмиссии оксидов азота с учетом весовых коэффициентов по методике ИМО [7] используются значения мощности в каждом отдельном режиме, то этот показатель также являлся исследуемой величиной с получением соответствующего уравнения регрессии.

3. Результаты моделирования

Математическая модель, представляющая собой уравнение регрессии, задаваемое полиномом второй степени, в общем случае имеет следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2,$$

где y – значения исследуемых величин (удельный выброс оксидов азота, г/кВт·ч; мощность двигателя, кВт); x_i, x_j – значения факторов в кодированном масштабе; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – оценки коэффициентов уравнения регрессии.

Число опытов в матрице планирования при наличии трех факторов составило 15. Дисперсия воспроизводимости определялась по четырем дополнительным опытам.

Каждый из трех независимых факторов (z_1 – степень сжатия; z_2 – продолжительность впрыска, ° п.к.в.; z_3 – угол опережения впрыска, ° до в.м.т.) переводился в безразмерную систему координат путем линейного преобразования и варьировался на пяти уровнях: +1,215; + 1; 0; - 1; -1,215. На основании результатов проведенного эксперимента были рассчитаны значения коэффициентов при факторах в уравнении регрессии.

После оценки по критерию Стьюдента значимости всех коэффициентов и отбрасывании незначимых уравнения регрессии для каждого режима в безразмерном масштабе будут иметь следующий вид.

Для эффективной мощности двигателя, кВт:

$$Ne_{9706} = 8792 + 498,5x_1 - 1530x_2 + 151,7x_3 + 184,4x_1x_2 + 109,9x_1x_3 - 162,2x_1^2 - 546,4x_2^2;$$

$$Ne_{9306} = 7687 + 357,2x_1 - 1657x_2 + 145,9x_3 + 110,4x_2x_3 + 76,6x_1x_2x_3 - 171,4x_1^2 - 625,5x_2^2;$$

$$Ne_{8106} = 5523 + 265,9x_1 - 943,1x_2 + 94,5x_3 + 152,3x_1x_2 + 49x_2x_3 - 485,4x_2^2;$$

$$Ne_{6506} = 3155 + 69,3x_1 - 113,7x_2 + 30,84x_3 + 21,63x_1x_2 + 14,88x_2x_3 - 48,75x_2^2.$$

Проверка полученных уравнений регрессии по критерию Фишера подтвердила адекватность полученных математических моделей результатам эксперимента.

Заключение

Получены математические модели, описывающие влияние степени сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска

топлива на величину удельных выбросов оксидов азота и эффективной мощности судового малооборотного двигателя MAN D&T 6S60MC.

На основе полученных математических моделей может быть выполнена многопараметрическая оптимизация исследуемых параметров малооборотного судового двигателя для снижения эмиссии оксидов азота с учетом наличия ограничительных параметров.

Литература

1. Варбанец Р. А., Кучеренко Ю. Н., Головань А. И., Александровская Н. И. Влияние системы VIT на характер рабочего процесса малооборотных дизелей MAN B&W серии MC. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 10. С. 161-165.
2. Возницкий И. В. Современные малооборотные двухтактные двигатели. Одесса: Изд-во ООО «Моркнига», 2007. 121 с.
3. MAN Diesel. Marine Engine IMO Tier II, Programme 2nd edition. 2009. 114 p.
4. Зиненко Н. Н. Совершенствование эксплуатации судовых малооборотных двигателей на основе контроля параметров и концентрации вредных веществ в отработавших газах: дисс. ... канд. техн. наук: 05.08.05. Новороссийск, 2013. 133 с.
5. Кулешов А. С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач. М.: МГТУ им. Баумана, 2004. 123 с.
6. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.
7. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78), Книга III, пересмотренное издание. СПб.: ЗАО "ЦНИИМФ", 2012 г. 336 с.

References

1. Varbanets R. A., Kucherenko Yu. N., Golovan' A. I., Aleksandrovskaya N. I. Vliyaniye sistemy VIT na kharakter rabocheho protsessha malooborotnykh dizeley MAN B&W serii MC [The influence of the VIT system to the MAN B&W MC series low-speed diesel engines working process nature]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2013. № 10. Pp. 161-165.
2. Voznitskiy I. V. Sovremennyye malooborotnyye dvukhtaktnyye dvigateli [Modern low-speed two-stroke engines]. Odessa: «Morkniga» publ., 2007. 121 p.
3. MAN Diesel. Marine Engine IMO Tier II, Programme 2nd edition. 2009. 114 p.
4. Zinenko N. N. Sovershenstvovaniye ekspluatatsii sudovykh malooborotnykh dvigateley na osnove kontrolya parametrov i kontsentratsii vrednykh veshchestv v otrabotavshikh gazakh: diss. ... kand. tekhn. Nauk [Improvement of low-speed ship engines operation on the basis of control of parameters and concentration of harmful substances in exhaust gases: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]: 05.08.05. Novorossiysk, 2013. 133 p.
5. Kuleshov A. S. Programma rascheta i optimizatsii dvigateley vnutrennego sgoraniya DIZEL"-RK. Opisanie matematicheskikh modeley, reshenie optimizatsionnykh zadach [The program for calculation and optimization of internal combustion engines DIESEL-RK. Description of mathematical models, solution of optimization problems]. Moscow: MGTU im. Baumana, 2004. 123 p.
6. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii [Methods of experiment optimization in chemical technology]. Tutorial, 2nd edition. Moscow: Vyssh. shk., 1985. 327 p.
7. Mezhdunarodnaya Konventsia po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MARPOL-73/78) [International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)], Book III, revised edition. Saint-Petersburg.: ZAO "TsNIIMF", 2012 g. 336 p.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Александр Владимирович Туркин

кандидат технических наук, доцент кафедры Техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: alekstur@yandex.ru

Владимир Антонович Туркин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Техносферная безопасность на транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: turvla@mail.ru

Александр Андреевич Иванченко

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Двигателей внутреннего сгорания и автоматике
судовых энергетических установок
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, город Санкт-Петербург, улица Двинская, 5/7
e-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru

Аннотация

Дано описание авторского метода и защищенной патентами конструкции судовой установки для очистки отработавших газов дизелей от оксидов серы и азота использованием механизма их адсорбции твердым веществом в присутствии озона. Получение информации о текущих значениях концентрации оксидов предлагается осуществлять методом лазерного зондирования газового потока. Лазерное излучение направляется через газовую среду на мишень, а рассеянное излучение собирается телескопом с фотоприемником и анализатором спектра. Преимуществами лазерного метода над химическими методами являются меньшая трудоемкость и оперативность получения информации о концентрациях загрязняющих веществ.

Приведены результаты экспериментально-расчетного определения постоянных молекул оксидов азота и серы, а также оптимальные режимы и параметры работы лазерных систем локального замера концентраций указанных загрязняющих веществ в выбросах судовых дизелей. Установлено, что оптимальный режим работы системы на комбинационном рассеянии света обеспечивается Si- или YAG: Nd лазерами. Предложена схема судовой лазерной системы мониторинга, позволяющая осуществлять непрерывный контроль концентрации вредных веществ, решать задачи контроля и снижения токсичности отработавших газов.

Ключевые слова: Судовые энергетические установки, вредные выбросы, оксиды азота и серы, постоянные молекул, лазерный мониторинг, судовая система.

APPLICATION OF LASER TECHNOLOGIES FOR ESTIMATION OF TOXICITY OF WORKED GASES OF SHIP ENERGY INSTALLATIONS

Aleksandr V. Turkin

Cand. Sci. Tech.,
Docent of the department of Technosphere safety in transport
Admiral Ushakov Maritime State University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: alekstur@yandex.ru

Vladimir A. Turkin

Professor, Dr. Sci. Tech.,
Professor of the department of Technosphere safety in transport
Admiral Ushakov Maritime State University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: turvla@mail.ru

Alexander A. Ivanchenko

Professor, Dr. Sci. Tech.,

Professor of the department of Engines of internal combustion and automation of marine power plants
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland
Dvinskaya street, 5/7, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru

Abstract

A description of the author's method and patent-protected design of a ship installation for cleaning diesel exhaust gases from sulfur oxides and nitrogen using a mechanism for their adsorption by a solid in the presence of ozone. Obtaining information about the current values of the oxide concentration is proposed to be performed by laser gas flow sensing. Laser radiation is directed through the gas medium to the target, and the radiation scattered by the target is collected by a telescope with a photodetector and a spectrum analyzer. Advantages of the laser method over chemical methods are the less laboriousness and operational nature of obtaining information on the concentrations of pollutants.

The results of the experimental and calculated determination of the permanent molecules of nitrogen and sulfur oxides are presented, as well as the optimal regimes and parameters of the operation of laser systems for local measurement of the concentrations of these pollutants in emissions of marine diesel engines. It is established that the optimum mode of operation of the system on Raman scattering is provided by Cu- or YAG: Nd lasers. The scheme of the ship laser monitoring system is proposed, which allows to carry out a continuous control of the concentration of harmful substances, to solve the tasks of monitoring and reducing the toxicity of the exhaust gases.

Key words: Ship power plants, harmful emissions, nitrogen and sulfur oxides, permanent molecules, laser monitoring, shipboard system.

Введение

Актуальность исследования обусловлена ужесточением требований к выбросам токсичных веществ, содержащихся в продуктах сгорания судового топлива. Выбросы вредных веществ от судовых дизелей регламентируются Приложением VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Для дизельных малооборотных двигателей (до 130 оборотов коленчатого вала в минуту), установленных на судах, построенных начиная с 1.01.2016 года в районах контроля выбросов оксидов азота содержание окислов азота в отработавших газах не должно превышать 3,4 г/кВт·ч, что соответствует 80%-му ужесточению действовавших ранее нормативов.

Достижение указанных выше требований к токсичности отработавших газов зарубежными компаниями осуществляется использованием метода селективного каталитического восстановления (СКВ) оксидов азота. Основными недостатками метода являются высокая стоимость катализаторов, изготовленных из драгоценных металлов, и необходимость наличие в портах захода реагента для СКВ-процесса.

С целью снижения затрат судовладельцев, а также для реализации политики импортозамещения учеными кафедры «Техносферная безопасность на транспорте» Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова (г. Новороссийск) предложен метод очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием механизма их адсорбции твердым веществом. Для реализации данного метода предлагается использовать судовую систему очистки отработавших газов.

Основным элементом этой системы является комплексное устройство очистки выхлопных газов

судового двигателя. Конструкция устройства защищена тремя патентами: на изобретения (№ 2536749 от 28 октября 2014 г.; № 2608094 от 13 января 2017 г.); на полезную модель (№ 159648 от 25 января 2016 г.).

В основе работы предлагаемого устройства лежит окисление оксидов азота NO озонем до диоксидов NO₂ с дальнейшей их адсорбцией гранул шлаковой пемзы, являющихся отходами металлургического производства Липецкого комбината. Достоинствами метода являются отсутствие дорогостоящих катализаторов и расходуемых реагентов, а также возможность получения озона непосредственно на судне.

Для контроля эффективности очистки отработавших газов предложенной системой возникает потребность в наличии информации о текущих значениях концентрации токсичных компонентов продуктов сгорания дизельного топлива – кислотных оксидов. Получить подобного рода информацию можно методом лазерного зондирования газового потока.

1. Теоретические основы метода лазерного зондирования

Реализация метода достигается предложенной системой лазерного зондирования (лидар). В лидаре лазерное излучение направляется через газовую среду на мишень, а рассеянное мишенью излучение собирается телескопом со спектроанализатором и фотоприемником [1].

Преимуществами предлагаемого лазерного метода над химическими методами в судовых условиях являются меньшая трудоемкость и оперативность получения информации о концентрациях загрязняющих веществ в газахходах судовых энергетических установок.

Лазерная система в зависимости от исследуемого загрязняющего вещества может

совмещать лидары, реализующие методы дифференциального поглощения и рассеяния, а также комбинационного рассеяния (КР) света [2 – 4].

Метод комбинационного рассеяния света молекулами вещества основан на том, что в спектре рассеянного света кроме линий с частотой падающего света наблюдаются добавочные линии, частота которых равна сумме (или разности) частот падающего фотона и внутримолекулярных колебаний среды, рассеивающей свет. Причём, спектр излучений молекул загрязняющего вещества очень узок, что и позволяет определить, молекула какого вещества встретилась на пути лазерного луча [1, 5].

Оптическая схема лидар комбинационного рассеяния света для измерения концентрации молекул загрязняющих веществ приведена на рисунке 1.

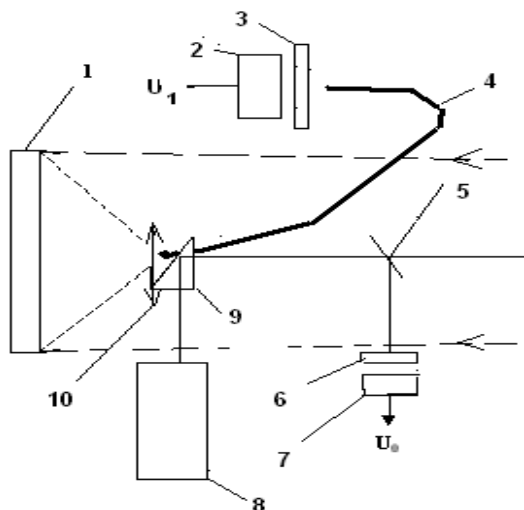


Рис. 1. Лидар КР света: 1 – зеркало; 2 – фотоумножитель; 3, 6 – фильтры; 4 – световод; 5 – стеклянная пластина; 7 – фотодиод; 8 – лазер; 9 – призма; 10 – линза

Для возбуждения КР света молекулами исследуемых веществ использовано излучение второй гармоники YAG-Nd лазера с длиной волны 532 нм, импульсом длительностью 10 нс и энергией до 25 мДж. Рассеянное назад излучение КР собиралось телескопом и фокусировалось линзой 10 в световод 4. Затем через светофильтр излучение направлялось на фотоумножитель 2, откуда импульс напряжения подавался на вход микропроцессорной системы, определяющей концентрации молекул загрязняющего вещества.

Метод комбинационного рассеяния в отличие от метода дифференциального поглощения при требуемой точности измерения концентраций позволяет обойтись одним лазером с одной длиной волны для получения спектра рассеяния молекул загрязняющих веществ.

Мощность обратного сигнала КР определяется лидарным уравнением (1):

$$P(\lambda, R) = P_L K_1 \Delta R A_0 T(\lambda_L, R) T(\lambda, R) (d\sigma/d\Omega) N_a / R^2 \quad (1)$$

где: $P(\lambda, R)$ – мощность на фотоприемнике; $P_L = 0,1 - 1$ МВт и λ_L – мощность и длина волны лазера; $K_1 = 0,495$ – постоянная лидара; ΔR – шаг по расстоянию; $A_0 = 0,008$ м² – площадь телескопа; $T(\lambda_L, R)$, $T(\lambda, R)$ – пропускание атмосферы на длине волны излучения и сигнала КР; $d\sigma/d\Omega = 8,7 \cdot 10^{-30}$ см²/ср – сечение КР молекулы на длине волны лазера; $N_a = 10^{19}$ см⁻³ – концентрация молекул.

Калибровка лазера осуществлялась атмосферным азотом посредством двух фотоприемных каналов: для сигнала КР молекулы азота и для сигнала КР от исследуемой молекулы. Схема калибровочного стенда показана на рисунке 2.

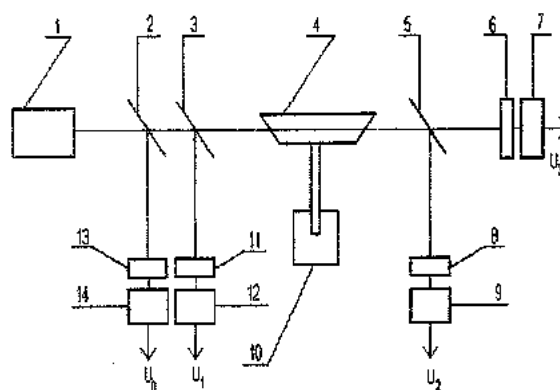


Рис. 2. Стенд для калибровки лазера: 1 – лазер; 2,3 – плоскопараллельные пластины; 4 – кювета; 5 – полупрозрачное зеркало; 10 – термостат; 6,8,11,13 – светофильтры; 7,9,12,14 – фотодиоды

Решение уравнения (1) для азота и исследуемой молекулы дает выражение (2):

$$N_a = \frac{P(\lambda, R) [d\sigma(\lambda_L)/d\Omega_{азот}]}{k P(\lambda, R)_{азот} [d\sigma(\lambda_L)/d\Omega]} \cdot N_{азот} \quad (2)$$

где $P(\lambda, R)_{азот}$ – мощность сигнала КР молекулами азота; $N_{азот}$ – концентрация азота; k – постоянная фотокатода.

2. Экспериментально-расчетное исследование молекул оксидов азота и серы

Объектом исследования являлись оксиды азота NO_x и диоксид серы SO₂, значения концентраций которых в отработавших газах судовых дизелей нормируются приложением VI Конвенции МАРПОЛ 73/78. Характеристика указанных молекул приведена в таблице 1.

Таблица 1
Характеристика молекул оксидов азота и серы

Наименование	ПДК, мг/м ³	Частота собств. колебаний ν_0 , см ⁻¹	ПДК, см ⁻³
Диоксид азота (NO ₂)	0,085	1320	1,1 · 10 ¹²
Оксид азота (NO)	0,4	1877	8,0 · 10 ¹²
Диоксид серы (SO ₂)	0,5	1152	4,7 · 10 ¹²

Для зондирования использовались длины волн излучения лазеров: 266 и 355 нм – YAG: Nd; 347 нм – рубиновый; 308 нм – эксимерный; 289 и 271 нм – на парах меди. Сечения КР для молекул и длины волны лазера определялись по сечению для длины волны азотного лазера $\lambda_L = 337$ нм. По собственным частотам молекул рассчитаны длины волн КР, приведенные в таблице 2.

Таблица 2
Длины волн КР молекул оксидов серы и азота

ν , см ⁻¹	Диоксид серы SO ₂		Диоксид азота NO ₂	
	$\lambda_{кр}$, нм	$(d\sigma/d\Omega) \cdot 10^{30}$, см ² /ср	$\lambda_{кр}$, нм	$(d\sigma/d\Omega) \cdot 10^{30}$, см ² /ср
1152			1320	
289	299,0	13,8	300,0	42,2
271	280,0	17,9	281,0	54,6
266	274,4	19,3	275,7	58,8
355	370,1	6,1	372,5	18,5
347	361,4	6,7	363,7	20,3
308	319,3	10,7	321,1	32,7

Решения уравнений (1) и (2) для молекул оксидов серы и азота представлены в виде графических зависимостей на рисунках 3 и 4.

Анализ графиков показывает, что наилучшие результаты наблюдаются для $\lambda_L = 266$ и 271 нм. с использованием медного или YAG: Nd лазеров.

3. Судовая система лазерного мониторинга вредных веществ

Лазерная система мониторинга, схема которой показана на рисунке 5, может быть установлена на каждое судно и осуществлять непрерывный контроль концентрации вредных веществ в отработавших газах в газоходах судовых дизельных установок или на срезе дымовой трубы.

В случае превышения концентраций вредных веществ значений, установленных приложением VI Конвенции МАРПОЛ 73/78, бортовой компьютер, по указанию системы мониторинга, осуществляет перепуск соответствующей части продуктов сгорания через установку очистки газов от оксидов азота, серы и углерода (парниковый газ). Опытный образец установки очистки продуктов сгорания от судовых дизелей – скруббер специальной конструкции на основе материалов указанных ранее патентов на изобретения – разработан на кафедре «Техносферная безопасность на транспорте» Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова.

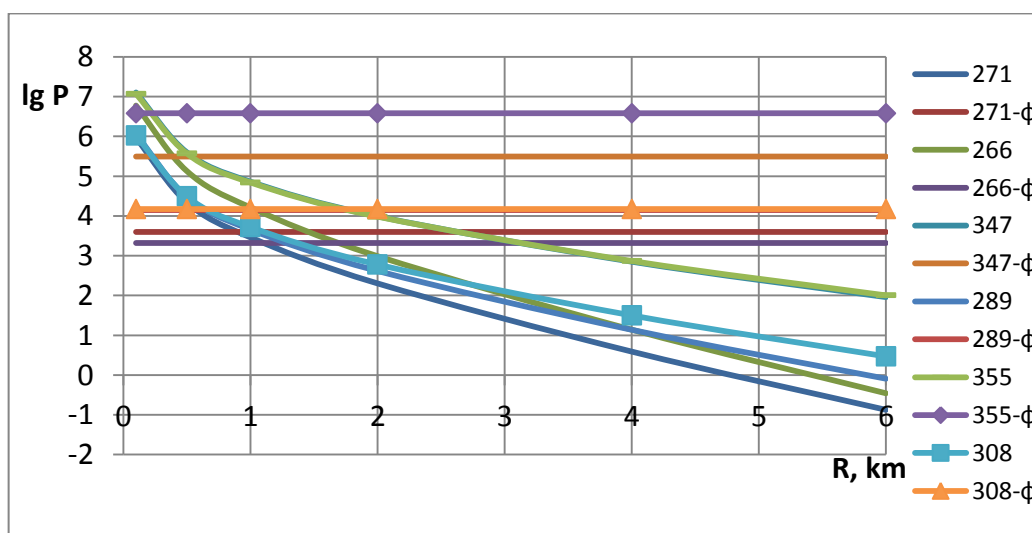


Рис. 3. Зависимость логарифма мощности КР молекул SO₂ от расстояния для разных длин волн (ф – фон)

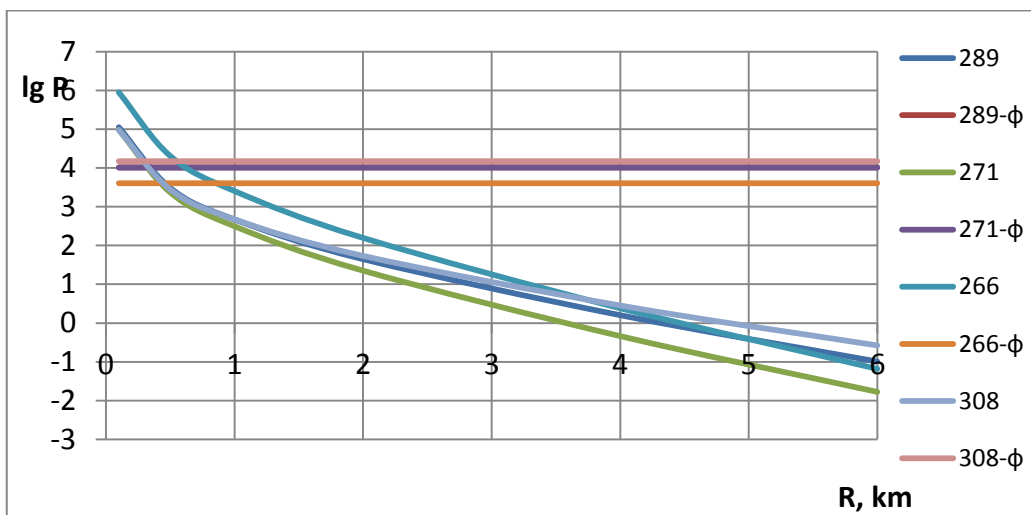


Рис. 4. Зависимость логарифма мощности КР молекул NO от расстояния для разных длин волн (ф – фон)

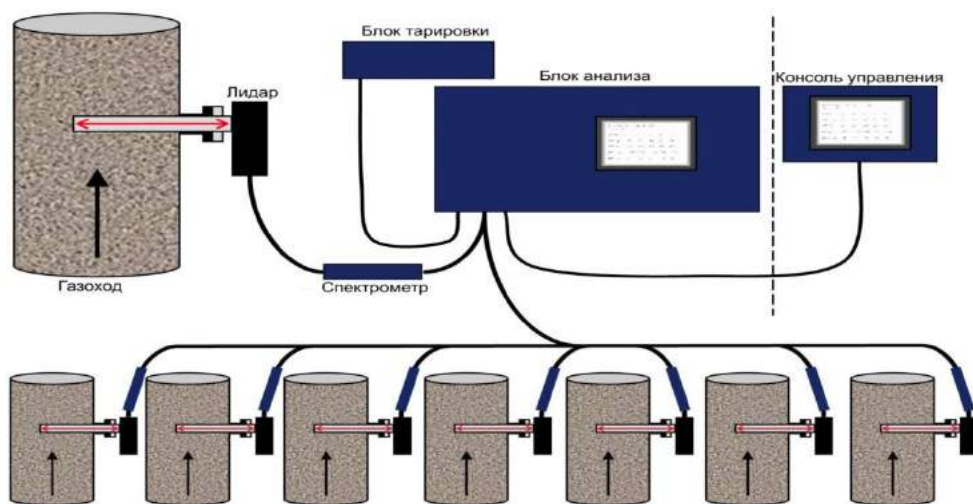


Рис. 5. Схема судовой системы лазерного мониторинга

Для контроля и регулирования режимов горения топлива в дизеле система мониторинга позволяет комплексно решать задачи контроля и снижения токсичности отработавших газов, а также осуществлять диагностирование судовых дизельных установок.

Применение судовой лазерной системы мониторинга позволяет: уменьшить вредные выбросы в атмосферу с отработавшими газами; повысить надежность работы главных и вспомогательных дизелей судовой энергетической установки; уменьшить расходы на техническое обслуживание и ремонт судовых дизельных и котельных установок; предотвратить серьезные отказы дизелей.

В рассмотренной комплектации станция обеспечивает:

- формирование рекомендаций судовому механику по снижению эмиссии токсичных компонентов отработавших газов (COx, NOx, CH,

- SO₂, сажа) в случаях обнаружения системой превышения их допустимого содержания, регламентируемого Конвенцией МАРПОЛ 73/78;

- обнаружение повреждений топливной аппаратуры и выпускных клапанов в начальной стадии их развития;

- контроль распределения нагрузки по цилиндрам;

- контроль протекания процесса приработки деталей цилиндропоршневой группы после замены деталей или мотоочистки (переборки).

Функции системы, являющейся экспертной, базируются на существующей связи эмиссии компонентов отработавших газов с техническим состоянием дизеля и режимами его работы.

Судовая лазерная система мониторинга выполняется в двух вариантах: с ручным и автоматическим управлением и вводом информации.

Лазерная система может работать как автономно, так и во взаимодействии с другими локальными системами диагностирования, а

также в составе комплексной системы автоматики и контроля технического состояния судовой энергетической установки.

Заключение

1. На основе экспериментальных исследований и вычислительного эксперимента определены постоянные молекул оксидов азота и серы, а также оптимальные режимы и параметры работы лазерных систем локального замера концентрации указанных выше загрязняющих веществ в выбросах судовых дизельных и

котельных установок. Установлено, что оптимальный режим работы системы на комбинационном рассеянии света обеспечивается Cu- или YAG: Nd лазерами.

2. Предложена схема судовой лазерной системы мониторинга, которая позволяет осуществлять непрерывный контроль концентрации вредных веществ, решать задачи контроля и снижения токсичности отработавших газов, а также осуществлять диагностирование судовых дизельных установок.

Литература

1. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. Учебное пособие. – СПб.: Балтийский ГТУ «ВОЕНМЕХ», 2001. – 56 с.
2. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарная система управления качеством над промышленным районом // Экологические системы и приборы. – 2002. – № 4. – С. 13 – 15.
3. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарная система определения аварийных выбросов углеводородов в атмосферу // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 9. – С. 30 – 33.
4. Туркин А.В., Шеманин В.Г., Туркин В.А. Лазерная система дистанционного зондирования концентрации загрязняющих веществ в выбросах судовых энергетических установок // Проблемы эксплуатации водного транспорта и подготовки кадров на юге России. Материалы 8-й региональной научно-технической конференции. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010. С. 29 – 31.
5. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – Вып. 5. – С. 14 – 17.

References

1. Privalov V.E., Shemanin V.G. Parametry lidarov dlya distantsionnogo zondirovaniya gazovykh molekul i aerizolya v atmosfere. Uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg, Baltiyskiy GTU "VOENMEKh", 2001, 56 p.
2. Voronina, E.I., Privalov, V.E., Shemanin, V.G. (2002). Lidarnaya sistema upravleniya kachestvom nad promyshlennym rayonom. Ekologicheskie sistemy i pribory, 4, pp. 13-15.
3. Voronina, E.I., Privalov, V.E., Shemanin, V.G. (2003). Lidarnaya sistema opredeleniya aviariynykh vybrosov uglevodorodov v atmosfere. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti, 9, pp. 30-33.
4. Turkin A.V., Shemanin V.G., Turkin V.A. Lazernaya sistema distantsionnogo zondirovaniya kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v vybrosakh sudovykh energeticheskikh ustanovok. Materialy 8-y regional'noy nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Problemy ekspluatatsii vodnogo transporta i podgotovki kadrov na yuge Rossii" (Materials 8-th regional scientific and technical conference "The problem of the exploitation of water transport and training in southern Russia", Novorossiysk, 2010, pp. 29-31.
5. Voronina, E.I., Privalov, V.E., Shemanin, V.G. (2004). Zondirovanie molekul vodoroda na laboratornom lidare KR. Pis'ma v ZhTF, T. 30, Vyp. 5, pp. 14-17.

УДК 621.891

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Сергей Владимирович Виноградов

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры "Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: s.vinogradov@astu.org

Чунг Хуан Хоанг

аспирант кафедры "Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: Mrhuan.vimaru.org.edu@gmail.com

Конг Доан Нгуен

кандидат технических наук, заведующий кафедрой "Судовые энергетические установки"
Вьетнам, Ханой; Университет транспортных технологий
e-mail: doannc@utt.edu.vn

Аннотация

Загрязнение атмосферы происходит из-за возрастающего числа морских судов. Увеличивается и выброс теплоты от выхлопных газов в атмосферу. В некотором смысле, технология термоэлектрических генераторов (ТЭГ) может частично восстановить теплоту выхлопных газов и преобразовать тепловую энергию в электрическую.

Теплообменник играет важную роль в этой технологии, поскольку эффективность теплообменника зависят от его тепловых характеристик. Для того, чтобы достичь равномерного распределения температуры и более высокой температуры поверхности, характеристики теплообменника с улучшенными параметрами были исследованы в данной работе.

Результаты моделирования теплообменника с наклонными пластинами показывают равномерное распределение температуры по поверхности теплообменника. Данная конструкция теплообменника создает турбулентность в потоке газа, что может улучшить общие тепловые характеристики теплообменника, который является составной частью термоэлектрического генератора.

В основу исследований положена конструкция термоэлектрического генератора, разработанная в Астраханском государственном техническом университете.

Ключевые слова: Теплообменник, наклонная пластина, ТЭГ, моделирование.

MODELING OF THE HEAT EXCHANGER OF A THERMOELECTRIC GENERATOR FOR USE IN SHIP POWER PLANTS

Sergey V. Vinogradov

Cand. Sci. Tech., the assistant professor; the professor of department "Operation and Maintenance of Water Transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: s.vinogradov@astu.org

Trung H. Hoang

postgraduate student of department "Operation and Maintenance of Water Transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
lecturer of Vietnam Maritime University, Hai phong, Viet Nam
e-mail: Mrhuan.vimaru.org.edu@gmail.com

Cong D. Nguyen

Cand. Sci. Tech., head of department "Ship Power Plants"
Vietnam, Hanoi, University of Transport Technology
e-mail: doannc@utt.edu.vn

Abstract

The pollution of the atmosphere is due to the increasing number of ships. Increase and ejection of heat from exhaust gases into the atmosphere. In a sense, the technology of the thermoelectric generators (TEG) may partially recover exhaust heat and to convert thermal energy into electric energy.

The heat exchanger plays an important role in this technology, because the efficiency of the heat exchanger depend on its thermal characteristics. In order to achieve an even temperature distribution and a higher surface temperature, the characteristics of the heat exchanger with improved parameters have been investigated in this paper.

The results of modeling a heat exchanger with inclined plates show a uniform temperature distribution over the surface of the heat exchanger. This construction of the heat exchanger creates turbulence in the gas flow, which can improve the overall thermal characteristics of the heat exchanger, which is an integral part of the thermoelectric generator.

The research is based on the design of the TEG, developed at Astrakhan State Technical University.

Key words: Heat exchanger, inclined plate, TEG, modeling.

Введение

В настоящее время, как в мире, так и в России, судоходная отрасль быстро развивается, поэтому судостроительная промышленность также быстро растет. Основные двигатели, установленные на этих судах являются дизельными с достаточно большой эффективной мощностью. Выхлопной газ, вырабатываемый двигателем, имеет высокий расход, давление и температуру. Этот источник энергии составляет от 25% до 30% [1] от общей теплоты, генерируемой в камере сгорания. Использование в полной мере этого источника энергии будет способствовать снижению расхода топлива и повышению эффективности СЭУ, а также снижать выбросы вредных веществ в окружающую среду.

Как один из способов использования теплоты отработанных газов является использование ТЭГ, которые преобразуют тепловую энергию в электрическую. На тепловую эффективность и величину вырабатываемой электроэнергии влияют площадь контакта с термоэлектрическими модулями, материал конструкции и площадь теплопередающей поверхности. В статье рассмотрены четыре теплообменника с различными конструкциями поверхностей теплообмена со стороны отработанных газов.

1. Описание модели

Основываясь на теориях тепловой конвекции, теплопроводности и турбулентного потока, трехмерные модели теплообменника с различными внутренними структурами были спроектированы путем размещения внутренних перегородок. На рис.1 показана схема теплообменника, который использует тепловую энергию ОГ [2].

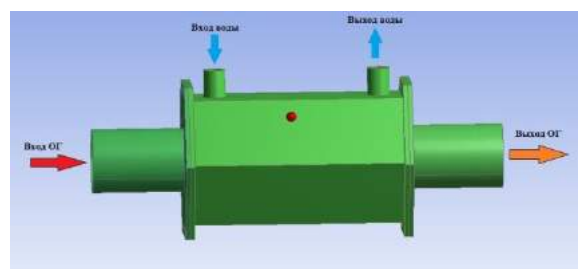


Рис. 1. Модель теплообменника

2. Различные внутренние конструкции теплообменника

Различные внутренние конструкции будут использоваться в теплообменнике для повышения скорости теплопередачи, как показано на рис.1. Внутренняя поверхность теплообменника, изготовлена из стали толщиной 3 мм, имеет шестиугольную форму. В зависимости от структуры, оптимизации теплопередачи, равномерного распределения температуры, она делится на несколько видов конструкций таких как с последовательными пластинами, со спиралью, с параллельными пластинами, с наклонными пластинами.

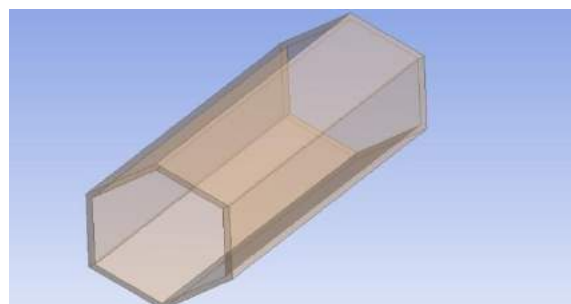


Рис. 2. Плоская конструкция

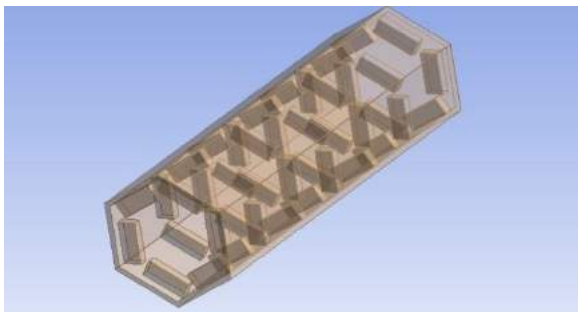


Рис. 3. Конструкция с последовательными пластинами

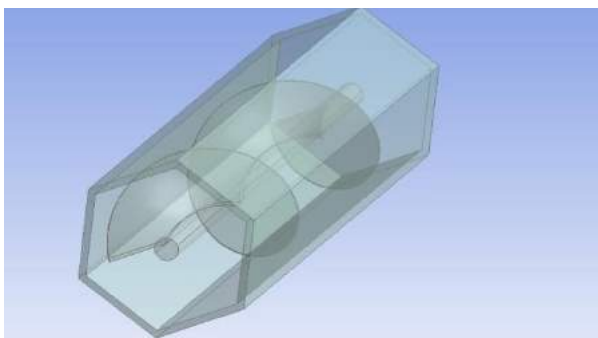


Рис. 4. Спиральная конструкция

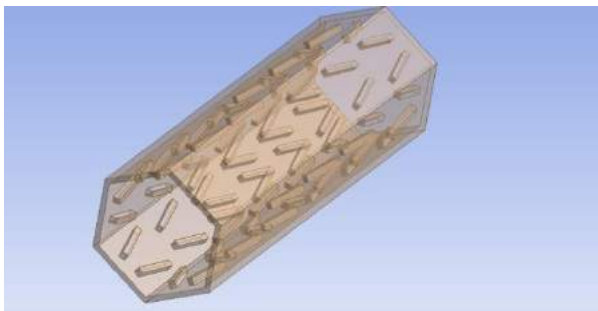


Рис. 5. Наклонная пластинчатая конструкция

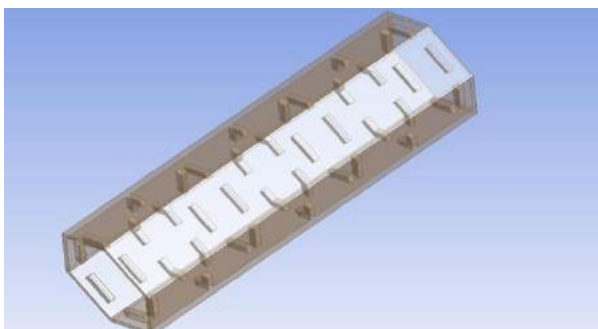


Рис. 6. Параллельная пластинчатая конструкция

выхлопных газов в теплообменнике, что позволяло моделировать распределение температуры. Результаты моделирования теплового поля были получены путем изменения внутренней структуры теплообменника.

Теория и граничная конфигурация

Общая вычислительная область включает в себя газовую часть и твердую часть. Поле температуры и поле потока, представляющие интерес, получаются путем решения математических уравнений относительно вычислительных областей газа и твердого тела.. В пределах жидких доменов решаются уравнения сохранения массы, импульса и энергии (уравнения (1) - (3)) для моделирования потока текучей среды, переноса тепла и массы. Только уравнение теплопередачи решается для твердых доменов (уравнение. (4)) [3,4,5,6]

Уравнение прерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

Уравнение импульса

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (2)$$

Уравнение энергии

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + U S_M + S_E \quad (3)$$

Сохранение уравнения энергии в твердой области является

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho U_s h) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_E \quad (4)$$

При заданном давлении и температуре выхлопа скорость звука составляет 5 м / с, что намного превышает реальную скорость потока. Вязкая модель зависит от типа потока: ламинарный поток или турбулентный поток. Для впускной трубы и полости, критическими скоростями потока являются 0,92 м / с и 0,42 м / с, соответственно. Модель имитации турбулентности *k-epsilon* использовалась для моделирования выхлопных газов, поскольку она является стандартной для многих моделей CFD. Было доказано, что эта модель является стабильной и численно устойчивой. Для изготовления корпуса теплообменника используют сталь.

3. Имитационный анализ теплообменника

Программное обеспечение для анализа турбулентной механики, гидродинамики (CFD), использовалось для моделирования потока

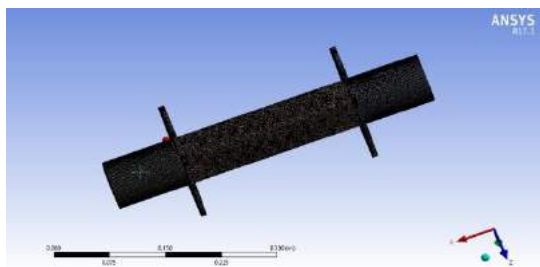


Рис. 7. Средняя часть наклонно-пластинчатого теплообменника

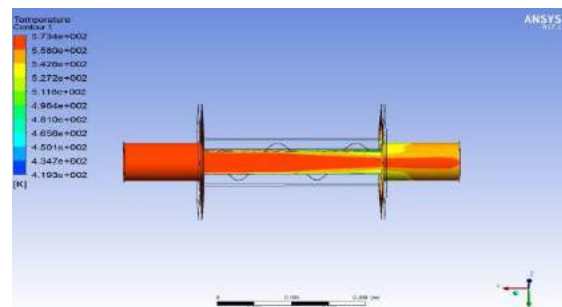


Рис. 10. Моделирование теплообменника со спиралью

Основные граничные условия моделирования следующие: температура входного газа составляет 300 °С, скорость потока 5 м/с, обратное давление на выходе 1 бар.

Распределение температуры на поверхности теплообменника с различными внутренними конструкциями

Согласно теории тепловой конвекции и турбулентного потока, виды трехмерных моделей внутренней конструкции теплообменника разработаны путем изменения внутренних перегородок. Среди них распределение температуры в конструкции с наклонными пластинами наиболее предпочтительными по сравнению с другими четырьмя структурами (полость полая, последовательная пластина, спираль, параллельная пластинчатая конструкция).

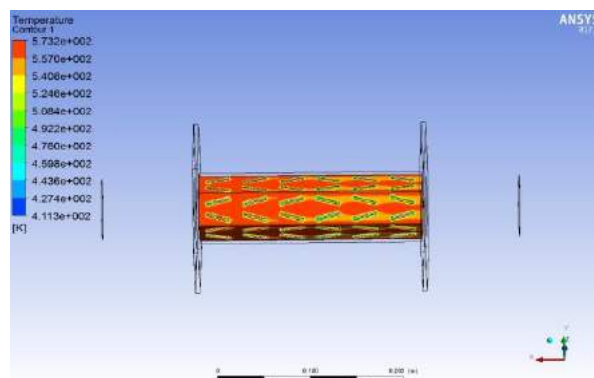


Рис. 11. Моделирование теплообменника с наклонными пластинами

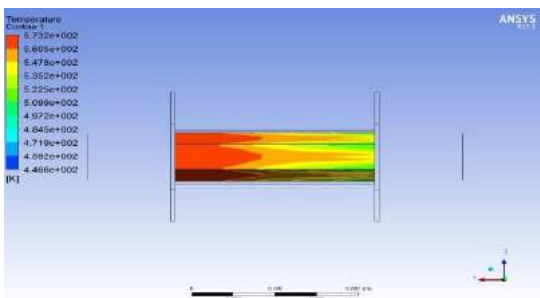


Рис. 8. Моделирование теплообменника полой конструкции

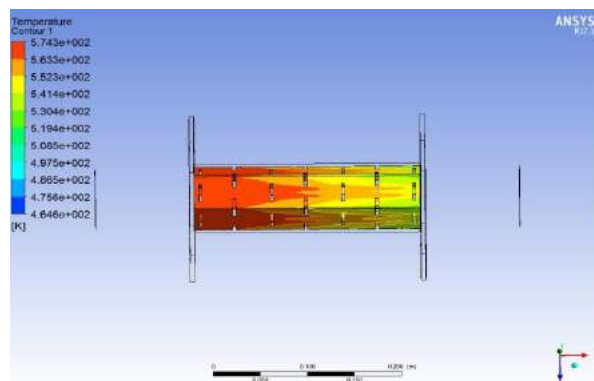


Рис. 12. Моделирование теплообменника с параллельными пластинами

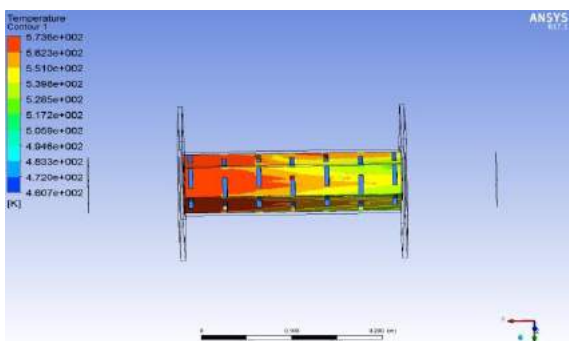


Рис. 9. Моделирование теплообменника с последовательными пластинчатами

4. Результат и обсуждение

Результат моделирования показывает, что температура поверхности внутренней структуры наклонной пластины, которая используется в теплообменнике, составляет в среднем около 286 °С, в то время как поверхностная температура спиральной внутренней структуры составляет 279 °С, полой внутренней структуры составляет 276 °С и внутренняя структура серийной пластины составляет 275 °С, параллельной пластины составляет 278 °С. Таким образом, при сравнении температуры поверхности наибольшее значение достигается при

использовании наклонных пластин на горячей поверхности теплообменника ТЭГ [8]. На рисунке 13 представлено распределение температуры на поверхности для всех 5 вариантов конструкций теплообменника:

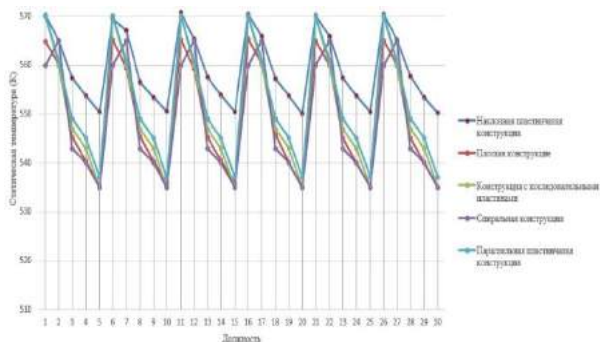


Рис. 13. Сравнение распределения температуры

Из уравнения теплопередачи (5) : $Q = k \cdot \frac{\Delta T}{L}$

В результате расчета была получена тепловая мощность для различных конструкций теплообменника ТЭГ (рис. 14). Расчеты показали, что наибольшая тепловая мощность (10.75 кВт) достигается при использовании теплообменника с наклонными пластинами.

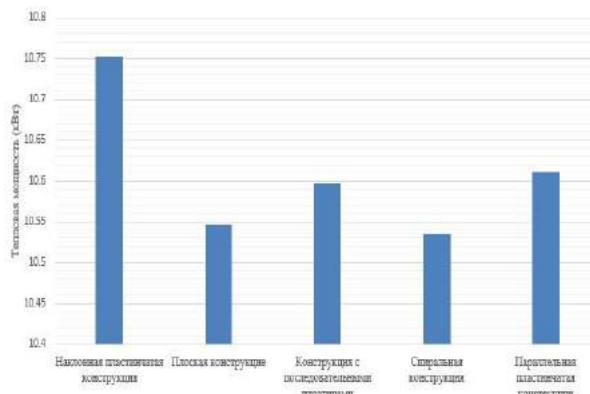


Рис 14. Сравнение скорости передачи тепловой мощности

Заключение

В работе исследованы тепловые характеристики теплообменника, теплопередающая способность с различными характеристиками повышения теплопередачи. Результаты моделирования теплообменника с наклонными пластинами показывают равномерное распределение температуры по поверхности теплообменника. Данная конструкция теплообменника создает турбулентность в потоке газа, что может улучшить общие тепловые характеристики теплообменника, который является составной частью термоэлектрического генератора.

	Обозначения	s	Скорость
		T_{ot}	Полный
h	Энтальпия, кДж / кг	<i>Греческие буквы</i>	
j	Коэффициент эффективности потребления	λ	Теплопроводность твердого вещества
S_E	Дополнительный объемный источник тепла, Вт / м ³	ρ	Плотность
$\nabla(U\tau)$	Порочная работа, Вт	τ	Тензор напряжений
U_s	Твердая скорость, если указано, м / с	K	Коэффициент теплопроводности газа (Вт/(м*К))
US_M	Работа из-за внешних импульсных источников, Вт	ΔT	Разница температур между окружающей средой и горячей поверхностью (°К)
m	Момент	L	Длина термоэлектрического генератора (м)

Литература

1. J. Yang, Proc. 24th Int. Conf. Thermoelectr. ICT (2005), pp. 155–159.
2. Халыков К.Р. Модельная экспериментальная установка с термоэлектрическим генератором [Текст] / С.В. Виноградов, К.Р. Халыков, К.Д. Нгуен // Вестник АГТУ. Сер.: морская техника и технология.– 2010. – № 2. – С. 66-70.
3. Dieter Mewes, Franz Mayinger. Models of Laminar Free Convection with Phase Change for Heat and Mass Transfer Analysis/ De-Yi Shang 2011. 525 p.
4. Yang S.M. Heat Transfer Theory Beijing, China: Higher Education; 2004, p. 207–11
5. H.A. Griffin, L.F. Gonzalez, and K. Shrinivas, J. Aircr. 45,172 (2008).
6. S.M. Yang, Heat Transfer Theory (Beijing, China: Higher Education Press, 2004), pp. 207–211.
7. S.Y. Jaw and R.R. Hwang, Int. J. Numer. Methods Fluids 33, 695 (2000).

8. Федоткин И.М., Липсман В.С. Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 240 с.

References

1. J. Yang, Proc. 24th Int. Conf. Thermoelectr. ICT (2005), pp. 155–159.
8. Fedotkin I.M., Lipsman V.S. Intensifikatsiya teploobmena v apparatakh pishchevykh proizvodstv. – M.: Pishchevaya promyshlennost', 1972. – 240 s.10
3. Dieter Mewes, Franz Mayinger. Models of Laminar Free Convection with Phase Change for Heat and Mass Transfer Analysis/ De-Yi Shang 2011. 525 p.
4. Yang S.M. Heat Transfer Theory Beijing, China: Higher Education; 2004, p. 207–11
5. H.A. Griffin, L.F. Gonzalez, and K. Shrinivas, J. Aircr. 45,172 (2008).
6. S.M. Yang, Heat Transfer Theory (Beijing, China: Higher Education Press, 2004), pp. 207–211.
7. S.Y. Jaw and R.R. Hwang, Int. J. Numer. Methods Fluids 33, 695 (2000).
8. Fedotkin I.M., Lipsman V.S. Intensifikatsiya teploobmena v apparatakh pishchevykh proizvodstv. – M.: Pishchevaya promyshlennost', 1972. – 240 s.10

УДК 629.5

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМЫХ ДЕМПФЕРОВ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ МАШИННО - ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВ

Михаил Николаевич Покусаев

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
"Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: evt@astu.org

Максим Михайлович Горбачев

доцент кафедры "Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: max9999_9@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке управляемых демпферов крутильных колебаний машинно - движительных комплексов судов. Демпферы с наполнителем из силиконовой жидкости наиболее часто применяются для снижения опасных амплитуд крутильных колебаний, однако имеют ряд недостатков, не позволяющих их эффективно использовать при нескольких резонансных частотах. Авторы статьи, на основании известных теоретических и практических исследований в области крутильных колебаний судовых машинно - движительных комплексов, в том числе, проведенных испытательным центром «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», обосновывают актуальность разработки управляемых демпферов, позволяющих эффективно работать на разных частотах колебаний. В качестве варианта такого устройства предлагается демпфер с наполнителем из магнитной жидкости, способной изменять свою вязкость под действием внешнего магнитного поля. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами с модельным управляемым демпфером, которые позволяют говорить о перспективности данной разработки.

Ключевые слова: крутильные колебания, силиконовый демпфер, судовые энергетические установки, машинно - движительный комплекс, управляемый демпфер.

THE DEVELOPMENT OF CONTROLLED TORSIONAL VIBRATION DAMPER MACHINE - PROPULSION COMPLEXES OF SHIPS

Mihail N. Pokusaev

doctor of technical sciences, professor, head of the department
"The exploitation of water transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: evt@astu.org

Maksim M. Gorbachev

associate professor of the department
"The exploitation of water transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: max9999_9@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the development of controlled dampers of torsional vibrations of machine - propulsion systems of ships. Dampers filled with silicone fluid are most often used to reduce the dangerous amplitudes of torsional vibrations, but they have a number of drawbacks that do not allow them to be effectively used at several resonant frequencies. The authors of the article, on the basis on the known theoretical and practical research in the field of torsional vibration of ship machine-propulsion complexes including those, carried out by the testingcenter "Marine Technology Service" of

the Federal state educational establishment of higher education, substantiate the urgency of the development of controlled dampers, allowing to work at different. As an option of such a device, a damper with a filler of a magnetic fluid capable of changing its viscosity under the influence of an external magnetic field is proposed. The article presents the results of theoretical and experimental studies carried out by the authors with a model controlled dampener, which allow us to speak about the prospects of this development.

Key words: torsional vibration, silicone damper, marine power systems, machine - propulsion complex, controlled damper.

Введение

В настоящее время дизели используются в качестве главных двигателей в составе судовых энергетических установок для большинства судов мирового флота. Главные двигатели вместе с валами машинно - движительного комплекса судна, образуют упругую систему, которая передает переменный крутящий момент, определяющий изменяющуюся деформацию скручивания в различных сечениях валов. Элементы валопровода в плоскости вращения испытывают знакопеременные смещения, называемые крутильными колебаниями. Согласно ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004 [1], крутильные колебания определяются как: «колебательные угловые деформации (скручивание) валопровода при вращении». Развитие крутильных колебаний может привести к повышенному износу и разрушению коленчатых, гребных и других видов валов, ослаблению болтовых соединений и уплотнений, срезу шпонок, повреждению соединительных муфт. Опасные амплитуды крутильных колебаний снижают при помощи антивибраторов и демпферов, при этом, в большинстве случаев на главные судовые двигатели устанавливаются жидкостные демпферы с наполнителями из силиконовых жидкостей.

1. Постановка задачи исследования

Силиконовые демпферы просты по конструкции и в эксплуатации, надежны в работе и имеют гарантированный срок службы до 30000 часов работы, поэтому широко применяются в судовых дизелях. Демпфер должен снижать амплитуды крутильных колебаний при опасных резонансах, но, если таких резонансов несколько, то требуется назначать запретные зоны для частот вращения главного двигателя, поскольку демпфер (согласно исследованиям Истомина П.А. [2], Алексеева В.В. [3], Ефремова Л.В. [4]) не работает одинаково эффективно на всех частотах колебаний. Согласно исследованиям Ефремова Л.В. [4], суммарные крутильные колебания даже нерезонансных составляющих для судовых установок со средними и высокооборотными двигателями, в том числе, входящих в состав дизель – редукторных агрегатов, могут привести к возникновению недопустимых напряжений, превышающих допускаемые.

С 2001 года по 2017 годы испытательным центром «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (свидетельство Российского

морского регистра судоходства №15.00037.141 от 26.05.2015 г.) произведено почти 190 торсиографирований судовых машинно-двигательных комплексов более чем для 80-ти заказчиков, в том числе: ООО «Галактика» (г. Астрахань), ООО «Судоходная компания Енисей» (г. Волгоград), Москвы, ООО «Черноморско-Балтийская судоходная компания» (г. Санкт – Петербург), ООО «Ойл Марин Групп» (г. Кронштадт), ООО «Жемчужина» (г. Хабаровск) и т.д. Основная цель торсиографирования – это определение технического состояния и остаточного ресурса силиконовых демпферов крутильных колебаний судовых дизелей. Рассмотрев заключения по результатам торсиографирования судов, проведенных испытательным центром «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (ИЦ «MTS») в 2014-2016 годах, выделим суда [5 - 9], у которых напряжения в коленчатых валах главных двигателей имеют значение более 70% от допускаемых, рассчитанных по правилам Российского морского регистра судоходства [10] и сведем эти данные в таблицу 1.

Таблица 1

Примеры судов, с высокими напряжениями от крутильных колебаний в коленчатых валах главных двигателей

№	Марка ГД	Наименование судна, проект	Нап. дейст. МПа, (пр. борт/л ев. борт)	Нап., доп., МПа	Отн. дейст. напр. к доп., (пр. борт/л ев. борт)
1	8ЧРН32 /48	Расул Гамзатов, пр. 19610	17,86 / 17,5	24,6	0,73 / 0,71
2	6ЧРН32 /48	Вилга, пр. 621.1	21,93 /22,63	29,1	0,75 / 0,78
3	6ЧРН32 /48	Омский-207, пр. А-1743.7	16,15 /18,17	22,8	0,71 / 0,80
4	8ЧНСП 24/36	Флестина -2, пр. 326.1	22,52 /23,03	26,4	0,85 / 0,87
5	6ЧРН 36/45	Блю - Спринтер , пр. 292	20,10 /19,58	28,1	0,71 / 0,70

Отметим, что для данных судов демпферы крутильных колебаний по результатам диагностики были признаны годными для дальнейшей эксплуатации и находились в исправном техническом состоянии, но напряжения в коленчатых валах при испытаниях имеют достаточно высокие значения, которые могут при определенных условиях эксплуатации (ледовые, штормовые), быть равными или превысить допусковые. Торсиограмма судна «Блю-Спринтер» [9], приведенная на рис. 1, показывает, что помимо ярко выраженных резонансных амплитуд крутильных колебаний имеются достаточно большие амплитуды вынужденных колебаний на большом участке частоты вращения дизеля. Это, в частности, подтверждает утверждение Ефремова Л.В. о необходимости учета вынужденных крутильных колебаний не только на резонансных частотах.

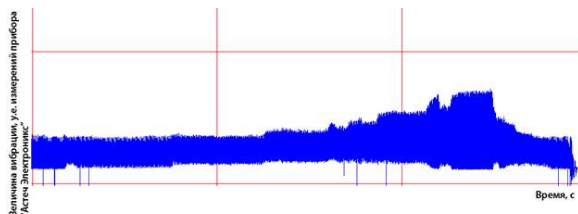


Рис. 1 - Торсиограмма судна «Блю-Спринтер», проекта 292

Если говорить о повышенных напряжениях в муфтах, валах редукторов, то можно привести пример танкера «Альтаир» проекта 1677Т [11]. У данного судна сложная схема машинно – движительного комплекса, которая включает в себя два главных двигателя Г74 (6ЧРН36/45) правого и левого борта; редукторы Г81; промежуточные валы; эластичные упругие муфты; гребные валы; винты фиксированного шага. При торсиографировании было определено, что эластический момент в упругой муфте на резонансе двухузловой формы 6-го порядка (315 об/мин) превышает допусаемый момент для длительной работы, но не превышает допусаемого момента для быстрого прохода. Эластический момент на ведомой шестерне 2-го зацепления на резонансе одноузловой формы 3-го порядка (215 об/мин) не превышает допусаемых значений, но больше среднего крутящего момента, что указывает на возможную перекладку зазоров в зацеплении и ступи в редукторе. В итоге, для судна была сохранена запретная зона для длительной работы главных двигателей, назначенная с постройки судна: 150 - 260 об/мин, дана рекомендация избегать длительной работы главных двигателей в зоне частот вращения 300 – 330 об/мин и учтена рекомендация завода - производителя дизелей типа Г74, которая ограничивает их эксплуатацию на частотах вращения выше 460 об/мин. Таким образом, для

судна «Альтаир» имеется три зоны, в которых длительная работа главного двигателя или запрещена или не рекомендована и это при эксплуатационном диапазоне частот вращения от 150 до 515 об/мин.

Амплитуду и частоту крутильных колебаний может изменить неравномерность подачи топлива в двигатель, что подтверждают результаты торсиографирования танкера «Вилга» проекта 621.1 [6]. При испытаниях было смоделировано нарушение работы топливной аппаратуры третьего цилиндра главного двигателя 6NVD548A2U правого борта, которое выражалось в нарушении подачи топлива от топливного насоса высокого давления к форсунке (при помощи байпасирования примерно 1/3 часть топлива не подавалась к форсунке). Для выяснения влияния такого дефекта на величину крутильных колебаний, по согласованию со старшим механиком судна, было произведено торсиографирование. В результате произошло увеличение частоты колебаний для одноузловой формы с 679 до 706 кол/мин (на 3,98%), для двухузловой формы с 2574 до 2803 кол/мин (на 8,90%); дополнительно было отмечено увеличение напряжений в промежуточном валу с 6,98 до 7,10 МПа (на 1,72%) для одноузловой формы, в гребном валу с 4,77 до 4,85 МПа (на 1,68%) для одноузловой формы, в коленчатом валу с 21,93 до 23,34 МПа (на 6,43%) для двухузловой формы.

Примером судна, у которого в ходе торсиографирования были выявлены отклонения реальных значений частоты колебаний и напряжений в коленчатом валу главного двигателя от расчетных значений является сухогруз «СТФ Спринтер» проекта 0225 [12]. Результаты диагностики силиконового демпфера главного двигателя левого борта 6ЧРН 36/45 представлены на рисунке 2.

Оценка остаточного ресурса и технического состояния демпфера двигателя левого борта			
Постоянные исходные данные			
Заданный ресурс (если не известен, то 0)	30000	час	
Назначенный ресурс: $R_{наз}$	15000	час	
Допускаемые напряжения	301,9	кг/см ²	
Эталонные напряжения	10	кг/см ²	
Эталонная частота моторной формы	3154	кол/мин	
Уровень надежности демпфера	1		Занесите в ячейку 0 - при низкой надежности 1 - при нормальной надежности 2 - при высокой надежности
Наработка за год	3340	час	
Наработка за рейс	50	час	
Допустимое отклонение амплитуды	0,1		
Допустимое отклонение частоты	0,05		
Результаты диагностирования			
Фактические напряжения	64,9	кг/см ²	
Фактическая частота	2962	кол/мин	
Определение коэффициентов			
Отклонение частоты от нормы	0,939		k1= 4,317
Коэффициент учета надежности	2		k2= 1,000
Коэффициент учета амплитуды	1,000		
Коэффициент учета частоты	0,5		
Заключение			
Расчет сделан для	нормального	уровня надежности	
Демпфер имеет	удовлетворительное	техническое состояние	
Остаточный ресурс:	3750	часов	
Число лет:	1,12	лет	
Число рейсов:	75,0	рейсов	
Момент инерции демпфера	увеличен	возможна заклинка массы	

Рис. 2 - Результаты диагностики демпфера главного двигателя левого борта судна «СТФ Спринтер»

Техническое состояние демпферов для главных двигателей левого и правого борта данного судна является удовлетворительным, но остаточный ресурс имеет небольшое количество часов, кроме того, возможна заклинка масс демпферов. Заклинка массы демпфера определена по снижению фактической резонансной частоты колебаний по сравнению с эталонной частотой. При этом, такие же явления были зафиксированы на данном судне в 2012 году на предыдущих испытаниях, произведенных ОАО «Ростовским ЦПКБ «Стапель», но имеющих меньшие значения по напряжениям в валах и смещения частот колебаний.

Таким образом, количество запретных и нерекомендуемых зон для частот вращения главных двигателей может быть более одной. Повышенные величины напряжений в валах наблюдаются даже у судов с технически исправными демпферами, а при наличии опасных факторов, например, штормовых и ледовых условий, их величина может превысить допустимые, при том, что периодические проверки технического состояния демпферов проводятся в среднем через 15000 часов работы. Современные силиконовые демпферы изготавливаются такими фирмами производителями, как «STE-Schwingungstechnik» (Германия), «Holset» (Англия), «Geislinger» (Германия), «Hasse&Wrede» (Германия) и модельный ряд устройств может быть очень большим. Например, серия VB силиконовых демпферов «Geislinger» [13] имеет 29 моделей с внешним диаметром корпусов демпферов до 1530 мм; а серия VD имеет 15 моделей с внешним диаметром до 3500 мм. Применение универсальных конструкций демпферов могло бы существенно уменьшить их количество. Управляемый демпфер способен гасить опасные амплитуды крутильных колебаний с одинаковой эффективностью во всем диапазоне работы двигателей. Изменять степень демпфирования в устройстве можно, используя жидкости - наполнители с переменной вязкостью, например, магнитные, которые меняют вязкость в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля.

2. Описание испытательного стенда

Для анализа возможности создания такого демпфера с наполнителем из магнитной жидкости были произведены расчеты и практические эксперименты на стенде ИЦ «MTS», (рис. 3).



Рис. 3 - Экспериментальный стенд ИЦ «MTS»

В состав стенда входят: привод тахометра; генератор постоянного тока; фланцевая муфта; большая муфта; измерительный комплекс «Astech Electronics» (Великобритания); вал; малый маховик; двигатель постоянного тока; модельный демпфер. Стенд имитирует работу судового валопровода с прямой передачей на гребной винт. Циклическую нагрузку формирует блок управления электродвигателем, благодаря которому можно задавать периоды цикла и импульсов колебаний момента. Имитацию нагрузки от гребного винта создает генератор. Схема стенда сформирована с учетом возникновения максимальных амплитуд крутильных колебаний с использованием большой маховой массы, и валов небольшого диаметра. Измерительный блок позволяет получать показания от тензодатчиков и передавать данные на ноутбук для обработки.

Для создания внешнего магнитного поля применялась магнитная катушка от автомобильного клапана газового топлива «Lovato GAS S.P.A.» (Италия) с питанием от автомобильного аккумулятора VARTA E43 постоянного тока с напряжением 12 Вольт. В качестве наполнителя для модельного демпфера были использованы: магнитная жидкость МЖ-131 производства ООО «Аквасил» (г. Москва) по ТУ 2229-001-51032852-2002 и для сравнения – полиметилсилоксановая жидкость ПМС-1000 по ГОСТ 13032-77.

3. Результаты исследований

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 4.

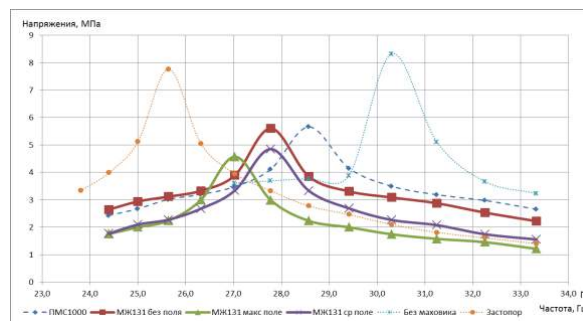


Рис. 4 - Результаты испытаний модельного демпфера

Используя математическую модель, основанную на модели силиконового демпфера, описанной в работах Истомина П.А. [2] и Алексеева В.В. [3] и адаптированную для экспериментального стенда и результаты проведенных на нем экспериментов, были получены значения максимальных напряжений в валу, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Максимальные расчетные и реальные напряжения в валу экспериментального стенда ИЦ «МТС»

Состояние демпфера	Расчетные напряжения, МПа	Экспериментальные напряжения, МПа	Расхождение, %
Маховик застопорен	8,14	7,76	4,7
Без маховика	8,20	8,32	1,4
ПМС-1000	5,84	5,66	3,3
МЖ-131 без магнитного поля	5,36	5,60	4,5
МЖ-131 со средней напряженностью магнитного поля	4,90	4,85	1,1
МЖ-131 с максимальной напряженностью магнитного поля	4,69	4,57	2,5

Выводы

1. При большом разнообразии схем машинно – движительных комплексов и режимов работы судов существует актуальная проблема по созданию универсального демпфера крутильных колебаний.

2. На сегодня не существует демпфера, способного одинаково эффективно снижать амплитуды крутильных колебаний на разных частотах.

3. Рациональным способом создания управляемого демпфера крутильных колебаний является применение магнитной жидкости с изменяемой вязкостью в зависимости от величины внешнего магнитного поля.

4. Магнитная жидкость под воздействием магнитного поля способна изменять степень демпфирования в жидкостном демпфере и это может быть управляемым процессом. Полученные результаты могут свидетельствовать

об ограниченном применении магнитных жидкостей на судах, поскольку максимальное изменение частоты колебаний (на которую настроен демпфер) при помощи изменения вязкости современных магнитных жидкостей не соответствует тем отличиям резонансных частот, которые присутствуют на реальных судах. Например, на судне «Альтаир», который рассматривался ранее, имеется две опасных частоты колебаний: 644 кол/мин и 1872 кол/мин, поэтому для такого судна необходимо существенное изменение вязкости жидкости наполнителя, которое пока не доступно для современных магнитных жидкостей. Магнитные суспензии, которые могут обеспечить существенное изменение вязкости, не могут сохранять свои свойства в течение длительного времени.

5. Полученные расхождения по амплитуде крутильных колебаний между экспериментальными и расчетными результатами, составляют не более 5%, что подтверждает их достоверность.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 3046 - 5 – 2004. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 5. Крутильные колебания. - М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.
2. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС. – Л.: Судостроение, 1968. - 303 с.
3. Алексеев В.В., Болотин Ф.Ф. и др. Демпфирование крутильных колебаний в судовых валопроводах. – Л.: Судостроение, 1973. – 280 с.
4. Ефремов Л.В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. - СПб.: Наука, 2007. – 276 с.
5. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Расул Гамзатов». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2016. – 24 с.
6. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Вилга». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2015. – 19 с.
7. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Омский-207». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2014. – 20 с.
8. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Флестина-2». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2014. – 21 с.
9. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Блю Спринтер». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2014. – 22 с.
10. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов, Часть VII. Механические установки. НД №2-020101-095, 2017. – 66 с.
11. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «Альтаир». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2016. – 27 с.
12. Окончательное заключение по результатам торсиографирования машинно-двигательного комплекса судна «СТФ Спринтер». ИЦ «Marine Technology Service» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2017. – 25 с.
13. VDamp Catalog Version 1.4. Geislinger, 2016. – 13 с.

References

1. GOST R ISO 3046-5-2004. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Kharakteristiki. Chast' 5. Krut'il'nye kolebaniya. M.: Izd-vo standartov, 2004. 4 p.
2. Istomin P.A. Krut'il'nye kolebaniya v sudovykh DVS. L.: Sudostroenie, 1968. 303 p.
3. Alekseev V.V., Bolotin F.F. i dr. Dempfirovanie krut'il'nykh kolebaniy v sudovykh valoprovodakh. L.: Sudostroenie, 1973. 280 p.
4. Efremov L.V. Teoriya i praktika issledovaniya krut'il'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologiy. SPb.: Nauka, 2007. 276 p.
5. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Rasul Gamzatov». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2016. 24 p.
6. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Vilga». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2015. 19 p.
7. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Omskiy-207». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2014. 20 p.
8. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Flestina-2». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2014. 21 p.
9. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Blyu Sprinter». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2014. 22 p.
10. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov, Chast' VII. Mekhanicheskie ustanovki. ND №2-020101-095, 2017. 66 p.
11. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «Altair». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2016. 27 p.
12. Okonchatel'noe zaklyuchenie po rezul'tatam torsioografirovaniya mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna «STF Sprinter». ITs «Marine Technology Service» FGBOU VO «Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». Astrakhan', 2017. 25 p.
13. VDamp Catalog Version 1.4. Geislinger, 2016. 13 p.

УДК 629.122

РАЗРАБОТКА МАЛОГО ОПЫТОВОГО БАСЕЙНА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПОДВЕСНЫХ ЛОДОЧНЫХ МОТОРОВ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

Михаил Николаевич Покусаев

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
"Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: evt@astu.org

Константин Евгеньевич Хмельницкий

аспирант кафедры "Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: chuchera80@mail.ru

Анастасия Александровна Хмельницкая

аспирант кафедры "Эксплуатация водного транспорта"
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: khmelnitskayaaa@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке малого опытового бассейна (МОБ) для проведения испытаний подвесных лодочных моторов маломерных судов. Испытания включают в себя измерения вредных выбросов отработавших газов, вибрации и шума подвесных моторов в соответствии с требованиями ГОСТ 28556-16, Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 026/2012 и других нормативно-технических документов. В результате разработки малого опытового бассейна и проведенных оценочных испытаний выявлено, что разработанный МОБ может быть использован для проведения испытаний на соответствие параметров подвесных лодочных моторов согласно требованиям ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» и ТР ТС 026/2012. Также показано, что для подвесного мотора «Ветерок-8М» не выявлено превышение допустимых значений по вредным выбросам в отработавших газах и величины виброускорения, но имеется превышение по уровню шума, что вероятно вызвано проведением испытаний в компактном помещении с возможным звуковым резонансом.

Ключевые слова: малый опытовый бассейн, подвесной мотор, лодочные моторы, вибрация лодочного мотора, вредные выбросы, шум лодочного мотора.

THE DEVELOPMENT OF A SMALL TEST BASIN FOR TESTING THE OUTBOARD MOTORS OF SMALL SIZE VESSELS

Mikhail N. Pokusaev

the professor, Dr. Sci. Tech.,
head of department "The exploitation of water transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: evt@astu.org

Konstantin E. Khmelniatskiy

postgraduate student of department "The exploitation of water transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: chuchera80@mail.ru

Anastasiya A. Khmelnitskaya

postgraduate student of department "The exploitation of water transport"
Astrakhan State Technical University
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: khmelnitskayaaa@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the development of a small experimental pool (SEP) for testing outboard boat motors of small vessels. Tests include measurements of harmful emissions of exhaust gases, vibration and noise of outboard motors in accordance with the requirements of GOST 28556-16, the Technical Regulations of the Customs Union 026/2012 and other normative and technical documents. As a result of the development of a small experimental basin and conducted evaluation tests, it was revealed that the developed SEP can be used to test the compliance of parameters of outboard boat motors in accordance with the requirements of GOST 28556-16 "Outboard boat motors. General safety requirements" and TR TS 026/2012. It is also shown that for the outboard engine "Veterok-8M" there was no excess of permissible values for harmful emissions in exhaust gases and magnitude of vibration acceleration, but there is an excess in noise level, which is probably caused by testing in a compact room with possible sound resonance.

Key words: small test basin, outboard motor, boat motors, boat motor vibration, emissions, noise of the boat motor.

Введение

Степень загрязнения окружающей среды от энергетических установок различного типа, несмотря на предпринимаемые меры, увеличивается, что требует более жесткого экологического контроля даже для небольших по мощности двигателей внутреннего сгорания, к которым, в том числе, относятся и двигатели маломерных судов – подвесные лодочные моторы. Их количество в России значительно, например, только в Астраханской области на учете в Государственной инспекции по маломерным судам (ГИМС) МЧС России в 2016 году находилось 53613 маломерных судов с мощностью двигателей от 3 до 375 л.с. [11]. Испытания подвесных моторов, в том числе и на экологические характеристики обычно проводится на свободной воде в реке, однако, при создании сертифицированных центров по испытаниям моторов, ремонтных мастерских, заводов производителей, необходима разработка малых опытовых бассейнов (далее МОБ). Особенно, актуальность создания МОБ стала острой после выхода приказа МЧС России №608 от 18.10.2012 года [1], согласно которому освидетельствование маломерных судов по вредным выбросам осуществляют подразделения ГИМС МЧС России. Такой надзор связан с некоторыми трудностями, например, очень большое количество маломерных судов, для освидетельствования которых, необходимо привлечение помимо ГИМС МЧС еще и сертифицированных центров. Время проведения испытаний одного подвесного мотора достаточно большое, что затрудняет скорость освидетельствования такого объема судов.

Поэтому, разработка МОБ для проведения испытаний подвесных лодочных моторов актуальна и необходимость в таких устройствах очень высока в связи с дальнейшим ужесточением требований в области экологии и большим количеством двигателей маломерных судов в России.

1. Постановка задачи исследования

Известны разработки МОБ для испытания подвесных моторов у фирм – производителей моторов и специализированных предприятий, например, «Yamaha» [2], ОАО «СКБМ» (завод им. Фрунзе, производитель моторов типа «Вихрь») [3], «ЦАГИ» (Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского») [4-5], Ahlstrand Marine [6], Suzuki Marine SA Test Tank [7] и других. Их основные недостатки – уникальность разработок, отсутствие единой конструкции и технологий, высокая цена, отсутствие разработок малых центров и мастерских по ремонту лодочных моторов.

МОБ был разработан в рамках плана научно - исследовательских работ кафедры «Эксплуатация водного транспорта» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (далее - АГТУ), испытательного центра «Marine Technology Service» АГТУ, научно – исследовательской лаборатории «Ретрофит технологий на транспорте» АГТУ. Назначение МОБ – проведение испытаний подвесных лодочных моторов на соответствие требованиям ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8], Технического регламента таможенного союза ТР ТС 026/2012 [9] и других нормативно – технических документов.

2. Описание малого опытового бассейна

Разработанный МОБ (рис. 1) представляет собой стальной бак, со встроенным смотровым стеклом в нижней части для наблюдения за барботажем; транцевой доской для крепления подвесного мотора; герметичной крышкой с резиновым уплотнением и тремя встроенными светодиодными светильниками с питанием от аккумуляторных батарей; теплообменным аппаратом (подогревателем - охладителем) в нижней части бака для регулирования температуры воды; патрубками отборами воды для анализа; патрубками отборами газа для

анализа; вентиляцией для удаления отработавших газов.

Согласно рис. 1 можно выделить следующие элементы МОБ: 1 – газоанализатор Testo 350 MARITIME; 2 – прозрачное стекло для наблюдения за барботажем; 3 – термометр для измерения температуры воды; 4 – устройство для отбора отработавших газов с краном для дренажа воды; 5 – защитный кожух для отвода отработавших газов в вентиляцию; 6 – вытяжная вентиляция с подсветкой и тремя режимами работы вентилятора; 7 – транцевая доска толщиной 40 мм для крепления подвесного мотора; 8 – датчик частоты вращения двигателя; 9 – бак с номинальным объемом воды от 500 до 750 литров, с высотой 1100 мм.



Рис. 1. Общий вид МОБ

Маркировка всех составных элементов МОБ выполнена по стандарту ГОСТ Р ИСО 11192 – 2011 «Графические символы суда малые» [10].

Принципиальная схема разработанного МОБ по измерению вредных выбросов подвесных лодочных моторов маломерных судов представлена на рис. 2: 1 – бак; 2 – подвесной мотор; 3 – крышка; 4 – датчик частоты вращения мотора; 5 – подогреватель/охладитель; 6 – отбор выхлопных газов; 7 – трубопровод для отвода газов; 8 – дренаж; 9 – отбор воды; 10 – отвод воды; 11 – температура воды; 12 – светильники; 13 – транец; 14 – подвод воды; 15 – окно для наблюдения за барботажем; 16 – вентиляция для удаления отработавших газов.

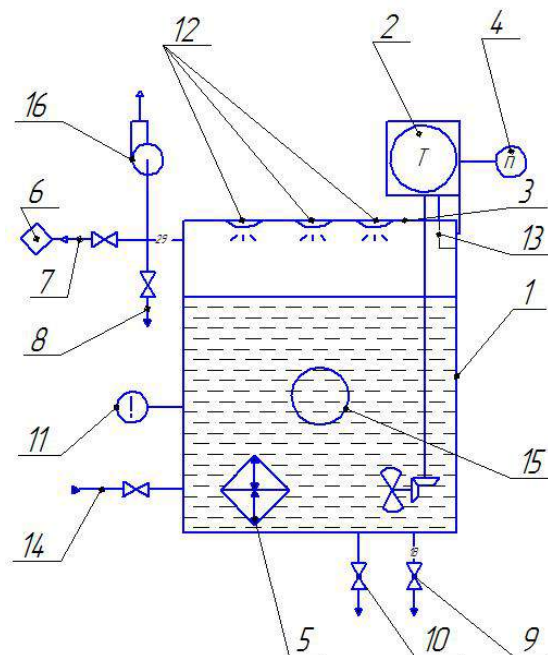


Рис. 2. Принципиальная схема МОБ

Основные контрольно - измерительные приборы

Газоанализатор Testo 350 MARITIME имеет поверку ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА». Прибор имеет сертификат Germanischer Lloyd (GL), номер сертификата 59488-08 НН на соответствие требованиям «MARPOL» 73/78 Annex VI, NOx Technical Code и МЕРС.103. Отбор пробы осуществляется специальным газоотборным зондом, монтаж которого выполняется при помощи фланца. Для оценочного измерения вибрации на рукоятке управления мотора использовался портативный вибрметр AR63A, для измерения шума – портативный шумомер UnionTEST SM135, оба прибора новые, имеют свидетельства о поверке.

3. Результаты исследований

Объектом для проведения оценочных испытаний в МОБ был выбран распространенный в Астраханской области и России подвесной лодочный мотор марки «Ветерок – 8М». Согласно данным ГИМС МЧС России по Астраханской области количество подвесных моторов данной марки составляет 760 шт. [11]. Данная марка была выбрана еще и по причине небольшой мощности для предварительной оценки возникающего при работе мотора барботажа в МОБ.

Технические характеристики МОБ и подвесного мотора при испытаниях:

- Объем воды в баке для испытаний: 500 л;
- Год выпуска мотора: 2001;

- Номинальная мощность мотора: 8 л.с.;
- Номинальный расход топлива: 3,2 л/час;
- Вид топлива: смесь бензина АИ-92 с моторным маслом М8 в пропорции 40 г масла на 1 литр бензина;
- Подвод воздуха для мотора: атмосферный.

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8].

Общий вид смонтированного мотора «Ветерок – 8М» в МОБ представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид МОБ с установленным подвесным мотором «Ветерок-8М»

Испытания проводились в течение 10-ти минут на каждом выбранном режиме работы мотора, которые соответствовали холостому ходу, долевному режиму и номинальному режиму работы. Результаты измерений вредных выбросов в отработавших газах подвесного мотора представлены в таблице 1. Применяемые способы отбора проб отработавших газов не изменяли характеристики выпускной системы, чтобы это не могло повлиять на результаты измерений. Отвод воды после испытаний в канализацию не производился для избежания загрязнения сточных вод продуктами сгорания и топливо - масляной смеси подвесного мотора.

Таблица 1

Результаты измерения вредных выбросов в отработавших газах подвесного мотора «Ветерок – 8М» в МОБ

Частота вращения мотора, об/мин	CO, ppm	NO, ppm	NO ₂ , ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	H ₂ , ppm
930	406	1	0,2	1	55	482
1500	462	0	0,2	0	41	45

Были произведены оценочные измерения вибрации и шума подвесного мотора, результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерения вибрации и шума подвесного мотора «Ветерок – 8М» в МОБ

Частота вращения мотора, об/мин	Виброускорение, мм/с ²	Виброскорость, мм/с	Виброперемещение, мм	Шум, Дб
1420	10,1	12,4	0,19	87,2
1550	8,28	9,44	0,139	86,6
2400	15,7	14,3	0,137	89,8

Допустимый уровень шума согласно ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8] для лодочных моторов выпуска до 2017 года не должен превышать требования ГОСТ 17.2.4.04-82 «Охрана природы. Атмосфера. Нормирование внешних шумовых характеристик судов внутреннего и прибрежного плавания» [12], то есть 80 Дб. Как видно из результатов испытаний уровень шума превышает допустимый на всех режимах, что требует установки внешнего звукоизолирующего кожуха для подвесного мотора. Определяющим параметром вибрации согласно ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8], является виброускорение на рукоятке румпеля, при частоте вращения двигателя, равной половине максимальной частоты вращения. Для подвесного мотора «Ветерок–8М» максимальная частота вращения составляет 4800 - 5000 об/мин, то есть частота, на которой следует оценивать виброускорение составляет 2400 – 2500 об/мин. Определенное на испытаниях значение составляет 15,7 мм/с². Согласно ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8] предельное значение указывается изготовителем мотора в инструкции при эксплуатации, но для «Ветерок – 8М» такой параметр в инструкции не указан. Предельные значения виброускорения в помещениях для речных судов (категория 4) согласно СН 1103-73 «Санитарные нормы

вибрации на морских, речных и озерных судах» [13] не должны превышать по относительной величине 63 Дб для низкочастотной вибрации на уровне 63 Гц. Согласно переводной таблице №5 из нормативного документа СН 1103-73 «Санитарные нормы вибрации на морских, речных и озерных судах» [13] величина виброускорения $1,57 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$ соответствует уровню 34 Дб. Полученный результат говорит о соответствии значения виброускорения на рукоятке управления действующим санитарным требованиям на речных судах.

Заключение

В результате разработки МОБ и проведенных оценочных испытаний можно сделать следующие выводы:

- разработанный МОБ может быть использован для проведения испытаний на соответствие параметров подвесных лодочных моторов требованиям ГОСТ 28556-16 «Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности» [8], Технического регламента таможенного союза ТР ТС 026/2012 и других нормативно – технических документов;

- для подвесного мотора «Ветерок-8М» не выявлено превышение допустимых значений по вредным выбросам в отработавших газах и величины виброускорения, но имеется превышение по уровню шума, что вероятно вызвано проведением испытаний в компактном помещении с возможным звуковым резонансом.

Литература

1. Приказ №608 от 18.10.2012 г. Об утверждении Административного регламента Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий предоставления государственной услуги по освидетельствованию маломерных судов, поднадзорных Государственной инспекции по маломерным судам министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий». 2012 г. - 41 с.
2. Yamaha outboard F250 test run. [Электронный ресурс]: <https://www.youtube.com/watch?v=qHBtQwBo6nc>.
3. С. Сурабекянц. «ВИХРИ» враждебные, или «Изделие 40». Катера и яхты. №3 (185) 2003. С. 38 – 41.
4. «Нептун» против «Вихря» или почему «Вихрь» «тянет» хуже других моторов. [Электронный ресурс]: <http://www.motolodka.ru/nv.htm>
5. Исследование гидродинамики мотора «Вихрь». [Электронный ресурс]: http://www.barque.ru/engine/1973/investigation_of_fluid_flow_engine_whirlwind
6. Outboard Test Tanks. Ahlstrand Marine. [Электронный ресурс]: <https://www.youtube.com/watch?v=X3KtUO8gEss>
7. Suzuki Marine SA Test Tank. [Электронный ресурс]: <https://www.youtube.com/watch?v=h1VA56Z8hRE>
8. ГОСТ 28556-16. Моторы лодочные подвесные. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2016. - 11 с.
9. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 026/2012. О безопасности маломерных судов, 2012. - 38 с.
10. ГОСТ Р ИСО 11192-2011. Суда малые. Графические символы. М.: Стандартинформ, 2012. - 24 с.
11. Покусаев М.Н., Хмельницкая А.А. Испытания подвесных моторов маломерных судов по измерению вредных выбросов с отработавшими газами // Вестник ВГАВТ, г. Нижний Новгород, 2017. № 51.
12. ГОСТ 17.2.4.04-82. Охрана природы. Атмосфера. Нормирование внешних шумовых характеристик судов внутреннего и прибрежного плавания, 1982. – 5 с.
13. СН 1103-73. Санитарные нормы вибрации на морских, речных и озерных судах, 1973. – 8 с.

References

1. Prikaz №608 ot 18.10.2012 g. Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta Ministerstva rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij predostavlenija gosudarstvennoj uslugi po osvidetel'stvovaniju malomernyh sudov, podnadzornyh Gosudarstvennoj inspekcii po malomernym sudam ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij». 2012 g. - 41 s.
2. Yamaha outboard F250 test run. [Jelektronnyj resurs]: <https://www.youtube.com/watch?v=qHBtQwBo6nc>.
3. S. Surabekjanc. «VIHRI» vrazhdebnye, ili «Izdelie 40». Katera i jahty. №3 (185) 2003. S. 38 – 41.
4. «Neptun» protiv «Vihrja» ili pochemu «Vihr» «tjanet» huzhe drugih motorov. [Jelektronnyj resurs]: <http://www.motolodka.ru/nv.htm>
5. Issledovanie gidrodinamiki motora «Vihr». [Jelektronnyj resurs]: http://www.barque.ru/engine/1973/investigation_of_fluid_flow_engine_whirlwind
6. Outboard Test Tanks. Ahlstrand Marine. [Jelektronnyj resurs]: <https://www.youtube.com/watch?v=X3KtUO8gEss>
7. Suzuki Marine SA Test Tank. [Jelektronnyj resurs]: <https://www.youtube.com/watch?v=h1VA56Z8hRE>
8. GOST 28556-16. Motory lodochnye podvesnye. Obschie trebovanija bezopasnosti. M.: Standartinform, 2016. - 11 s.
9. Tehnicheskij reglament tamozhennogo sojuza TR TS 026/2012. O bezopasnosti malomernyh sudov, 2012. - 38 s.

10. GOST R ISO 11192-2011. Suda malye. Graficheskie simvoly. M.: Standartinform, 2012. - 24 s.
11. Pokusaev M.N., Hmel'nickaja A.A. Ispytanija podvesnyh motorov malomernyh sudov po izmereniju vrednyh vybrosov s otrabotavshimi gazami // Vestnik VGAVT, g. Nizhnij Novgorod, 2017. № 51.
12. GOST 17.2.4.04-82. Ohrana prirody. Atmosfera. Normirovanie vneshnih shumovyh harakteristik sudov vnutrennego i pribreznogo plavanija, 1982. – 5 s.
13. SN 1103-73. Sanitarnye normy vibracii na morskikh, rechnyh i ozernyh sudah, 1973. – 8 s.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА КАВИТАЦИОННЫЙ ИЗНОС ЦИЛИНДРОВОЙ ВТУЛКИ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Владимир Павлович Булгаков

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

Ирина Николаевна Рубан

аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: irinaruban1979@mail.ru

Аннотация

Для среднеоборотных двигателей, оснащенных поршнями из алюминиевых сплавов, замена цилиндровых втулок при капитальном ремонте производится в связи с кавитационной эрозией наружной охлаждаемой поверхности. Причины кавитационного изнашивания втулки является вибрация, вызванная циклическим воздействием инерционных сил при перекладке поршня. Сила удара поршня по втулке вызывает в металле возмущение – напряжение и деформацию в виде двух видов волн: продольных и поперечных. Возмущения, как одиночные волны, движутся от внутренней стенки к наружной, отражаются и интерферируют с образованием поверхностных волн, в которых деформации и напряжения соизмеримы с предельными свойствами металла. Касательные напряжения при сдвиговых деформациях разрушают наиболее слабые структурные составляющие металла: образуют каверны по направлению графитных включений и отслоения в плоскостях параллельных охлаждаемой поверхности втулки. Для устранения кавитационного износа втулки необходимо предусмотреть предлагаемые авторами конструкционно-технологические мероприятия.

Ключевые слова: среднеоборотный двигатель, вибрация, кавитационный износ, втулка, поршень, чугун, импульс возмущения, скорость звука, акустическое сопротивление, контактная поверхность, интерференция, интенсивность колебаний, тепловой зазор, жесткость втулки.

THE EFFECT OF VIBRATION ON THE CAVITATION WEAR OF THE CYLINDER SLEEVE OF MEDIUM SPEED DIESEL ENGINES

Vladimir P. Bulgakov

the professor, Dr. Sci. Tech.,
the professor of department “Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering”
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: mbulgak@mail.ru

Irina N. Ruban

the postgraduate student of department “Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering”
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: irinaruban1979@mail.ru

Abstract

For medium-speed diesel engines fitted with pistons of aluminum alloys, the replacement of cylinder liners during major repairs is made due to the cavitation erosion of the outer cooling surface. The cause of cavitation wear of the sleeve is a vibration caused by cyclic inertial forces impact when rearranging the piston. The strength of the piston stroke on the sleeve causes the perturbation in metal – stress and deformation in the form of two types of waves: longitudinal and transverse. Perturbations, as single waves, move from the inner wall to the outer one, are reflected and interfered with the

formation of surface waves in which deformations and stresses are commensurable with the limiting properties of the metal. The shearing stresses under shear deformations destroy the weakest structural components of metal: forming the cavity in the direction of graphitic inclusions and separations in planes parallel to the cooled surface of the sleeve. To eliminate cavitation wear of the sleeve, it is necessary to provide for structural and technological measures offered by authors.

Key words: medium-speed diesel engines, vibration, cavitation wear, sleeve, piston, cast iron, perturbation pulse, sound speed, acoustic impedance, contact surface, interference, vibration intensity, thermal gap, rigidity of the sleeve.

Введение

При капитальном ремонте среднеоборотного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) производят полную замену цилиндрических втулок. Сроки ремонта определяются временем наработки до предельных износов внутренней и наружной водоохлаждаемой поверхности. Внутренняя поверхность изнашивается от трения движущихся колец и поршня. Наружная, водоохлаждаемая поверхность, изнашивается от коррозии и кавитационной эрозии. Коррозия происходит в результате окисления металла под действием хлоридов, растворенного в воде кислорода, вследствие электрохимических процессов от неоднородности контактирующих металлов. Кавитационная эрозия возникает в полости охлаждения под влиянием вибрации [1].

Скорость изнашивания внутренней и наружной поверхности втулки различны для двигателей оснащенных чугунными поршнями и поршнями из алюминиевых сплавов. Замена чугунных поршней на алюминиевые снизила скорость изнашивания внутренних рабочих поверхностей, но возросла вибрация втулок от увеличения теплового поршневого зазора и увеличилась кавитационная эрозия водоохлаждаемой поверхности. Глубина кавитационных дефектов

достигает 50% толщины втулки, что значительно превышает величину предельно-допустимого износа. В то же время ресурс износа внутренней поверхности превышает в два раза ресурс двигателя до капитального ремонта [2].

Целью настоящей работы является исследование механизма воздействия вибрации на структуру металла и обоснование мероприятий для снижения кавитационного износа цилиндрических втулок среднеоборотных двигателей.

Исследование механизма воздействия вибрации на структуру металла и обоснование мероприятий для снижения кавитационного износа цилиндрических втулок среднеоборотных двигателей

Исследование влияния низкочастотной вибрации на кавитационный износ цилиндрической втулки проведено на ДВС мощностью 736 кВт и числе оборотов $n = 375$ об/мин. Поршень изготовлен из отливки сплава АК12М2МгН (Ал25) ГОСТ 158-93, втулка из чугуна марки СЧ 21 по ГОСТ 1412-70. Химический состав и механические свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства втулки

Наименование	Углерод C, %	Кремний, Si, %	Марганец, Mn, %	Сера, S, %	Фосфор, P, %	Хром, Cr, %	Никель, Ni, %	Предел прочности, кг/мм ²	Твердость, НВ
Требования ГОСТ	2,8-3,0	1,6-1,8	0,5-0,7	0,05-0,06	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	22	170-220
Показатели втулки	2,97	1,71	0,77	0,052	0,315	0,28	0,45	21,8	206-220

Во время работы двигателя цилиндрические втулки испытывают механические нагрузки вызываемые действием сил расширяющихся газов, поступательно движущихся масс, центральных сил инерции неуравновешенных вращающихся масс. В конце такта сжатия рабочая смесь самовоспламеняется и сгорает при постоянном объеме, при этом давление в цилиндре повышается до 9...14 МПа [3]. Одновременно при переходе через «мертвую точку» происходит удар поршня по втулке, и возникает вибрация с частотой вынужденных колебаний, соответствующей числу оборотов

двигателя. Сила удара поршня по втулке не вызывает пластическую деформацию и потому возмущение, возникшее в металле втулки, будем рассматривать как упругое и имеющее природу возмущения принимается по виду изображенному на рис. 1 [4].

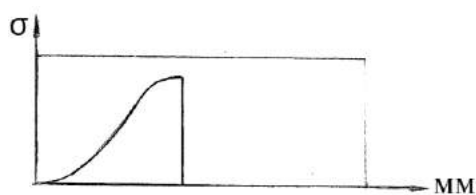


Рис. 1. Пространственное распределение напряжений в импульсе

Эту кривую считаем как пространственное или временное распределение напряжений по сечению втулки. Действие внезапно приложенной нагрузки не мгновенно передается всем частям нагружаемой детали. Упругие деформации и напряжения движутся в теле в виде волны, распространяющейся с конечной скоростью. Упругие возмущения бывают двух видов: продольная волна, в которой направление деформации совпадает с направлением возмущения; и поперечная волна (сдвиговая), в которой деформация происходит в перпендикулярном направлении [5].

Скорость распространения продольных волн определяется по формуле:

$$C_1 = E \times [(1 - \mu) / (\rho \times (1 - \mu - 2 \times \mu^2)^{1/2})]. \quad (1)$$

Скорость распространения поперечных волн определяется по формуле:

$$C_{\text{поп}} = [(E / 2 \times \rho) \times (1 + \mu)]^{1/2}, \quad (2)$$

где: E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона.

Импульсное давление, как одиночная волна возмущения, действующее на внутреннюю поверхность втулки движется к наружной водоохлаждаемой стенке и отражается. При этом падающая волна и отраженная будут интерферировать. Это значит, что напряжения и скорости частиц в отдельных местах можно векторно складывать для получения результирующих значений. Если падающая волна является сжимающей, то отраженная волна – растяжения, с той же интенсивностью. Интенсивность отраженных волн зависит от угла падения и коэффициента Пуассона. При наклонном падении поперечных и продольных волн возможны случаи интерференции в направлении вдоль отражающей плоскости. При этом возникают касательные напряжения соизмеримые по величине с пределом текучести материалов втулки. Возникшие поверхностные волны вызывают сдвиговую деформацию близкую к допустимой деформации материала втулки, способствуют деградации металла поверхностного слоя (рис. 2) [6].

Для двухслойных втулок из материалов с различными упругими свойствами импульсы проходят из одного материала в другой и дают отражения от контактных поверхностей. Если акустическое сопротивление ($\rho \times c$) первого материала больше, чем для второго материала,

то сжимающие напряжения отражаются как растягивающие.

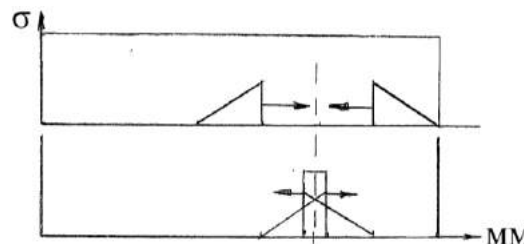


Рис. 2. Интерференция импульсных волн растяжения

Напряжение отраженной волны равно:

$$\sigma_r = \sigma_1 \times (\rho_1 \times c_1 - \rho_2 \times c_2) / (\rho_1 \times c_1 + \rho_2 \times c_2), \quad (3)$$

где: σ_1 – напряжение в падающей волне; ρ_1 – плотность первого слоя; ρ_2 – плотность второго слоя; c_1 – скорость звука первого слоя материала; c_2 – скорость звука второго слоя материала.

Если акустическое сопротивление ($\rho_2 \times c_2$) второго слоя мало, то большая часть волн отразится от поверхности раздела и импульс возмущения останется в первом материале. Если ($\rho_1 \times c_1 - \rho_2 \times c_2$) мало, то большая часть волны перейдет во второй слой и не будет участвовать в интерференции. Величину σ_r / σ_1 представим как коэффициент отражения импульса. Подбор материала второго слоя по акустическому сопротивлению является способом снижения кавитационной эрозии втулки [7]. Если учесть, что продольные волны проходят как падающие в чугуне, отражаются от поверхности раздела и проходят в воду, то поперечная волна только отражается от поверхности раздела с водой и остается внутри чугуна, создавая импульс растяжения. Интерференция сдвиговых волн у поверхности втулки создает растягивающие напряжения в металле, которые являются главным фактором кавитационной эрозии металла.

Величина напряжения, создаваемая импульсом в элементарном объеме втулки, прямо пропорциональна амплитуде колебаний и модулю упругости материала:

$$\sigma = \pm E \times k \times A \times \cos(\omega t \pm k \times x), \quad (4)$$

где: ω – круговая частота; k – волновой коэффициент; x – текущие координаты; A – амплитуда колебаний.

Импульсные воздействия на структуру и свойства металла изучали на втулке из серого чугуна марки СЧ 21 отработавшей моторесурс до критических размеров, как по внутренней поверхности, так и по кавитационному износу водоохлаждаемой поверхности. Макро и микроструктуру и твердость определяли на продольных и поперечных темплатах из мест с максимальным количеством поверхностных

дефектов. Анализ поперечного сечения втулки показал, что периферийная зона со стороны прямого импульсного воздействия имеет следы деформации и повышенную твердость (до 255HV). В осевой зоне структурных изменений нет, но наблюдается снижение твердости до 200HV (рис. 3) [7].

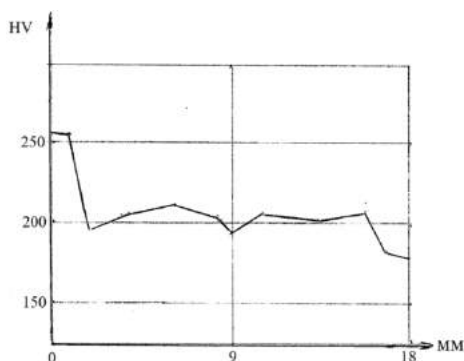


Рис. 3. Твердость втулки по сечению от внутренней поверхности до наружной

На наружной, омываемой водой, поверхности наблюдаются кавитационные язвы – каверны глубиной до 8...10 мм при толщине стенки втулки 18 мм. Установлено, что поверхностные дефекты развиваются в глубину по графитным включениям в местах скопления ферритной фазы и образуют расслоение вдоль наружной поверхности втулки на глубине 2...3 мм. Твердость металла заметно снижена до 160HV.

В процессе эксплуатации втулки импульсное действие упрочняет металл с внутренней поверхности на глубину до 5 мм не изменяя твердость в осевой зоне, снижает твердость и разрушает структуру металла поверхностных слоев образуя язвы и отслоения со стороны охлаждаемой поверхности (рис. 4).

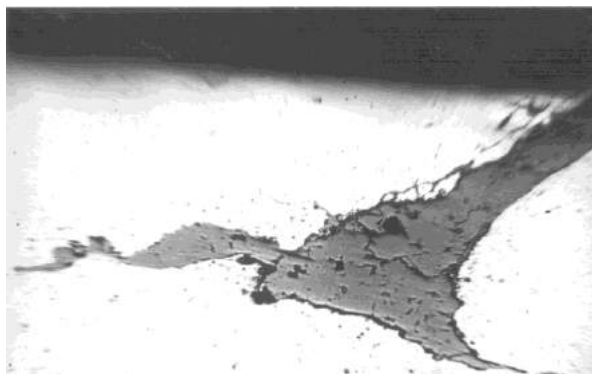


Рис. 4. Отслоение металла от внутренней поверхности втулки по графитному включению

При кавитационном изнашивании охлаждаемых поверхностей втулок разрушение металла

происходит под действием высоких напряжений от интерференции импульсных волн на микроплощадках с пониженными свойствами структуры – на феррите, фосфидной эвтектике и пластинчатых графитных включениях. В связи с этим, мероприятия по радикальному устранению кавитационного износа втулки предусматривают: 1) снижение интенсивности колебаний в импульсе; 2) повышение износостойкости структуры металла; 3) повышение коэффициента отражения поперечных волн от границы «втулка-вода».

Заключение

Наиболее эффективным средством снижения энергии удара поршня по стенке цилиндра является уменьшение теплового зазора между алюминиевым поршнем и втулкой. Но при этом следует учитывать возможность задириобразования при обкатке двигателя [8].

Уменьшение кавитационного изнашивания втулок достигнуто путем повышения жесткости втулки за счет увеличения ее толщины и снабжения втулки вертикальными ребрами. Эти мероприятия снижают амплитуду колебаний в импульсе [9].

Выбор материала втулки производится с учетом механизма разрушения. Оптимальной структурой признана структура, состоящая из перлитной металлической основы и среднепластинчатого, равномерно распределенного графита [10]. Кавитационную износостойкость металла можно повысить заменив пластинчатый перлит на сорбитообразный, а пластинчатый графит на вермикулярный и убрать из структуры свободный феррит. Это достигается модификацией металла – добавками бора в чугун в количестве 0,5...0,6%, снижением содержания кремния (в рамках марочного состава чугуна) и добавками никеля до 0,6% [11].

Одним из способов защиты поверхности втулки от кавитационного износа служит повышение твердости. Повышение твердости поверхности достигается наклепом, азотированием или применением твердых покрытий [12]. Но твердое покрытие имеет низкий коэффициент поглощения и усиливает резонанс в поверхностных слоях, быстро отслаивается и в дальнейшем способствует ускоренному кавитационному износу. Поэтому для защиты втулок от кавитации следует использовать металл с высокой плотностью и высоким коэффициентом поглощения упругих волн [12].

Литература

1. *Иванченко Н.Н.* Кавитационные разрушения в дизелях / Н.Н. Иванченко, А.А. Скуридина, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1970. – 152 с.
2. *Кондратьев Н.Н.* Отказы и дефекты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1985. – 152 с.
3. *Овсянников М.К.* Теплотехника: техническая термодинамика и теплопередача / М.К. Овсянников, И.И. Костылев: Учебник. – СПб.: ЭЛМОП, 1998. – 208 с.
4. *Дж. С. Райхарт, Дж. Пирсон* Поведение металлов при импульсных нагрузках. – М.: Иностранная литература, 1958. – 296 с.
5. *Снеддон И.Н., Берри Д.С.* Классическая теория упругости. – М.: Физматгиз, 1961. – 256 с.
6. *Булгаков В.П.* Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АЛ25 на задирообразование цилиндропоршневой группы / В.П. Булгаков, Ю.В. Чеботарев, И.Н. Рубан // Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. выпуск 5 (39), – 2016. – с.153-157.
7. *Белоцкий А.В.* Ультразвуковое упрочнение металлов / А.В. Белоцкий, В.Н. Виннеченко, И.Н. Муха, – Киев: Техника, 1989. – 168 с.
8. *Возницкий И.В., Михеев Е.Г.* Судовые дизели и их эксплуатация. Учеб. для мореходных училищ. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 360 с.
9. *Карпов Л.Н.* Неоднородность и качество судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.
10. *Будин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н.* Основы металлографии чугуна. – М.: Metallurgia, 1969. – 416 с.
11. *Погодаев Л.И., Шевченко П.А.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1984. – 263 с.
12. *Булгаков В.П.* Втулка шарнира черпаковой цепи земснаряда из двухслойной борированной стали / В.П. Булгаков, С.С. Уксусов, Л.А. Цапко // СПб.: Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, – вып. 4 (32), – 2015. – с. 153-157.

References

1. N.N.Ivanchenko, A.A. Skuridina, M.D. Nikitin. *Kavitacionnyye razrusheniya v dizeljah*. L. Mashinostroenie, 1970.
2. Kondrat'ev N.N. *Otkazy i defekty sudovyh dizelej*. M.: Transport, 1985.
3. M.K. Osvjannikov, I.I. Kostylev. *Teplotehnikaja: tehničeskaja termodinamika i teploperedacha*. SPb.: JeLMOR, 1998.
4. Dzh. S. Rajhart, Dzh. Pirson. *Povedenie metallov pri impul'snyh nagruzkah*. M.: Inostrannaja literatura, 1958.
5. Sneddon I.N., Berri D.S. *Klassičeskaja teorija uprugosti*. M.: Fizmatgiz, 1961.
6. V.P.Bulgakov, Ju.V. Chebotarev, I.N. Ruban. "Vlijanie himičeskoj neodnorodnosti otlivki porshnja iz splava AL25 na zadiroobrazovanie cilindroporshnevoj grupy." *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, vypusk 5 (39)*, 2016: 153-157.
7. A.V. Belockij, V.N. Vinnechenko, I.N. Muha. *Ul'trazvukovoe uprochnenie metallov*. Kiev: Tehnika, 1989.
8. Voznickij I.V., Miheev E.G. *Sudovye dizeli i ih jekspluacija*. M.: Transport, 1990.
9. Karpov L.N. *Neodnorodnost' i kachestvo sudovyh dizelej*. L.: Sudostroenie, 1975.
10. Budin K.P., Malinochka Ja.N., Taran Ju.N. *Osnovy metallografii chuguna*. M.: Metallurgija, 1969.
11. Pogodaev L.I., Shevchenko P.A. *Gidroabrazivnyj i kavitacionnyj iznos sudovogo oborudovanija*. L.: Sudostroenie, 1984.
12. V.P. Bulgakov, S.S. Uksusov, L.A. Capko. "Vtulka sharnira cherpakovoj cepi zemsnarjada iz dvuhslojnoj borirovannoj stali." *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, vypusk 4 (32)*, 2015: 153-157.

УДК 656.61

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НА РОСТ ТРЕЩИН В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СУДНА

Сергей Иванович Кондратьев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления судном,
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93
e-mail: mail@nsma.ru

Александр Викторович Файвисович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики и инженерной графики
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93
e-mail: faivisovich@gmail.com

Аннотация

Рассматривается задача прогнозирования длительной прочности и долговечности конструктивных элементов морских судов, подверженных воздействию волновой нагрузке, которая в работе определена, как случайный нестационарный процесс. Отмечается особая роль циклической нагрузки с переменной амплитудой напряжений, способная существенно повлиять на суммарную долговечность конструктивного элемента. Приводится анализ известных подходов к решению задачи о создании нормированной истории нагружения, привязанной к маршруту судна. Предлагается алгоритм создания истории нагружения, учитывающий наличие базы данных о состоянии морской поверхности данного региона. Указывается на необходимость учета неопределенностей, имеющих место на всех стадиях создания истории нагружения.

В основу методики прогнозирования положено предположение о изначальном существовании трещины, или похожего на нее дефекта, в конструктивном элементе. Для учета влияния эффекта перегрузки при нерегулярных волновых нагрузках предложено использовать модернизированную модель Уилера. В заключение отмечается, что для получения достоверных результатов прогнозирования необходимо иметь реальную историю волнового нагружения судна, которая является основой для проведения поциклового расчета роста трещины в конструктивном элементе.

Ключевые слова: волновая нагрузка, история нагружения, трещина, напряжение, конструктивный элемент, прогнозирование

PREDICTION OF WAVE LOAD EFFECT ON CRACK GROWTH IN STRUCTURAL ELEMENTS OF SHIP

Sergey I. Kondratyev

Professor, Dr. Sci. Tech.,
Professor of Ships Handling Department
Admiral Ushakov Maritime State University
Lenin avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation
e-mail: faivisovich@gmail.com

Alexander V. Faivisovich

Professor, Dr. Sci. Tech.,
Professor of Mechanics and Engineering graphics Department
Admiral Ushakov Maritime State University
Lenin avenue, 93, Novorossiysk 353918, Russian Federation
e-mail: faivisovich@gmail.com

Abstract

This paper studies the prediction of long-term strength and durability of structural elements of marine vessels that are subject to wave load, which is determined as non-stationary random process. It is noted the special role of cyclic loading with variable amplitude stresses significantly affecting the overall durability of the structural element. The analysis of the known approaches to solution of the problem of creating the standardized load-time history, bound to the route of the vessel is given. The algorithm of the load history creation taking into account the availability of a database on the state of the sea surface of this region is suggested as well as the necessity of accounting for the uncertainties occurring at all stages of creation of the load-time history.

The methodology of prediction is based on the assumption of the initial existence of crack or similar defect in the element. To account the effect of overload with irregular wave loads is proposed to use an upgraded model of Wheeler. In conclusion, it is noted that to obtain accurate prediction results it is necessary to have the real history of the wave loading of the vessel, that is the basis for cycle-by-cycle calculation of crack growth in structural elements.

Key words: wave loading, history of loading, crack, stress, structural element, prediction

Введение

Быстрое развитие рынка морских перевозок способствовало увеличению габаритов судов, а применение новых высокопрочных материалов, позволило уменьшить сечения конструктивных элементов (КЭ), что привело к повышению в них уровня напряжений. Существовавшая и до этого задача обеспечения прочности судна стала еще актуальнее, как на стадии его проектирования, так и в процессе эксплуатации, о чем свидетельствует резолюция ИМО [1].

Основным внешним силовым фактором, влияющим на прочность конструкции судна, является волнение морской поверхности, которое рассматривается как случайный нестационарный процесс [2-9]. В нормативных документах [10-14] описаны волны с характерными временными масштабами от долей до нескольких секунд и линейными масштабами от сантиметров до сотен метров. Наибольшее влияние оказывают волны с периодом от 5 до 30 секунд. Этому интервалу соответствует наибольшая величина подводимой к корпусу судна энергии волны. Состояние поверхности моря характеризуется спектральной плотностью волнения, которая показывает характер распределения дисперсии волновых ординат по частотам волн. Наиболее известными являются спектры Pierson-Moskowitz, (или спектр ISSC) и JONSWAP. В соответствии с [2], спектр ISSC предпочтителен при расчете внешних нагрузок на судно при океанском плавании, тогда как спектр JONSWAP рекомендован для прибрежных сооружений и судов прибрежного плавания.

Волновые нагрузки на корпус судна являются основным источником переменных напряжений, приводящих к появлению видимых усталостных дефектов (макротрещин). Известно, что эффект воздействия переменной нагрузки на КЭ зависит не только от величины циклических напряжений, но и от очередности следования их амплитуд. Если не учитывать эти эффекты, то расчетное значение долговечности может существенно, иногда в разы, отличаться от действительного. Следовательно, точность моделирования гидродинамических нагрузок, с учетом их последовательности, представляет особую ценность для достижения достоверного результата прогнозирования прочности судна в условиях нерегулярного волнения [15, 16].

Работа посвящена анализу известных в литературе подходов к моделированию волновой нагрузки и созданию алгоритма решения задачи прогнозирования остаточного ресурса КЭ с трещиной под воздействием циклических нагрузок с переменной амплитудой.

1. Моделирование волновой нагрузки

Для достоверного прогнозирования прочности и долговечности КЭ с трещиной необходима подробная информация, как о волновых нагрузках на судно за длительный промежуток времени, так и их последовательности, получившая название «standardized load-time history» - нормированная история нагружения (НИН). Данный подход получил широкое применение как в Европе, так и в США, не только в судостроении, но и в автомобильном, и в воздушном транспорте. Интересно отметить, что практически до 90-х годов данный подход к решению задачи использовался только в авиационной отрасли. Это объясняется необходимостью разработки «облегченных» (неметаллоемких) летательных аппаратов при одновременном обеспечении заданной прочности и долговечности. В 90-х годах этот подход стал востребован морской отраслью. Так, в 1988 году был создан стандарт Wash 1 [17], а в 1995 году японские исследователи [18] предложили модель шторма для реальных волновых состояний. Ими был проведен анализ статистических данных о состоянии поверхности моря, собранных экипажами 38 торговых судов, осуществлявших операции в северной части Тихого океана, и 11 торговых судов - в Индийском океане, в течении 14 лет (с 1976 года по 1989 год), и 6 судов, работавших вблизи Японии в течении 3 лет, начиная с 1987 года. Все суда были разного назначения, тоннажа и размеров. Значение основной характеристики, высоты волны, имеет большой разброс и соответствуют распределению Вейбулла. Для северной части Тихого океана среднее и наибольшее значения высоты волны 2,3 метра и 15 метров, соответственно. В Индийском океане – 1,2 метра и 8 метров, соответственно. Среднее количество штормов за год составляло в северной части Тихого океана – 4,7, а в Индийском – 1,5. Авторы [18] предложили различать 2 состояния моря: спокойное и штормовое. Штормовым состоянием считается высота волны, превышающая, не менее чем в 2 раза, среднюю высоту волны в данном регионе. Это означает, что в северной части Тихого океана штормом считается волнение высотой не менее 4,6 метров, а в Индийском океане – более 2,4 метра. Продолжительность шторма также зависит от местоположения. Так, длительность штормового состояния в северной части Тихого океана составляет в среднем 3,5 дней, а в Индийском океане – 5 дней. При штормовом состоянии высота волны является функцией времени: со

временем ее величина возрастает до максимального значения, после чего наблюдалось постепенное снижение. При спокойном состоянии моря вероятность появления небольших волн не зависит от времени и носит случайный характер. Последовательность состояний моря (спокойного и штормового) также носит случайный характер, как это показано на рис.1, где приведена история нагружения с различным сочетанием повторяющихся событий разной продолжительности, соответствующие реальному маршруту судна (северной части Тихого океана)



Рис.1. Модель последовательности нагрузок [18]

Количество повторений и последовательность циклов нагружения выбраны исходя из известных условий эксплуатации судна. Здесь использована следующая классификация штормового состояния в зависимости от высоты волны: А(6м), В(7м), С(8м), D(9м), E(11м), F(15м). Отмеченное количество штормов за 20 лет было 93, из них по типам: А(42), В(25), С(12), D(7), E(6), F(1). Средний период волны составляет 6,3 секунды. С учетом всех приведенных данных, не трудно оценить среднее количество волн (циклов нагружения) в каждом шторме, получается 48000 волн.

Примерно к таким же выводам об основных закономерностях состояния морской поверхности в 2003 году пришли другие японские авторы [19], проводившие анализ данных за 12 лет на маршруте Япония – Персидский залив. Был предложен метод моделирования случайной волновой нагрузки, исходными положениями которого являются:

- весь срок службы судна определен 20 годами, в течение которых оно испытывает 10⁵ блоков нагружения;

- на протяжении всего срока службы (20 лет) продолжительность блока нагружения считается

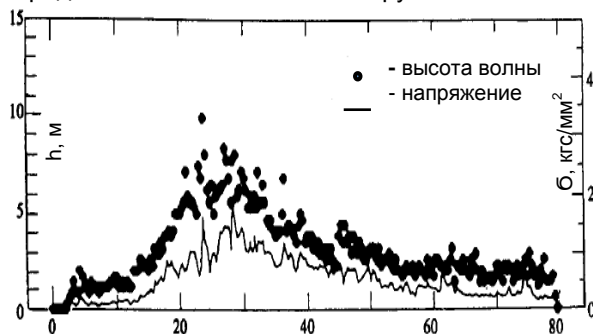


Рис.2. Соотношение значений напряжений, σ , и высоты волны, h , по результатам работы [18]

постоянной величиной и составляет 1,2 часа, полагая, что судно в течении 1 года эксплуатируется 250 дней;

- под штормовым состоянием было принято считать волнение, превышающее в 2 раза среднестатистическую высоту значительной волны для данного места, здесь $h_{1/3}=2,3 м$;

- продолжительность шторма составляет 5 дней и не зависит от величины высоты значительной волны. Таким образом, один шторм состоит из 100 блоков нагружения, учитывая второе положение;

- величина высоты значительной волны при шторме имеет распределение Вейбулла. В табл.1 приведены доли составляющих элементов для каждого из пяти уровней шторма (8,5 м, 7,5 м, 6,5 м, 5,5 м и 4,5 м);

Таблица 1

Структура шторма

Высота волн (м)	Уровни шторма				
	8,5	7,5	6,5	5,5	4,5
8,5	1				
7,5	6	1			
6,5	20	6	1		
5,5	55	20	6	1	
4,5	81	55	20	6	6
3,5		81	55	20	10
2,5			18	55	65
1,5				18	19
Сумма	100	100	100	100	100

- общее количество штормов и спокойных состояний поверхности моря за весь маршрут Япония–Персидский залив приведены в табл.2.

Таблица 2

Число штормовых и спокойных состояний моря

Штормовое состояние		Спокойное состояние	
Уровень	Количество	Уровень	Количество
8,5	7	3,5	1760
7,5	8	2,5	2582
6,5	107	1,5	27843
5,5	160	0,5	20716
4,5	161		
сумма	471	сумма	20716

Поскольку при прогнозировании остаточного ресурса КЭ требуется оперировать понятием

напряжение, постольку важно иметь представление о корреляции величины напряжения в элементах судна от высоты волны.

Такое соотношение для случая шторма приведено в работе [18]. На рис.2 видно, что между значениями напряжения в КЭ и высотой волны имеет место прямая зависимость. Причем, форма измеренного сигнала повторяет форму модели шторма на рис.1. Продолжительность шторма, как видно на рис.2, примерно соответствует средней продолжительности для данного места наблюдений – 3 суток.

Приведенные выше результаты исследований необходимо использовать при составлении последовательности приложения волновых нагрузок на судно в процессе его эксплуатации.

2. Создание истории нагружения судна

В отличие от воздушного и автомобильного транспорта, НИН для судов получаются более длительными, что объясняется протяженностью их маршрутов. Сравнительно недавно этой задаче были посвящены работы китайских ученых [20-22]. Основной их целью была разработка методики создания истории нагружения для морских судов путем экстраполяции статистических данных о состоянии моря, полученных за короткий промежуток времени, на весь срок службы судна. Авторы выделяют следующие этапы создания истории нагружения:

1) выбор профиля, который может отражать как весь маршрут судна, так и некоторые его фрагменты. Всю историю нагрузок, которым подвержено судно в процессе эксплуатации делят на так называемые моды (события), соответствующие различным состояниям морской поверхности. Эти моды отличаются между собой определенным набором и последовательностью нагрузок, их величиной (амплитудой), частотой и продолжительностью. Они могут представлять различные этапы маршрута судна. В совокупности эти моды образуют профиль истории нагружения. Таким образом, НИН представляет собой реальные статистические данные о состоянии поверхности моря, соответствующие определенному региону за продолжительный временной интервал;

2) сбор базы данных. Базовой информацией при создании нового профиля НИН являются подробные статистические данные о состоянии моря для каждого участка маршрута. Обычно такие данные получают прямыми измерениями штатными приборами, но могут быть дополнены путем соответствующих статистических вычислений, в том числе, интерполированием или экстраполированием уже имеющихся данных, а также просто посредством предположений и допущений;

3) обработка базы данных. Собранные данные необходимо обработать, что сводится к выявлению повторяющихся мод, отбрасыванию «незначительных» по величине нагрузок и

экстраполяции кратковременных выборок данных. Данная последовательность циклов нагружения может повторяться в НИН несколько раз. Продолжительность таких повторяющихся периодов нагружения является важным фактором. Для морских конструкций, как например нефтяные платформы, которые остаются долгое время на одном месте, естественным периодом может служить календарный год, когда происходит естественная смена сезонов и, соответственно, состояния морской поверхности.

4) компоновка мод и сегментов маршрута судна. С одной стороны, совокупность полученных в процессе эксплуатации судна большого объема данных позволяет учесть всевозможные случаи нагружения, но с другой стороны подобный подход приводит к неприемлемой продолжительности испытаний. К тому же, значительную часть этих данных составляют случаи нагружения, не влияющие на усталостную прочность КЭ. В то же время следует учесть редко случающиеся, но большие по величине нагрузки, которые могут существенно повлиять на усталостную прочность КЭ судна [17]. После проведения фильтрации нагрузок, в каждом случае (мод) нагрузок можно провести экстраполяцию на продолжительность в пределах истории нагружения. Один из методов обработки данных был предложен в работе [23], в основу которого положен, так называемый, «метод дождя», выделяющий значимые для усталостного процесса амплитуды напряжений.

Существенное влияние на достоверность результатов прогнозирования оказывает наличие различных неопределенностей, которые имеют место при моделировании взаимодействия судна с морской средой. В работе [24] авторы отмечают неопределенности, которые присутствуют на всех стадиях прогнозирования долговечности КЭ, это:

- описание состояния окружающей среды;
- моделирование нагрузок на судно;
- создание истории нагружения;
- анализ напряженного состояния КЭ;
- расчет на длительную прочность.

Все неопределенности делятся на две группы:

- природные, обусловленные многообразием и случайным характером волнения моря;
- модельные, вследствие несовершенства соответствующих корреляционных уравнений и использования в методах прогнозирования различных идеализаций и упрощений.

Из сказанного выше следует, что созданная на базе статистических данных о волнении моря история нагружения судна, безусловно, будет отличаться от реальной, но, в то же время, она позволит повысить точность прогнозирования долговечности КЭ благодаря учету эффектов взаимного влияния амплитуд волновых нагрузок.

3. Прогнозирование роста трещины

Почти 200 лет изучают явление усталости металлов, но до сих пор нет универсальных

методов и уравнений, позволяющих достоверно прогнозировать процесс разрушения, что объясняется, как многовариантностью протекания самого явления, так и наличием всевозможных факторов, влияющих на него. Во многих инженерных приложениях при прогнозировании прочности и долговечности КЭ до сих пор используется метод Майнера (метод линейного суммирования повреждений), которому присущи многие недостатки, вытекающие из упрощенного представления усталостного разрушения, как процесса накопления рассеянных по всему объему КЭ усталостных повреждений. Так, разрушение, по Майнеру, наступает при достижении параметра повреждений единице или какому-либо другому критическому значению. Не останавливаясь подробно на анализе недостатков данного метода описания процесса разрушения, отмечу, что во второй половине прошлого века интенсивное развитие получила теория трещин. В настоящее время считается, что в любом КЭ изначально присутствует трещина или похожий на нее дефект (особенно в местах сварки), и остаточный ресурс этого КЭ определяется временем подрастания трещины до критического размера. Поэтому, усталостное разрушение КЭ следует рассматривать как локальный процесс, и точность решения задачи будет в значительной степени зависеть от адекватности используемой модели роста трещины условиям нагружения. С середины прошлого века было предложено более сотни различных уравнений, описывающих рост трещины. Практически все они связывают скорость роста трещины (СРТ) с размахом коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

Из всего многообразия в случае нерегулярного нагружения следует остановиться на группе моделей поциклового анализа, учитывающих историю нагружения. Наиболее известной из них является модель Уилера [25], объясняющей изменение СРТ после перехода с одной амплитуды напряжений на другую, появлением перед кончиком трещины дополнительных сжимающих напряжений, существенно снижающих величину эффективного размаха КИН, силового фактора, определяющего СРТ. Введением в уравнение размеров пластических зон, образующихся перед трещиной в момент перегрузки и после нее, Уилер описал эффект торможения роста трещины после разовой перегрузки растяжением. Последующие работы [26-32] и другие позволили существенно расширить возможности модели.

Модернизированная модель Уилера позволяет дополнительно к оригинальной версии учитывать влияние асимметрии цикла нагружения, напряженное состояние перед трещиной, а также, что наиболее важно для случая нерегулярного нагружения, использовать уравнение СРТ как при постоянной амплитуде напряжений, так и при переменной (включая блочное нагружение), в том числе, при чередовании перегрузок растяжением и сжатием.

Уравнение СРТ модернизированной модели Уилера имеет следующий вид:

$$\frac{da}{dN} = C \left[(\Delta K_{eq0})^m - (\Delta K_{th0})^m \right], \quad (1)$$

где ΔK_{eq0} - эквивалентный размах КИН, приведенный к коэффициенту асимметрии $R = 0$; ΔK_{th0} - пороговый размах КИН при $R = 0$; M_R - коэффициент, учитывающий влияние R ; M_P - коэффициент, учитывающий влияние истории нагружения; β, β_1 - эмпирические коэффициенты.

$$\Delta K_{eq0} = M_R M_P \Delta K \quad (2)$$

$$M_R = \begin{cases} (1-R)^{-\beta_1} & \text{при } -5 \leq R < 0 \\ (1-R)^{-\beta} & \text{при } 0 \leq R < 0,5 \\ (1,05 - 1,4R + 0,6R^2)^{-\beta} & \text{при } 0,5 \leq R < 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$M_P = \begin{cases} \left(\frac{r_y}{a_{ol} + r_{ol} - a - r_{\Delta}} \right)^n & \text{при } a + r_y < a_{ol} + r_{ol} - r_{\Delta} \\ 1 & \text{при } a + r_y \geq a_{ol} + r_{ol} - r_{\Delta} \end{cases} \quad (4)$$

где a, a_{ol}, r_y, r_{ol} - текущие и в момент перегрузки длина трещины и размер пластической зоны, соответственно.

Снижение влияния перегрузки растяжением последующей перегрузкой сжатия учитывается параметром r_{Δ} , уменьшающим размер пластической зоны после перегрузки и, тем самым, несколько снижающим эффект торможения роста трещины:

$$r_{\Delta} = \alpha \left(\frac{\Delta K_u}{\sigma_y} \right)^2 \quad (5)$$

$$\Delta K_u = F \sqrt{\pi a} (\sigma_{\min}^{i-1} - \sigma_{\min}^i) \quad (6)$$

где $\sigma_{\min}^{i-1}, \sigma_{\min}^i$ – наименьшие значения напряжения в предыдущем и последующем циклах; α - коэффициент, учитывающий степень стеснения деформаций перед кончиком трещины и зависит от вида напряженного состояния перед трещиной; F - коэффициент, учитывающий геометрию образца, относительное положение и форму трещины.

Используя выражения (1)-(6), определяют поциклово подрастание трещины в соответствии с историей нагружения.

Следует отметить, что в уравнении (1) учитывается возможная остановка трещины, при $\Delta K_{eq0} \leq \Delta K_{th0}$. Это условие может служить основой при фильтрации циклов нагружения в процессе составления НИН. Например, циклы с напряжениями ниже предела выносливости можно не учитывать, в первом приближении, т.к. они не оказывают заметного влияния на процесс роста трещины. Кроме того, из лабораторных

испытаний известно, что если перепад напряжений не превышает 30% от текущей нагрузки, то эффект торможения роста трещины не наблюдается, что также надо принимать во внимание при прогнозировании остаточного ресурса КЭ.

Заключение

Анализ приведенных в статье работ показал:

1) создание истории волнового нагружения судна при прогнозировании остаточного ресурса КЭ является необходимым условием получения достоверных расчетных результатов;

2) НИН представляет собой реальные статистические данные о состоянии поверхности моря, соответствующие определенному региону за продолжительный временной интервал;

3) неопределенности, которые присутствуют и следует учитывать на всех стадиях создания НИН и прогнозирования долговечности КЭ;

4) необходимость использования поцикловых методов расчета, позволяющие учесть влияние нерегулярных нагрузок на СРТ.

Литература

- Adoption of the international goal based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers resolution MSC.287 (87). IMO, 2010. URL: <http://www.imo.org> (дата обращения: 29.03.2017).
- Короткин Я.И., Рабинович О.Н., Ростовцев Д.М. Волновые нагрузки корпуса судна. Л.: Судостроение, 1987. 235 с.
- Чижумов С. Д. Основы динамики судов на волнении. Комсомольск-на-Амуре: «КНАГТУ», 2010. 110 с.**
- Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состояния моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 231 с.
- Давидан И.Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. и др. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 287 с.
- Титов Л.Ф. Ветровые волны. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 293 с.
- Carter D.J.T. Estimation of wave spectra from wave height and period. I.O.S. Report № 135. Wormley: Institute of oceanographic sciences, 1982. 20 p.
- Naithani, R., Deo, M.C. (2005). Estimation of wave spectral shapes using ANN. *Advances in Engineering Software*, 36(11-12), 750-756.
- Cahill, B., Lewis, T. (2014). Wave period ratios and the calculation of wave power (Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium). Seattle, 10.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 214 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009. 356 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. 452 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010. 566 с.
- Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. СП 38.13330.2012. М.: Росстандарт, 2012. 116 с.
- Mao, W., Ringsberg, J.W. Analysis of fatigue crack initiation and propagation in ship structures (Proceedings of 13th International Conference on Fracture). Beijing, China, 2013. 10.
- Разработка теоретических основ и методологии комплексного нормирования мореходности с учетом прочности морских судов: диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.08.01: защищена 08.06.10/ Кутейников Михаил Анатольевич. СПб, 2010. 220 с.
- Schütz, W., Klätschke, H., Hück, M., Sonsino, C. M. (1990). Standardized load sequence for offshore structures-WASH I. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 13(1), 15-29.
- Yasumitsu, T., Masaaki, M., Hiroshi, K. (1995). Fatigue crack growth behavior under random loading model simulating real encountered wave condition. *Marine Structure*, 8(4), 407-422.
- Kawabe, H., Oka, S., Oka, M. (2003). The study of storm loading simulation model for fatigue strength assessment of ship structural members. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 93, 39-47.

20. Li, S., Cui, W. (2011). On generation of standardized load time histories and standardized load spectra. *Journal of Ship Mechanics*, 15, 1405–1415.
21. Li, S., Cui, W. (2013). Generation and application of a standardized load-time history to critical ship structural details. *Ships and Offshore Structures*, 9(4), 365–379.
22. Li, S., Cui, W. (2015). Generation and application of a standardized load-time history to tubular T-joints in offshore platforms. *China Ocean Engineering*, 29(5), 633–648.
23. Johannesson, P. (2006). Extrapolation of load histories and spectra. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 29(3), 209–217.
24. Nikolaidis, E., Kaplan, P. Uncertainties in stress analysis of marine structures Ship Structure Committee. 1991. URL: <https://www.researchgate.net/publication/235033275> (дата обращения: 17.03.2017).
25. Wheeler, O. E. (1972). Spectrum Loading and Crack Growth. *Journal of Basic Engineering*, 94, 181-186.
26. Chang, J.B., Engle, R.M., Szamossi, M. An improved methodology for predicting random spectrum load interaction effects on fatigue crack growth (Proceedings of the 5th Int. Conf. of Fracture). NY, 1981. 2615-2623.
27. Finney, J.M. (1989). Sensitivity of fatigue crack growth prediction (using Wheeler retardation) to Data Representation. *Journal of Testing and Evaluation*, 17(2), 75-81.
28. Sheu, B.C., Song, P.S., Hwang, S. (1995). Shaping exponent in Wheeler model under a single overload. *Engineering Fracture Mechanics*, 51(1), 135-143.
29. Meggiolaro, M.A., Pinho de Castro, J.T. Comparing overload-induced retardation models on fatigue crack propagation (Proceedings of the 56th Congresso Anual da ABM). Belo Horizonte, 2001. 1719-1729.
30. Yuen, B.K.C., Taheri, F. (2006). Proposed modifications to the Wheeler retardation model for multiple overloading fatigue life prediction. *International Journal of Fatigue*, 28(12), 1803–1819.
31. Xiaoping, H., Moan, T., Weicheng, C. (2008). An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 30, 2-10.
32. Machniewicz, T. (2012). Fatigue crack growth prediction models for metallic materials. Part I: Overview of prediction concepts. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 36(4), 293-307.

References

1. Adoption of the international goal based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers resolution MSC.287 (87). IMO, 2010. URL: <http://www.imo.org> (date of treatment: 29.03.2017).
2. Korotkin Y.I., Rabinovich O.N., Rostovzev D.M. *Volnovye nagruzki korpusa sudna*. L.: Sudostroenie, 1987. 235 s.
3. **Chigumov S.D. *Osnovy dinamiki sudov na volnenii. Komsomolsk-na-Amure: «KnAGTU», 2010. 110 s.***
4. Vasilyev K.P. *Chto dolgen znat sudovoditel o kartah pogody I sostoyaniya morya*. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 231s.
5. Davidan I.N., Lopatuhin L.I., Rogkov V.A. i dr. *Vetrovoe volnenie kak veroyatnostnyi gidrodinamicheskii process*. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 287 s.
6. Titov L.F. *Vetrovye volny*. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 293 s.
7. Carter D.J.T. Estimation of wave spectra from wave height and period. I.O.S. Report № 135. Wormley: Institute of oceanographic sciences, 1982. 20 p.
8. Naithani, R., Deo, M.C. (2005). Estimation of wave spectral shapes using ANN. *Advances in Engineering Software*, 36(11-12), 750-756.
9. Cahill, B., Lewis, T. (2014). Wave period ratios and the calculation of wave power (Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium). Seattle, 10.
10. *Spravochnye dannye po regimu vetra I volneniya Barenceva, Ohotskogo I Kaspiyskogo morey*. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 2003. 214 s.
11. *Spravochnye dannye po regimu vetra I volneniya Yaponskogo I Karskogo morey*. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 2009. 356 s.
12. *Spravochnye dannye po regimu vetra I volneniya Baltiyskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo I Sredizemnogo morey*. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 2006. 452 s.
13. *Spravochnye dannye po regimu vetra I volneniya Beringova I Belogo morey*. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 2010. 566 s.
14. *Nagruzki I vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya*. SP 38.13330.2012. M.: Rosstandart, 2012. 116 s.
15. Mao, W., Ringsberg, J.W. Analysis of fatigue crack initiation and propagation in ship structures (Proceedings of 13th International Conference on Fracture). Beijing, China, 2013. 10.
16. *Razrabotka teoreticheskikh osnov I metodologii kompleksnogo normirovaniya morehodnosti s uchedom prochnosti morskikh sudov: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tehnikeskikh nauk: 05.08.01: zaschislena 08.06.10/ Kuteynikov Mihail Anatolyevich*. SPb, 2010. 220 s.
17. Schütz, W., Klätschke, H., Hück, M., Sonsino, C. M. (1990). Standardized load sequence for offshore structures-WASH I. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 13(1), 15–29.
18. Yasumitsu, T., Masaaki, M., Hiroshi, K. (1995). Fatigue crack growth behavior under random loading model simulating real encountered wave condition. *Marine Structure*, 8(4), 407–422.
19. Kawabe, H., Oka, S., Oka, M. (2003). The study of storm loading simulation model for fatigue strength assessment of ship structural members. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 93, 39-47.
20. Li, S., Cui, W. (2011). On generation of standardized load time histories and standardized load spectra. *Journal of Ship Mechanics*, 15, 1405–1415.
21. Li, S., Cui, W. (2013). Generation and application of a standardized load-time history to critical ship structural details. *Ships and Offshore Structures*, 9(4), 365–379.

22. Li, S., Cui, W. (2015). Generation and application of a standardized load-time history to tubular T-joints in offshore platforms. *China Ocean Engineering*, 29(5), 633–648.
23. Johannesson, P. (2006). Extrapolation of load histories and spectra. *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, 29(3), 209–217.
24. Nikolaidis, E., Kaplan, P. Uncertainties in stress analysis of marine structures Ship Structure Committee. 1991. URL: <https://www.researchgate.net/publication/235033275> (дата обращения: 17.03.2017).
25. Wheeler, O. E. (1972). Spectrum Loading and Crack Growth. *Journal of Basic Engineering*, 94, 181-186.
26. Chang, J.B., Engle, R.M., Szamossi, M. An improved methodology for predicting random spectrum load interaction effects on fatigue crack growth (Proceedings of the 5th Int. Conf. of Fracture). NY, 1981. 2615-2623.
27. Finney, J.M. (1989). Sensitivity of fatigue crack growth prediction (using Wheeler retardation) to Data Representation. *Journal of Testing and Evaluation*, 17(2), 75-81.
28. Sheu, B.C., Song, P.S., Hwang, S. (1995). Shaping exponent in Wheeler model under a single overload. *Engineering Fracture Mechanics*, 51(1), 135-143.
29. Meggiolaro, M.A., Pinho de Castro, J.T. Comparing overload-induced retardation models on fatigue crack propagation (Proceedings of the 56th Congresso Anual da ABM). Belo Horizonte, 2001. 1719-1729.
30. Yuen, B.K.C., Taheri, F. (2006). Proposed modifications to the Wheeler retardation model for multiple overloading fatigue life prediction. *International Journal of Fatigue*, 28(12), 1803–1819.
31. Xiaoping, H., Moan, T., Weicheng, C. (2008). An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 30, 2-10.
32. Machniewicz, T. (2012). Fatigue crack growth prediction models for metallic materials. Part I: Overview of prediction concepts. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 36(4), 293-307.

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.9:[681.5.08+622.276]

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОПРЯЖЕННО
ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ ТОПЛИВО-РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ****Зимфир Махмутович Хасанов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики
Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12
e-mail: zimfirm@list.ru

Олег Зимфирович Хасанов

аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств
Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12
e-mail: legnix@mail.ru

Александр Анатольевич Вишнеvский

аспирант кафедры информационно-измерительной техники
Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12
e-mail: host_of_peace@list.ru

Аннотация

В статье рассмотрены возможности и особенности моделирования процессов теплопереноса при исследовании термонапряженного состояния сопряженно деформируемых тел топливо-регулирующей аппаратуры. Показано, что технологические параметры прессования, такие как температура, давление и время, оказывают значительное влияние при создании сопряженно деформируемых металлических тел с композиционным покрытием. Обнаружено, что остаточные температурные напряжения в технологическом процессе формируются главным образом в слое зеркального покрытия; в металлической мембране возникают уравновешивающие их напряжения. что на остаточные термические напряжения в слое нанесенного покрытия влияют как внешние, так и внутренние факторы. Наиболее важным внешним фактором является динамика изменения температуры в приповерхностном слое мембраны в технологическом процессе. Физико-механические свойства мембраны и напыленного покрытия являются внутренним фактором, к ним относятся модуль упругости и коэффициент линейного теплового расширения материалов, используемых в технологическом процессе.

Ключевые слова: топливо-регулирующая аппаратура; композитное покрытие; линейное тепловое расширение; зеркальное покрытие; модуль упругости; процесс теплопереноса; металлическая мембрана; остаточные температурные напряжения.

**MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES OF THE THERMALLY
STRESSED STATE OF CONJUGATED DEFORMABLE BODIES IN FUEL-
CONTROL EQUIPMENT****Zimfir M. Khasanov**

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of electromechanics
Ufa State aviation technical university
K.Marks, 12, Ufa 450000, Russian Federation
e-mail: zimfirm@list.ru

Oleg Z. Khasanov

graduate student of department of automation of technological processes and productions
Ufa State aviation technical university
K.Marks, 12, Ufa 450000, Russian Federation
e-mail: legnix@mail.ru

Aleksandr A. Vishnevskiy

graduate student of department of information measuring technics
Ufa State aviation technical university
K.Marks, 12, Ufa 450000, Russian Federation
e-mail: host_of_peace@list.ru

Abstract

The article reviews the capabilities and particularities of the modeling of heat transfer processes of the thermally stressed state of conjugated deformable bodies in fuel-control equipment. It is shown that the technological parameters of pressing such as temperature, pressure and time, have a significant influence when creating conjugated deformable metal bodies with a composite coating. It is found that during the technological process the residual temperature stresses are formed mainly in the mirror coating layer; while in the metal membrane, the balancing stresses are appeared. that the residual thermal stresses in the deposited coating layer are influenced by both external and internal factors. The most important external factor is the dynamics of temperature changes in the subsurface layer of the membrane during the technological process. The physical and mechanical properties of the membrane and the thermal evaporated coating, particularly the Young's modulus and the linear thermal expansion coefficient of the materials used in the technological process, are among the internal factors.

Key words: fuel-control equipment; composite coating; temperature linear expansion; mirror coating; modulus of elasticity; heat transfer process; metal membrane; residual thermal stresses.

Introduction

The constant enhancement of internal combustion engines substantially increases the heat flows intensity and significantly extends the temperatures range, at which mechanisms and structures are to work, causing an adverse effect on the mechanical properties of materials. For the engine control unit to establish the correct ratio of fuel and air in any mode, it needs an accurate data of the fuel mass and intake air. Thermal stresses and deformations arise during the sudden steep temperature changes on elements of the fuel-control equipment, which causes large errors in the engine management. This has to be dealt with in aircraft, space and rocket engines, nuclear power and other energy complexes [1].

Most of the fuel-control equipment (FCE) elements of are surface-conjugated deformable bodies. The interaction of these deformed bodies depends on a large number of interrelated parameters. The small size of the force interaction spots localized on the actual interface surface is the cause of high pressures, fluctuations in thermal stresses and deformations, and the presence of destruction areas. The influence of high sliding speed in the pair of contacting bodies leads to the accumulation and scattering of thermal energy, along with a significant change in the structural, phase state, and physical and mechanical characteristics of the conjugated materials.

1. Mathematical aspects of heat transfer process modeling

In [2], a mathematical model and a calculating method for unsteady nonlinear thermal processes for conjugated deformable bodies are described with all the forces taken into account. The dynamics of the thermally stressed state in conjugated deformable bodies depends on the sliding speed, the specific friction force, and the energy dissipation. In case of high-speed sliding of one or several bodies, intensive

heating of the materials' subsurface layers causes large temperature gradients in the direction perpendicular to the contact surface. The mathematical model allows us to combine the motion laws of the boundary between conjugated deformable bodies with the equations of dynamic thermoelasticity, with taking the influence of the internal heat sources into account.

The technological parameters of pressing such as temperature, pressure and time, have a significant influence when creating conjugated deformable metal bodies with a composite coating. The optimum choice of these parameters is determined by the physical and mechanical characteristics of the material components, their texture characteristics, chemical kinetics of impregnation of conjugated deformable bodies with reinforcing composite fibers' melt, etc. For the numerical modeling of the state of conjugated deformable bodies with a composite coating, the calculating technique for the unsteady thermal non-isothermal stress-strain state has been developed. Heat transfer processes in the conjugated deformable bodies are carried out by thermal conductivity, convective and radiant heat exchange, heat and mass transfer, and heat absorption during materials' phase transformations [3].

Using the approach of separate consideration of a metal body 1 with an outer coating 2 (made of composite materials) and with an internal mirror coating 3 (made of zirconium alloy) during tensile and compression deformations the surface layer of a deformable metal body has been represented as a "sandwich" in the form of a curved predetermined band (Fig. 1), and each layer of the "sandwich" has its own physical and mechanical, and temperature properties. Then, temperature stresses occur at any point of this "sandwich" layer:

$$\sigma_{\Theta} = \left[-\delta + \frac{\int_{-x}^{+x} \delta \cdot E \cdot b \cdot dy}{\int_{-x}^{+x} E \cdot b \cdot dy} \right] \cdot E, \quad (1)$$

and its changes in any i-layer of the body are determined as follows:

$$\sigma_{\Theta i} = -\delta_m + \frac{\delta_1 \cdot E_1 \cdot b_1 + \delta_2 \cdot E_2 \cdot b_2 + \dots + \delta_i \cdot E_i \cdot b_i}{E_1 \cdot b_1 + E_2 \cdot b_2 + \dots + E_i \cdot b_i}, \quad (2)$$

here δ – relative temperature linear expansion; E – the Young's modulus of the layer; $\delta_i = \alpha_i t_i$; α_i – linear thermal expansion coefficient of the i - layer; t_i – temperature of this layer; b_i - the layer width.

In the technological processes of zirconium alloy mirror coating on a metal membrane, the temperature stresses in the mirror coating are determined as follows:

$$\sigma_{\Theta(mc)} = \frac{(\alpha_{mm} - \alpha_{mc}) E_{mm} \cdot S_{mm} \cdot E_{mc} \cdot \Delta t}{E_{mm} \cdot S_{mm} + E_{mc} \cdot S_{mc}}, \quad (3)$$

and the temperature stresses in the metal membrane in the coating area are determined by the ratio

$$\sigma_{\Theta(mm)} = \frac{(\alpha_{mc} - \alpha_{mm}) E_{mc} \cdot S_{mc} \cdot E_{mm} \cdot \Delta t}{E_{mm} \cdot S_{mm} + E_{mc} \cdot S_{mc}}, \quad (4)$$

where α_{mm} , $\alpha_{3\Pi}$ – linear thermal expansion coefficients of the metal membrane and the mirror coating, E_{mm} , $E_{3\Pi}$ – the Young's modulus of the membrane and the mirror coating, S_{mm} , $S_{3\Pi}$ – cross-section areas of the membrane and the mirror coating, Δt – duration of the layer coating process.

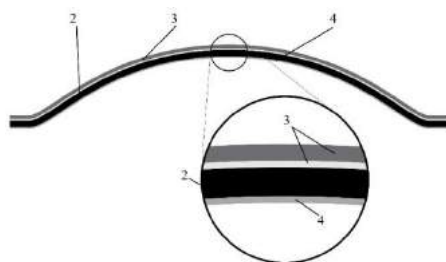


Fig. 1. Diagram of metal membrane section a with an outer coating of composite materials and an internal mirror coating of zirconium alloy

For the calculation of residual technological temperature stresses, let us make the following assumptions: during the mirror coating process the materials do not harden and do not change their initial physical and mechanical properties, and the distribution of elastic temperature stresses is not affected by plastic deformation.

Next, let us determine the residual temperature

stresses during the technological processes of the zirconium alloy depositing on the metal membrane. For this, we divide the numerator and denominator in

(3) by S_{mm} and assume $S_{3\Pi}/S_{mm} \rightarrow 0$ (because of smallness $S_{3\Pi}$ compared with S_{mm}). When the transition of a particular linear state to a plane stress one, the Young's modulus must be increased by $1/(1-\mu)$ times, where μ is the Poisson's ratio of the zirconium alloy mirror coating material. Then, the residual temperature stresses in the technological processes of the zirconium alloy deposition will be determined as follows

$$\sigma_{\Theta(mc)} = -(\alpha_{mm} - \alpha_{mc}) \frac{E_{mc}}{1-\mu} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

here Δt is substituted with a plus sign while the mirror coating deposition, and with a minus sign while the technological processes of cooling.

Let us assume, E_{mc} , E_{mm} , α_{mm} , and α_{mc} are the constant values for the entire cross-section both of the mirror coating and the metal membrane, but different for the coating and the membrane. Then, neglecting the momentum occurred and the temperature gradient over the thickness of the metal membrane with a mirror coating, we can write a formula for evaluation the temperature stresses in a membrane with the i-coating layer

$$\sigma'_{\Theta(mc)} = (\alpha_{mm}^T - \alpha_{mc}^T) \frac{E_{mc} \cdot E_{mm} \cdot h}{E_{mm} \cdot h + E_{mc} \cdot H} \cdot \frac{T_i - T_{mc}}{(1-\mu)}, \quad (6)$$

where α_{mm}^T and α_{mc}^T are the thermal expansion coefficients of the metal membrane and mirror coating; T_i - temperature in the layer at the plasma coating, T_{mc} - temperature of the medium when cooling; H - thickness of the membrane; h - the thickness of the mirror coating layer.

For practical purposes, $h/H \rightarrow 0$, therefore, residual thermal stresses in the deposited mirror coating are determined as follows

$$\sigma'_{\Theta(mc)} = (\alpha_{mm}^T - \alpha_{mc}^T) \cdot E_{mc} \cdot \frac{T_i - T_{mc}}{1-\mu}, \quad (7)$$

Let us find the residual temperature stresses in the areas of the mirror coating thermal evaporation on the metal membrane, for this, we divide the numerator and denominator in expression (4) by $S_{3\Pi}$, then

$$\sigma_{\Theta(mm)} = \frac{(\alpha_{mc} - \alpha_{mm}) E_{mc} \cdot S_{mc} / S_{mm}}{E_{mm} \cdot S_{mm} / S_{mm} + E_{mc} \cdot S_{mc} / S_{mm}} \cdot E_{mm} \cdot \Delta t \rightarrow 0, \quad (8)$$

which means during the technological process of

thermal evaporation on the metal membrane surface, the residual temperature stresses are negligible and can be ignored.

After the completion of the thermal evaporation processes, the metal membrane undergoes heat treatment, leading to residual tensile stresses in the layer of the deposited coating, which, according to Hencky's theorem [4], can be found as follows

$$\sigma_{res(mc)} = \frac{1}{2} \alpha_{mc}^T \cdot E_{mc} \cdot \frac{T_i - T_{me}}{1 - \mu} - \sigma_T^{mc} \quad (9)$$

where σ_T^{mc} is the yield point of mirror coating material.

Then, after simple transformations, the total residual stresses in the deposited coating layer are determined by the formula

$$\sigma_{res(mc)}^\Sigma = (1,5 \alpha_{mc}^T - \alpha_{mm}^T) \cdot E_{mc} \cdot \frac{T_i - T_{me}}{1 - \mu} - \sigma_T^{mc} \quad (10)$$

From the aforesaid, it can be concluded that the residual thermal stresses in the deposited coating layer are influenced by both external and internal factors. The most important external factor is the dynamics of temperature changes in the subsurface layer of the membrane during the technological process. The physical and mechanical properties of the membrane and the thermal evaporated coating, particularly the Young's modulus and the linear thermal expansion coefficient of the materials used in the technological process, are among the internal factors.

2. Graphical representation of residual temperature stresses

During the technological process the residual temperature stresses are formed mainly in the mirror coating layer; while in the metal membrane, the balancing stresses are appeared. For specific ratios of the values of external and internal factors, the residual temperature stresses can change not only the value, but also its sign (either tensile or compressive).

The increase in the absolute value of the residual thermal stresses is caused by a number of factors such as the decrease in the yield point of the mirror coating material, the increase in its Young's modulus, the difference between the values of the linear expansion coefficients of the metal membrane and the mirror coating materials, and the increase in the temperature changing of the subsurface layer.

The distribution of residual temperature stresses in the subsurface layer is due to the distribution of the temperature changing in this layer, the thickness of the coating layer, etc.

Numerical implementation of the developed mathematical models was carried out by an additive one-dimensional scheme. In such a scheme, the flow of a multidimensional physical process at the each

time step is represented as the result of a sequential implementation of the corresponding one-dimensional processes, each of which starts from the distribution of the temperature field that occurs on completing of the previous one-dimensional process. One-dimensional differential equations along the x, y, and z axes are approximated on the nonuniform four-point grid, completely implicit two-tiered one-step scheme. The boundary conditions for the temperature at the inner and outer surfaces, as well as at the interfaces between the materials, are replaced by their finite difference analogs according to a scheme that has an approximation order no less than in the internal nodes of the grid.

Fig. 2 ÷ 3 show the calculation results for residual stresses in the zirconium alloy mirror coating on a metal membrane. The metal membrane is made of steel KH12N2VMFSh, which has a thermal expansion coefficient of $11 \cdot 10^{-16} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ and the Young's modulus of 200 GPa. As can be seen from the figures, the residual stresses in the coatings become dramatically large (from 600 to 1000 MPa), which can lead to their peeling off.

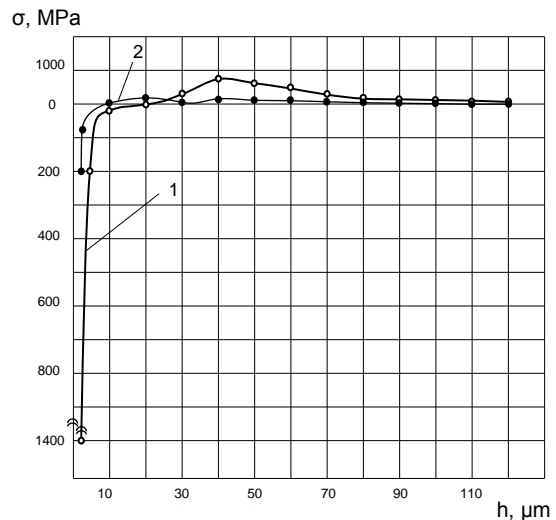


Fig. 2. Diagrams of residual stress in a zirconium-nickel alloy coating.
1 - without high-temperature treatment; 2 - with high temperature treatment

During the additional heat treatment after the mirror coating deposition, due to the temperature gradient further temperature compressive stresses can arise. For example, in the subsurface layers the more heated parts of the coating tend to expand, which is hindered by the deeper and less heated layers. These stresses are summed to the residual stresses that arise in the coating during the heating and cooling stages (Fig. 2). That is, plastic deformation and plastic compression occur in the coating.

Plasma deposition of the zirconium alloy is performed under rather high temperatures (about 400 ... 600 °C). Therefore, when cooling, the residual temperature stresses occur. These stresses are determined from equation (5), which taking into

account the sign in $\pm \Delta t = T_i - T_{cp}$ transforms to

$$\sigma_{res(mc)}^{\Sigma} = (1,5\alpha_{mc}^T - \alpha_{mm}^T) \cdot E_{mc} \cdot \frac{\pm \Delta t}{1 - \mu} - \sigma_T^{mc}, \quad (11)$$

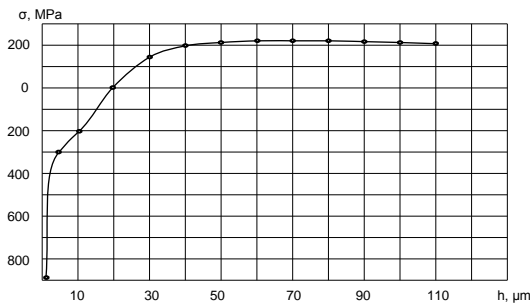


Fig. 3. Diagram of residual stresses in a zirconium-chromium alloy coating.

Conclusion

Software tools and algorithms for heat transfer processes calculating have been developed which allow the derived mathematical models to be used for study of the thermally stressed state of conjugated deformable bodies of fuel-control equipment. Obtaining the solution of the proposed mathematical model and its application in the software packages for the thermal design of the devices being developed can significantly improve the adequacy of modeling and the accuracy of calculations.

Литература

1. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Математическое моделирование высокопористых волокнистых материалов и определение их физических свойств. // Высокая Температура. 2009 В.47. №3. с.438-447.
2. Горелов В.В. Математическое моделирование физических феноменов. – Омск. – 2001. – с.287.
3. Шевчук В.А. Моделирование и расчет теплопереноса в системе тело многослойное покрытие // MIF 2004: Труды V Минского международного форума по теплообмену. - Минск: ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004.-С. 305-314.
4. Клименко А.С., Ситенок Н.А., Коваль Ю.Д. Аналитическое решение задачи теплопроводности в ограниченной многослойной области с локальным объемным источником в слое. – ИФЖ, 1978, т. 35, № 2, с. 352-356.
5. Коляно Ю.М., Хомякевич Н.Е. Обобщенная теплопроводность в телах с покрытиями, учитывающая кривизну покрытия. – ИФЖ, 1993, т. 65, № 6, с.745-749.

References

1. Alifanov O.M., Cherepanov V.V. (2009). Mathematical simulation of High-Porosity Fibrous Materials and Determination of Their Physical Properties. High Temperature, V.47, №3, pp.438-447.
2. Gorelov V.V. (2001) Mathematical Modeling of Physical Phenomena.. Omsk. p.287.
3. Shevchuk V.A. (2004) Modeling and Calculation of Heat Transfer in the System Body Multilayer Coating. MIF 2004: Proceedings of the V Minsk International Heat and Mass Transfer Forum [Modelirovanie i raschet teploperenosa v sisteme telo mnogoslojnoe pokrytie // MIF 2004: Trudy V Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu]. Minsk: State scientific institution "A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus" National Academy of Sciences of Belarus, pp.305-314.
4. Klimenko A.S, Sitenok N.A, Koval Yu.D. (1978) Analytical Solution of the Heat Conductivity Problem in a Bounded Multilayer Region with a Local Bulk Source in a Layer [Analiticheskoe reshenie zadachi teploprovodnosti v ogranichennoj mnogoslojnoj oblasti s lokal'nym ob'yomnym istochnikom v sloe]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 35, No. 2, pp.352-356.
5. Kolyano Yu.M., Khomyakevich N.E. (1993) Generalized Thermal Conductivity in Bodies with Coatings, Considering the Coating Curvature. Journal of Engineering Physics and Thermophysics [Obobshchennaya teploprovodnost' v telah s pokrytiami, uchityvayushchaya kriviznu pokrytiya], vol. 65, No. 6, pp.745-749.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 629.12.014

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ****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

Марин Любенов Маринов

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

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
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, дом 5,
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Сергей Николаевич Турусов

доктор технических наук, профессор, генеральный директор
АО «ВНИТИ ЭМ», 196105, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 2
тел *(812)369-93-61, e-mail: office@vnitiem.ru

Аннотация

Создание системы управления движением (СУД) судов на подводных крыльях (СПК) должно опираться на исчерпывающую информацию о проектируемом объекте в целом. Однако, как правило, на этапах разработки судна, предваряющих проектирование СУД, никаких исследований объекта в интересах разработки СУД, не проводится. В то же время особая актуальность подобных исследований характерна при проектировании объектов со сложной динамикой - СУД для СПК - с большим количеством исполнительных органов, подверженных действию интенсивных волновых возмущений. Применение методов теории планирования эксперимента при решении поставленной задачи сталкивается с трудностями, вызванными дефицитом информации, необходимой для получения адекватной модели исследуемого объекта.

Предлагается решать сформулированную проблему посредством перехода от исходной нелинейной динамической модели к линейной регрессионной, адекватной объекту по информационным и физическим характеристикам. При этом реализуется алгоритм логического пошагового принятия решений на каждом этапе обработки данных с выделением существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования системы управления.

Разработана методика определения ключевых факторов управления. Выполнена оценка эффективности исполнительных органов с целью выбора для каждого из них совокупности управляемых фазовых координат. Определён состав и рассчитана эффективность исполнительных органов. Проведён анализ взаимного влияния фазовых координат. Разработан порядок взаимодействия исполнительных органов для оптимального управления. Предложен алгоритм исследования системы управления движением судна. Основу алгоритма составляет обработка результатов испытаний самоходной модели судна (или результатов натурных испытаний) методами корреляционного и линейного регрессионного анализа. Проведено исследование особенностей управления движением самоходной модели судна на подводных крыльях. Выполнена оценка функционирования системы управления движением.

Полученные результаты могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием систем управления движением скоростных судов.

Ключевые слова: время задержки, корреляционный анализ, линейная регрессионная модель, модельные испытания, натурные испытания, собственные частоты, судно на подводных крыльях, теория планирования эксперимента.

THE STUDY OF THE ALGORITHMIC STRUCTURE OF THE SYSTEM MOTION CONTROL OF HYDROFOIL

Valery Y. Kaminsky

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

Marin L. Marinov

Candidate of Engineering Sciences, leading researcher
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13
phone.: (812) 321-95-68, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Dmitriy A. Skorokhodov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher Officer
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13

Professor of Department,
Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,
Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376
phone: +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Sergey N. Turusov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, general director
SC «VNITI EM», 196105, St. Petersburg, Blagodatnaya Str., h. 2
Tel. (812) 369-93-61, e-mail: office@vnitiem.ru

Abstract

The creation of the motion control system (MCS) of the hydrofoils should be based on comprehensive information about the designed object as a whole. However, as a rule, in the design stages of the ship prior to the design of the MCS, no research object in the development of the MCS, is not carried out. At the same time, the particular relevance of such studies is typical in the design of objects with complex dynamics - the MCS for the hydrofoils - with a large number of the Executive management bodies, exposed to intensive wave disturbance. The application of the methods of the experiment planning theory in the solution of the tasks facing difficulties caused by the lack of information needed to obtain an adequate model of the object.

It is proposed to solve the formulated problem by moving from the original nonlinear dynamic model for linear regression, the adequate object information and physical characteristics. In this case, the algorithm is implemented step-by-step logical decision-making at each stage of processing, highlighting significant factors that affect the indicators of quality of functioning of the control system.

The technique of determining the key factors of management. Estimation of efficiency of Executive bodies to select for each of them collectively driven the phase coordinates. The composition and the calculated efficiency of the Executive bodies. The analysis of the mutual influence of the phase coordinates. Developed the procedure of interaction of Executive bodies for optimal control. The algorithm of research of motion control system of the ship. The basis of the algorithm is the processing of test results self-propelled model of the ship (or field test results) by correlation and linear regression analysis. The study of motion control self-propelled model of the hydrofoil. Assessment of the functioning of the motion control system. The obtained results can be used by organizations involved in design of motion control system high-speed craft.

Key words: the delay time, correlation analysis, linear regression model, model tests, field tests, natural frequencies, hydrofoil, theory of experiment planning.

Введение

Практика, сложившаяся в судостроительной отрасли отводит разработке системы управления движением (СУД) судна на подводных крыльях (СПК) место в ряду контрагентских работ,

которые проводятся параллельно с рабочим проектированием судна. К началу разработке СУД практически все принципиальные технические вопросы решены, а особенности судна достаточно хорошо изучены. Не касаясь эффективности и целесообразности

сложившейся практики, отметим, что разработчик СУД должен обладать полной информацией о проектируемом объекте любой сложности. Однако, как правило, на этапах разработки судна, предваряющих проектирование СУД, никаких исследований объекта в интересах разработки СУД, не проводится [1-5]. В то же время особая актуальность подобных исследований характерна при проектировании объектов со сложной динамикой - СУД для СПК - с большим количеством исполнительных органов (ИО), подверженных действию интенсивных волновых возмущений.

Известно, что при анализе проектируемых СПК используются методы статистической обработки результатов испытаний самоходной модели. Ценность статистической обработки, как инструмента оценки качества процесса управления, неоспорима, однако, в то же время очевидна и ограниченность статистических методов, не направленных на формирование алгоритмов управления движением.

Дополнительные возможности при разработке СУД обеспечивает теория планирования эксперимента, которая может быть использована не только при испытаниях самоходных моделей, но и при математическом моделировании систем управления движением в рамках технического и рабочего проектирования. Известными направлениями использования методов планирования эксперимента в области создания систем управления являются [6 - 8]:

- ранжирование факторов, воздействующих на объект, с целью выявления основных, влияющих на качество его функционирования (в роли факторов могут выступать параметры объекта, а так же управляющие или возмущающие воздействия);

- составление приближенных моделей исследуемого объекта, выраженных аналитическими зависимостями показателей качества его функционирования от вышеуказанных факторов;

- определение оптимальных параметров объекта с учетом ограничений, накладываемых на значения некоторых показателей качества, в пределах допустимого диапазона изменения этих параметров.

Однако применение методов теории планирования эксперимента сталкивается с трудностями, вызванными дефицитом информации, необходимой для получения адекватной модели исследуемого объекта. Как правило, в большинстве случаев обработка данных натурных и модельных испытаний СПК проводится в условиях информационной неопределенности, связанной либо с недостаточным объемом данных по отдельным параметрам или режимам, либо с полным их отсутствием. Такое положение приводит к тому, что попытки формального использования известных статистических методов регрессионного анализа, особенно полиномиальной регрессии, заканчиваются

неудачей из-за дефицита информации о виде и структуре исследуемой модели, неоднородности данных, изменчивости закономерностей функционирования объекта, высокой (более десяти факторов) размерности задачи.

1. Постановка задачи синтеза алгоритмической структуры

Предлагается решать сформулированную проблему посредством перехода от исходной нелинейной динамической модели к линейной регрессионной, адекватной объекту по информационным и физическим характеристикам. При этом реализуется алгоритм логического пошагового принятия решений на каждом этапе обработки данных с выделением факторов, существенно влияющих на показатели качества функционирования системы управления. Выявление существенных факторов проводится с помощью использования статистических методов регрессионного пошагового логического анализа. В результате сужения факторного множества задача исследования упрощается, определяется структура моделей, а так же факторы, подлежащие оптимизации. Окончательный выбор алгоритмической структуры СУД может проходить на основе статистических критериев, учитывающих физические представления об источниках рассеяния в наблюдениях по данной модели.

Методика анализа СУД СПК, включает в себя ряд последовательных этапов.

1. Проведение крупномасштабных испытаний самоходной модели СПК по специальной программе и получение экспериментальных данных (ЭД) путем регистрации значений фазовых координат объекта и положений его исполнительных органов. Данные фиксируются для различных законов управления и для всех основных режимов движения.

2. Обработка экспериментальных данных, включающая:

- предварительную обработку (редактирование, пересчет экспериментальных данных по данным тарировочных зависимостей, устранение ложных выбросов, сглаживание, фильтрация);

- первичную статистическую обработку (расчет математических ожиданий, средних квадратических отклонений и дисперсий);

- корреляционный анализ (качественная оценка взаимодействия между отдельными составляющими данных: исследование эффективности и взаимодействия исполнительных органов, исследование управляемости и взаимного влияния фазовых координат);

- пошаговый множественный регрессионный анализ (количественная оценка взаимодействия составляющих экспериментальных данных);

- определение времен задержки;

- определение собственных частот (проверка - подтверждение или опровержение - результатов, полученных на этапах корреляционного и регрессионного анализов).

3. Анализ результатов обработки экспериментальных данных, заключающийся в отражении как качественной, так и количественной сторон взаимодействия всех составляющих совокупности ЭД, выявления существенных взаимосвязей для определения:

- эффективности исполнительных органов;
- управляемости фазовых координат;
- взаимного влияния фазовых координат.

2. Условия проведения модельных и натуральных испытаний объекта

Целью этапа проведения испытаний объекта является получение экспериментальных данных, предназначенных для последующей обработки. В результате испытаний должна быть получена информация, удовлетворяющая следующим требованиям:

- экспериментальные данные должны быть получены на основных режимах движения судна, при разных законах управления, гидрометеорологических условиях и курсовых углах в отношении к распространению волн;

- совокупность ЭД должна включать запись значений всех фазовых координат объекта и положений его исполнительных органов (ИО), необходимых для построения векторов состояния и управления, а также, при необходимости, прочие существенные параметры, характеризующие особенности процесса движения;

- должна быть обеспечена синхронность регистрации всех составляющих экспериментальных данных в одном режиме;

- длительность регистрации экспериментальных данных должна удовлетворять условиям стационарности. Длительность регистрации в одном режиме должна быть не менее 15 мин, как того требует опыт регистрации процессов движения на волнении (принцип "ста волн"), а при исследовании нелинейных объектов для учета влияния нелинейных эффектов потребная длительность увеличивается до 25-30 мин.

- совокупность экспериментальных данных должна удовлетворять требованиям однородности, как с метрологической точки зрения, так и с точки зрения тождественности внешних возмущающих воздействий.

3. Предварительная обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных является основной формализованной составной частью методики синтеза СУД СПК.

Предварительная обработка включает в себя подготовку и преобразование экспериментальных данных (ЭД) для последующей обработки. Здесь закладывается

основа для обеспечения заданной точности последующих расчетов.

Этап предварительной обработки включает [9,10]:

- идентификацию и редактирование данных (определение начала и конца каждой компоненты экспериментальных данных, их объема, длительности и времени дискретизации, исходя из требуемой точности последующей обработки);

- приведение ординат каждой составляющей ЭД к значениям соответствующих физических величин по условиям тарировочных зависимостей;

- устранение ложных выбросов путем выявления "аномально" выделяющихся ординат, возникающих вследствие технического несовершенства измерительной или регистрирующей аппаратуры. Сглаживание выбросов можно провести вручную, приведя ординату выброса в логическое соответствие с соседними ординатами. Линейный тренд в составляющих ЭД устраняется методом среднего наклона, а полиномиальный тренд более высокого порядка исключается методом наименьших квадратов;

- фильтрация составляющих ЭД выполняется для исключения погрешности измерительной или регистрирующей аппаратуры при сглаживании процесса, выделения составляющих в отдельных частотных диапазонах. Алгоритм фильтрации состоит в сегментации исходной информации на выборки определенной длины и свертки этих выборок в частотной области с фильтрующей функцией той же длины;

- вычисление первых и вторых производных отдельных составляющих данных экспериментов;

- интегрирование предварительно центрированных составляющих ЭД.

Первичная статистическая обработка данных, которая проводится для оценки качества стабилизации фазовых координат и загрузки ИО, включает вычисление [11]:

- математических ожиданий - $\tilde{M}y_i$;

- дисперсий - $\tilde{D}y_i$;

- средних квадратичных отклонений - y_i .

Здесь y_i есть -я составляющая экспериментальных данных.

4. Анализ законов управления на основе результатов испытаний

Целью анализа ЭД является решение следующих четырех физических задач.

1. Оценка эффективности исполнительных органов для:

- выбора по каждому ИО совокупности управляемых фазовых координат (ФК);
- расчёта эффективности ИО по управлению ФК.

2. Определение управляемости ФК для:
 - выбора по каждой ФК совокупности управляющих ИО;
 - оценки управляемости ФК с помощью ИО.
3. Расчёт взаимного влияния ФК для:
 - выбора совокупности взаимовлияющих координат;
 - оценки глубины взаимного влияния ФК.
4. Оценка взаимодействия ИО для:
 - выбора совокупности взаимодействующих исполнительных органов;
 - расчёта глубины взаимодействия ИО.

Исследовались характеристики испытаний большой самоходной модели СПК с глубоко погруженными крыльевыми комплексами (ГПК). Испытания проводились при волнении моря 3 балла, высоте волны 1 м и скорости ветра 5 м/с.

Большая самоходная модель СПК представляет собой судно с крыльевым комплексом, построенным по схеме "утка". Крыльевой комплекс модели включает одностоечное носовое крыльевое устройство (НКУ) с двумя управляемыми закрылками на крыле и одним - на стойке (руль направления), а так же двухстоечное кормовое крыльевое устройство (ККУ) с четырьмя управляемыми закрылками – (два внутренних закрылка и два наружных).

Регистрировались следующие параметры: отклонения закрылков носовых - правого ($\delta_{нп}$) и левого - ($\delta_{нл}$), кормовых внутренних закрылков – правого – ($\delta_{квп}$) и левого - ($\delta_{квл}$), заглубление (h) носового крыла, скорость (v) судна и его дифферент - (ψ), отклонение закрылков кормовых наружных - правого ($\delta_{кнп}$) и левого - ($\delta_{кнл}$), отклонение руля направления (δ_p), скорость рыскания - ($\dot{\varphi}$) и крен - (θ) судна.

Установлены следующие режимы и соответствующие им законы управления.

Продольное движение

Закон А: $\delta_{нп} = \delta_{нл} = 1,5 h - 2,0 \psi - 2,4 \dot{\psi}$;

$(\delta_{кнп}) = (\delta_{кнл}) = 3,0 \psi + 1,4 \dot{\psi}$.

Закон Б: $\delta_{нп} = \delta_{нл} = 15,0 h + 5,0 \dot{h} - 3,6 \dot{\psi}$;

$(\delta_{кнп}) = (\delta_{кнл}) = 20,0 h + 6,6 \dot{h} + 0,5 \dot{\psi}$.

Боковое движение

Законы А, Б:

$\delta_p = - 6,0 \psi - 1,7 \dot{\psi}$;

$\delta_{кн} = 3,0 \theta + 1,1 \dot{\theta}$.

Исследовались режимы с различными комбинациями законов управления А и Б. Перечисленных выше осциллографируемых параметров явно недостаточно для построения вектора состояния пространственного движения СПК. Это обстоятельство потребовало введения следующих допущений.

1. Высота центра тяжести СПК над поверхностью воды заменяется близким по технической сути, а в ряде случаев и более информативным параметром h - заглублением НКУ.

2. Значения угла рыскания φ вычислялись интегрированием величин угловой скорости рыскания $\dot{\varphi}$.

3. Скорости изменения заглубления НКУ (\dot{h}), угловые скорости крена ($\dot{\theta}$) и дифферента ($\dot{\psi}$) определяются дифференцированием соответствующих функций.

4. Текущие значения углов атаки (α) и дрейфа (β) не регистрировались вследствие больших технических трудностей.

Приняв допущения 1 - 4, вектор состояния СПК представляется в виде, достаточном для построения вектора управления регистрируемых параметров:

$$X = [\varphi, \dot{\varphi}, h, \dot{h}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, v]^T \quad (1)$$

Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы.

1. Оценки средних значений угловых скоростей рыскания, крена и дифферента близки к нулю, что определяет удовлетворительное качество измерений и корректность метода обработки данных.

2. Для судов данного класса максимальное значение угла рыскания - $\pm 3^{\circ}$, а максимальное значение углов крена и дифферента - $\pm 2^{\circ}$, что соответствует предельно допустимым значениям среднеквадратичных отклонений указанных параметров $\pm 1^{\circ}$ и $\pm 0,7^{\circ}$. Среднеквадратичные отклонения составляют:

- курса - $\pm 1,91^{\circ}$;
- крена - $\pm 0,39^{\circ}$;
- дифферента - $0,53^{\circ}$.

Качество стабилизации крена и дифферента удовлетворительное, а рыскание почти в 2 раза превышает допустимую величину.

3. Движение на попутных курсовых углах встречи с волной (ПКУВ) по сравнению с движением на встречных курсовых углах – ВКУВ - характеризовалось:

- более низким качеством стабилизации курса, к тому же превышающим допустимые значения;
- худшим качеством стабилизации заглубления НКУ;
- одинаково хорошим качеством стабилизации крена;
- худшим, но при этом удовлетворительным качеством стабилизации дифферента;
- примерно полуторократным увеличением загрузки исполнительных органов (ИО).

4. Средние значения и среднеквадратичные отклонения заглубления НКУ и его скорости изменения при законах управления А и Б одинаковы.

Введение в алгоритм управления носовым закрылком (закон Б) сигнала по скорости

изменения заглупления не повысило качества стабилизации заглупления крыла (высоты движения). Введение в алгоритм управления кормовым внутренним закрылком (закон Б) сигналов по заглуплению крыла и скорости его изменения также не улучшило управления заглуплением (высотой движения).

5. Для встречных и попутных курсовых углов (закон управления Б) получены одинаковые значения среднего дифферента. Это говорит о том, что исключение из законов управления закрылками НКУ и внутренними закрылками ККУ составляющей, учитывающей скорость изменения дифферента, сделало систему управления движением СПК инвариантной по дифференту к изменению КУВ. В целом по п.п. 4 и 5 можно сделать вывод о предпочтительности закона управления Б.

5. Корреляционный анализ результатов испытаний

Инструмент корреляционного анализа [7] в настоящей методике используется для качественной оценки взаимодействия отдельных составляющих экспериментальных данных. Корреляционный анализ включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Формирование матрицы выборочных ковариаций, элементы которой рассчитываются по формуле:

$$cov_{y_i y_j} = \frac{\sum_{l=1}^N (y_{il} - \bar{y}_i) \cdot (y_{jl} - \bar{y}_j) - \sum_{l=1}^N (y_{il} - \bar{y}_i) \cdot (y_{jl} - \bar{y}_j) / N}{N} \quad (2)$$

где: y_{il} и y_{jl} - i -я и j -я составляющие ЭД для одной и той же точки, в момент времени l ; N - число точек дискретизации; $\bar{y}_i = \bar{M}y_i$ - усреднённые значения экспериментальных данных (математическое ожидание), полученные при первичной статистической обработке.

Этап 2. Вычисление коэффициентов корреляции.

$$\rho_{y_i y_j} = \frac{cov_{y_i y_j}}{\sqrt{cov_{y_i y_i}} \sqrt{cov_{y_j y_j}}}, \quad (3)$$

где: $cov_{y_i y_i}$, $cov_{y_j y_j}$ - автоковариации i - й и j - й составляющих ЭД.

Этап 3. Оценка взаимной ковариационной функции $R_{y_i y_j}$.

Этап 4. Выбор факторов и функции отклика, осуществляется следующим образом:

- функция отклика выбирается последовательным перебором всех составляющих ЭД;
- по матрице коэффициентов корреляции

$\| \rho_{y_i y_j} \|$ для каждой составляющей ЭД выбираются подмножества независимых переменных (факторов) по условиям зависимости фактора j

от функции отклика i при $\rho_{y_i y_m} > 0,1$ и независимости факторов l и m между собой в выбранном подмножестве при $\rho_{y_i y_m} < 0,1$. Таким образом, для некоторой функции отклика может существовать несколько подмножеств независимых между собой факторов.

Для решения физических задач установлен порог значимости коэффициентов корреляции равный 0,2. При этом все переменные с меньшим коэффициентом являются слабокоррелированными или независимыми. Переменные с коэффициентом корреляции из диапазона (0,2 - 0,3) - зависимые, а с коэффициентом корреляции большим 0,3 - обусловленные.

Оценка эффективности исполнительных органов (первая задача) обеспечила следующие формулировки:

$$\begin{aligned} \delta_p &= m_1^k \cdot \varphi; \\ \delta_h &= k_1^k \cdot h + k_2^k \cdot \psi + m_2^k \cdot \dot{\psi}; \\ \delta_{кн} &= k_3^k \cdot \dot{\theta} + m_3^k \cdot \theta; \\ \delta_{кв} &= k_4^k \cdot h + k_5^k \cdot \psi + m_4^k \cdot \dot{\psi}, \end{aligned} \quad (4)$$

где:

k_i^k - коэффициенты при обусловленных

параметрах, $i = \overline{1, \infty}$;

m_i^k - коэффициенты при зависимых

параметрах, $i = \overline{1, \infty}$.

Здесь и далее верхний индекс "k" присваивается коэффициентам, полученным при корреляционном анализе.

Анализ зависимостей (4) позволяет заметить следующее.

1. Отклонение руля направления и рыскание коррелированы слабо, особенно на попутных курсовых углах встречи с волной. Вместе с тем, отклонение руля достаточно сильно коррелирует с некоторыми другими фазовыми координатами (в частности, с дифферентом и заглуплением носового крыльевого устройства (НКУ) при встречных курсовых углах). Это характеризует недостаточную эффективность руля направления по управлению курсом.

2. Для управления дифферентом наиболее эффективными ИО являются закрылки НКУ, а для управления креном наиболее эффективны наружные закрылки ККУ. Для управления высотой движения целесообразно использовать внутренние закрылки ККУ.

Определение управляемости ФК (вторая задача) позволило сформировать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= m_1^k \cdot \delta_p; \\ h &= k_1^k \cdot \delta_{кв}; \\ \theta &= m_2^k \cdot \delta_{кн}; \\ \dot{\theta} &= k_3^k \cdot \delta_{кн}; \\ \psi &= k_4^k \cdot \delta_h + k_5^k \cdot \delta_{кв}; \\ \dot{\psi} &= m_3^k \cdot \delta_h + m_4^k \cdot \delta_{кв}. \end{aligned} \quad (5)$$

Проанализируем соотношения (5).

1. Рыскание, скорость изменения заглупления НКУ и скорость судна значимых коэффициентов

корреляции с отклонением ИО не имеют. Т.е. закрылки стойки НКУ, как орган управления курсом, недостаточно эффективны.

2. Общая плохая управляемость судна в основном объясняется сложностью стабилизации его курса на попутном волнении; на встречном волнении коэффициент корреляции рыскания судна с отклонением руля направления значительно больше. Для угловой скорости рыскания наблюдается противоположная зависимость от КУВ.

3. В наибольшей степени изменение заглупления НКУ коррелирует с отклонением внутренних закрылков ККУ, а дифферента - с отклонением наружных закрылков, т.е. для управления высотой движения КПК наиболее эффективным ИО являются внутренние закрылки ККУ, а для управления дифферентом наиболее эффективны закрылки ККУ.

Решение третьей задачи («Расчёт взаимного влияния фазовых координат») позволило сформировать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \varphi &= m_1^k \cdot v; \\ h &= k_1^k \cdot \psi + m_2^k \cdot \dot{\psi} + m_3^k \cdot \theta; \\ \dot{h} &= m_4^k \cdot \dot{\psi}; \\ \theta &= m_5^k \cdot \psi + m_6^k \cdot h; \\ \psi &= k_2^k \cdot h + m_7^k \cdot \theta; \\ \dot{\psi} &= m_8^k \cdot h + m_9^k \cdot \dot{h}; \\ v &= m_{10}^k \cdot \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ формул (6) показал следующее.

Закон управления Б. Скорости изменения заглупления НКУ и дифферента между собой тесно связаны.

Закон управления А сообщает дифференту меньшую взаимосвязь с креном и рысканием. При попутном волнении отсутствуют имеющиеся на встречном волнении естественные для СПК глубокие взаимосвязи заглупления НКУ и дифферента, рыскания и крена. Последняя взаимосвязь отсутствует и в выражениях (6). Это говорит о том, что попутное волнение, особенно в сочетании с *законом управления А*, приводит к более хаотичному взаимному влиянию ФК судна, а среди ФК важнейшей составляющей падения скорости СПК является рыскание.

Анализ взаимодействия ИО позволил выявить существенную зависимость между отклонениями закрылков НКУ и внутренних закрылков ККУ:

$$\delta_{\text{КВ}} = k_1^k \cdot \delta_{\text{Н}}. \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что отклонение закрылков НКУ вносит возмущение в структуру потока жидкости, набегающего на ККУ, изменяя величину подъемной силы кормового крыльцевого устройства.

Наибольшим коэффициентом корреляции характеризуются режимы попутных курсовых углов встречи. Поэтому при алгоритмизации работы внутренних закрылков ККУ следует учитывать влияние на них закрылков НКУ.

6. Пошаговый множественный регрессионный анализ

Анализ используется для выявления количественных характеристик взаимодействия отдельных составляющих ЭД и проводится по следующему алгоритму [11 - 13].

1. Задается функция отклика и подмножество идентифицированных независимых переменных для нее. По желанию экспериментатора подмножество может быть трансформировано.

2. Для выбранного подмножества переменных и функции отклика составляется матрица $\|\rho_{y_i y_j}\|$ коэффициентов корреляции.

3. Для функции отклика и подмножества переменных на каждом шаге регрессии $i = 1, 2, \dots, q$ (где: q - мощность подмножества переменных) вычисляются статистические характеристики с использованием сокращенного метода Дулитла [14].

4. Анализ уравнения регрессии проводится по следующему алгоритму.

а) Вычисляется параметр C_j :

$$C_j = \frac{\text{cov}^2 y_i y_j}{\text{cov} y_j y_j} = \frac{a_{ij}^2}{a_{jj}}, \quad (8)$$

где: a_{jj} - элемент ковариационной матрицы, которая преобразуется на последующих шагах вычислений; y_i - ордината зависимой переменной; j - величина, не равная вычеркнутым независимым переменным, вошедшим в уравнение регрессии перед i -м шагом.

б) для нахождения суммы квадратов, которые будут использованы на i - м шаге, вычисляется соотношение P_i :

$$P_i = S_i / D, \quad (9)$$

где: $S_i = C_{jmax}$; $D = \sum_n (y_i - \bar{y}_j)$; n - число наблюдений; \bar{y}_j - среднее значение ординаты зависимой переменной y_i .

в) оценка существенности вклада каждой переменной, включаемой в уравнение регрессии, производится путем сравнения вычисляемого максимального значения P_i с некоторым задаваемым пороговым значением $P_{\text{п}}$ и, если $P_i \geq P_{\text{п}}$, то вклад отобранной переменной в изменение функции отклика существенен.

г) ограничением на включение переменной y_i в уравнение регрессии является условие $P_i < P_{\text{п}}$; в этом случае последняя переменная не включается в уравнение регрессии, иначе выполняются вычисления:

- накопленной суммы преобразованных квадратов

$$S_{\Sigma} = S_{\Sigma} + S_i; \quad (10)$$

- накопленного преобразованного отношения

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma} + P_i; \quad (11)$$

- коэффициента множественной корреляции

$$\rho = \sqrt{R_{\Sigma}}; \quad (12)$$

- коэффициента множественной корреляции с учетом числа степеней свободы:

$$\rho_c = \sqrt{1 - \frac{(1 - \rho^2)}{(n-1)(n-l)}}, \quad (13)$$

где: l - число переменных, включенных в уравнение регрессии.

Для оценки адекватности полученного уравнения регрессии вычисляется критерий Фишера (F-критерий):

$$F = \frac{S_{\Sigma}(n-l-1)}{(D-S_{\Sigma}) \cdot l}. \quad (14)$$

Вычисляется стандартная ошибка оцененной функции отклика y :

$$S_y = \sqrt{\frac{D-S_{\Sigma}}{n-l-1}}, \quad (15)$$

которая (функция отклика) уточняется с учетом числа степеней свободы:

$$S_c = S_y \sqrt{\frac{n-1}{n-l}}. \quad (16)$$

д) коэффициенты регрессии вычисляются из выражений:

$$\begin{aligned} b_i &= q_{ik}; \\ b_{i-1} &= q_{(i-1)k} - b_i q_{(i-1)k}; \\ b_{i-2} &= q_{(i-2)k} - b_i q_{(i-2)k} - b_{i-1} q_{(i-2)(i-1)k}, \end{aligned} \quad (17)$$

а значения свободного члена

$$b_0 = \bar{y} - \sum_{j=0}^b (b_j y_j), \quad (18)$$

где: $a_{jj} = a_{jj} a_{jj}^2 + a_{ii}$, i - индекс переменной, входящей в уравнение регрессии на i -м шаге; j - индекс переменной, входящей в уравнение регрессии перед i -м шагом;

е) стандартные ошибки коэффициентов регрессии и критерий Стьюдента (t -критерий) вычисляются по формуле:

$$S_{bj} = \sqrt{a_{jj}} \cdot S_k, \quad t_j = b_j / S_{bj}; \quad (19)$$

ж) для перехода к следующему шагу регрессии выполняется преобразование для устранения переменной, входящей на i -м шаге в уравнение регрессии:

$$a_{jl} = a_{jl} - a_{jl} a_{il} b, \quad (20)$$

где: j - индекс, не соответствующий вычеркнутым или уже вошедшим в уравнение регрессии составляющим ЭД; y_i - индекс составляющей ЭД, вошедшей в уравнение регрессии на i -м шаге; l - индекс, не соответствующий вычеркнутым или входящим на i -м шаге в уравнение регрессии составляющим ЭД;

з) выполняется экспертная оценка числа включенных в уравнение регрессии переменных на основе анализа вклада каждой переменной в общий множественный коэффициент корреляции рассматриваемой функции отклика, исходя из условия:

$$|R_{li} - R_{li-1}| \cdot 100\% / R_{li} < 1\%. \quad (21)$$

и) оценка адекватности полученной линейной регрессионной модели проводится путем сравнения экспериментального значения критерия Фишера $F_{\text{экс}}$ с его теоретическим значением $F_{\text{теор}}$ при уровне значимости $\alpha = 5\%$:

$(F_{\text{теор}} < F_{\text{экс}}) \Rightarrow$ модель неадекватна,

$(F_{\text{теор}} > F_{\text{экс}}) \Rightarrow$ модель адекватна.

Пошаговый множественный регрессионный анализ позволяет количественно обосновать вывод о суммарном вкладе всех линейных членов в исследуемую функцию отклика на основе анализа коэффициента множественной корреляции. Оценка существенности вклада каждой переменной позволяет выполнить ранжирование факторов по степени их влияния на функцию отклика путем последовательного анализа вклада каждого фактора рассматриваемого подмножества в коэффициент множественной корреляции. Оценку вклада нелинейных эффектов (парных, квадратичных и т.п. взаимодействий) целесообразно проводить при сочетании высокого коэффициента множественной корреляции (0,5-0,9) с неадекватностью регрессионной модели. При этом регрессионный и корреляционный анализы следует сочетать с анализом времен задержки, собственных частот и корреляционного соотношения:

$$\eta_{yk:yi} = 1 - cov^2 y_k y_j / cov^2 y_k y_k. \quad (22)$$

Причем, если:

- $|\rho_{kj}| \rightarrow 1$, то переменная y_k с переменной y_j связана точной линейной зависимостью, при этом время задержки $\tau_{kj} \rightarrow 0$ как и вклад нелинейных членов - $\eta_{yk:yi} \rightarrow 0$;
- корреляционное соотношение удовлетворяет зависимости $\rho_{kj}^2 < \eta_{yk:yi} \rightarrow 1$, то существует отличная от линейной функциональная зависимость; в этом случае для установления вида и структуры модели с нелинейными взаимодействиями необходимо провести регрессионный анализ с использованием пофакторных ортогональных планов;
- низкий (менее 0,5) коэффициент множественной корреляции сочетается со стремящимся к бесконечности временем задержки рассматриваемых переменных $\tau_{kj} \rightarrow \infty$, то функциональная связь между функцией отклика и рассматриваемыми переменными отсутствует; это является основанием для пересмотра совокупности рассматриваемых параметров.

Порогом значимости при корреляционном анализе взято значение $\beta_{ij} = 0,1$, диапазон $\beta_{ij} = (0,1 - 0,25)$ соответствует значимости процесса j в отклонении параметра i , а $\beta_{ij} \geq 0,25$ свидетельствует о большой значимости параметра j в отклонении параметра i .

Регрессионный анализ проводится путем последовательного решения четырех физических задач.

Решение первой задачи позволяет сформировать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \delta_p &= k_1^p \phi + m_1^p \varphi; \\ \delta_h &= k_2^p \psi + m_2^p h + m_3^p \cdot h; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{кн}} &= k_3^p \theta + k_4^p \varphi; \\ \delta_{\text{кв}} &= k_5^p h + m_4^p \psi, \end{aligned} \quad (23)$$

где:

- k_i^p - коэффициент при большой значимости регрессии свободного члена на параметр при этом коэффициенте, $i = \overline{1, \infty}$;

- m_i^p - коэффициент при значимой регрессии свободного члена на параметр при этом коэффициенте, $i = \overline{1, \infty}$.

Здесь и далее верхний индекс "p" присваивается коэффициентам, полученным при регрессионном анализе.

Анализ полученных зависимостей (23) показал следующее:

1. Практически во всех режимах отмечаются низкие коэффициенты регрессии изменения положения руля направления на рыскание корабля, что в итоге определяет общий незначительный коэффициент регрессии. Т.е. эффективность руля направления (закрылка стойки НКУ) как органа управления курсом недостаточна.

2. Наибольший коэффициент регрессии закрылки НКУ дали на дифферент и, как следствие, наиболее эффективным средством управления дифферентом являются закрылки НКУ.

3. Наибольший коэффициент регрессии наружные закрылки ККУ имеют с креном судна. Наиболее эффективным средством управления креном являются наружные закрылки ККУ.

4. Наибольший коэффициент регрессии внутренние закрылки ККУ имеют с заглуплением НКУ. Т.о., наиболее эффективным средством управления высотой движения корабля являются внутренние закрылки ККУ.

Анализ решения второй задачи позволяет сделать следующие выводы.

1. Значения суммарных коэффициентов регрессии $\sum_{uo} \bar{\beta}$ для рыскания, заглупления НКУ,

крена и дифферента лежат в диапазоне (0,38-0,50). Т.е. курс, высота движения, крен и дифферент управляемы достаточно хорошо.

2. Коэффициент регрессии руля направления на рыскание невелик. Он несколько больше на угловую скорость рыскания. Прослеживается существенная взаимосвязь отклонения наружных закрылков ККУ и рыскания. Это говорит о том, что эффективность руля направления (закрылка стойки НКУ) по управлению курсом недостаточна. Воздействие наружных закрылков ККУ на рыскание проявляется косвенно через крен.

3. Наибольшие коэффициенты регрессии у заглупления НКУ отмечаются с внутренними закрылками ККУ; у крена - с наружными закрылками ККУ, у дифферента - с закрылками НКУ. Т.о. наиболее эффективными средствами

управления высотой движения являются внутренние закрылки ККУ, креном - наружные закрылки ККУ, а дифферентом - закрылки НКУ.

4. Среди ИО наибольший коэффициент регрессии со скоростью имеет руль направления. Это говорит о том, что отклонение руля направления (закрылка стойки НКУ) вызывает наибольшее, по сравнению с другими ИО, падение скорости хода судна, во-первых, вследствие появления дополнительного гидродинамического сопротивления и, во-вторых, из-за неизбежного появления дрейфа при рыскании.

Решение третьей задачи позволяет сформировать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \varphi &= m_1^p \cdot \psi + m_2^p \cdot h; \\ \dot{\varphi} &= m_3^p \cdot \varphi; \\ h &= k_1^p \cdot \varphi; \\ \dot{h} &= m_4^p \cdot \psi; \\ \theta &= m_5^p \cdot \dot{\theta} + m_6^p \cdot \varphi; \\ \dot{\theta} &= m_7^p \cdot \theta; \\ \psi &= m_8^p \cdot \varphi + m_9^p \cdot h; \\ \dot{\psi} &= m_{10}^p \cdot h; \\ v &= k_2^p \cdot \varphi. \end{aligned} \quad (24)$$

Анализ полученных зависимостей (24) показывает следующее:

1. Взаимодействие рыскания с дифферентом и заглуплением НКУ, угловой скорости рыскания и заглупления НКУ с рысканием, скорости изменения заглупления НКУ и угловой скорости дифферента, дифферента с заглуплением НКУ и их скоростей изменения между собой отмечаются лишь на отдельных режимах и регулярного характера не носят. Можно считать отмеченные зависимости случайными (погрешности эксперимента), а выражение (24) преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} \theta &= m_1^p \cdot \varphi; \\ \psi &= m_2^p \cdot \varphi; \\ v &= k_1^p \cdot \varphi. \end{aligned} \quad (25)$$

2. Наиболее существенное влияние на скорость хода судна оказывает его рыскание, т.е. среди фазовых координат оно является основной компонентой падения скорости.

Решение четвертой задачи - определение взаимодействия ИО - не показало заметного взаимного влияния ИО.

Заключение

Анализ статистических характеристик, а также корреляционный и регрессионный анализ, анализ времен задержки и анализ собственных частот экспериментальных данных испытаний самоходной модели СПК позволяют сделать следующие общие выводы:

1. Качество исходных данных удовлетворительное, однако, объем их следует увеличить. Требуется улучшения и качество исходных данных: следует регистрировать большое число режимов на разных КУВ при разной интенсивности воздействия окружающей среды и с разными законами управления, а время записи параметров довести до 15 минут, что удовлетворяет принципу "ста волн".

2. Качество стабилизации крена и дифферента удовлетворительное. Управление заглублием (высотой движения), креном и дифферентом достаточно эффективно.

3. Качество стабилизации курса нельзя признать удовлетворительным (почти в 2 раза хуже допустимой величины). Основной причиной этого является низкая эффективность руля направления. Повышение качества

управления курсом может быть достигнуто применением более эффективных ИО, в частности, поворотной стойки НКУ вместо управляемого закрылка, либо руля направления на кормовых стойках ККУ.

4. Наиболее эффективными органами управления высотой движения являются внутренние закрылки ККУ, креном - наружные закрылки ККУ, дифферентом - закрылки НКУ. Вместе с тем необходимо отметить, что в силу особенностей динамики СПК высота движения и дифферент имеют сильную взаимосвязь, что необходимо учитывать при формировании алгоритмов управления.

5. Попутные КУВ по сравнению со встречными являются более тяжелыми режимами для стабилизации параметров пространственного положения судна, характеризующаясь их худшим качеством стабилизации и большой загрузкой ИО.

6. Качество проектирования крыльевого комплекса удовлетворительное - заметного влияния его составных частей (НКУ и ККУ) друг на друга не обнаружено.

7. Наиболее существенным фактором, вызывающим потери скорости движения, является отклонение руля направления.

Литература

1. Dong-Ki Park, Yun-Ho Shin, Jung-Hoon Chung, Eui S. Jung. Development of damage control training scenarios of naval ships based on simplified vulnerability analysis results, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 8, Issue 4, July 2016, pp. 386-397.
2. Seung-Chun Shin, Jong-Gye Shin, Dae-Kyun Oh. Development of data analysis tool for combat system integration, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 5, Issue 1, March 2013, pp. 147-160.
3. Sheng Liu, Bowen Xing, Bing Li, Mingming Gu. Ship information system: overview and research trends, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 3, September 2014, pp. 670-684.
4. Jin Choi, Dongkon Lee, Hee Jin Kang, Soo-Young Kim, Sung-Chul Shin. Damage scenarios and an onboard support system for damaged ships, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 2, June 2014, pp. 236-244.
5. Douglas Rigterink, Rebecca Piks, David J. Singer. The use of network theory to model disparate ship design information, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 2, June 2014, pp. 484-495.
6. Поляков А.С., Скороходов Д.А. Принципы обработки информации по оценке надёжности оборудования транспорта // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы*. 2013. № 3. С.65-69.
7. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. М.: Наука, 1971. 192 с.
8. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. Учебное пособие. М.: Радио и связь, 1983. 248 с.
9. Богданов А. Г., Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Синтез оптимальных характеристик гидроприводов управления движением // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т. 2. № 2 (36). С. 47-55.
10. Богданов А. Г., Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Черненко В.И. Выбор основных энергетических характеристик исполнительного привода аэроуля судна на воздушной подушке // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т. 3. № 4 (38). С. 79-84.
11. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
12. Растринин Л.А. Статистические методы поиска. М.: Наука, 1968. 376 с.
13. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление: пер. с англ. М.: Наука, 1966. 176 с.
14. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. 3-е изд.: пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.

References

1. Dong-Ki Park, Yun-Ho Shin, Jung-Hoon Chung, Eui S. Jung. Development of damage control training scenarios of naval ships based on simplified vulnerability analysis results, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 8, Issue 4, July 2016, pp. 386-397.

2. Seung-Chun Shin, Jong-Gye Shin, Dae-Kyun Oh. Development of data analysis tool for combat system integration, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 5, Issue 1, March 2013, pp. 147-160.
3. Sheng Liu, Bowen Xing, Bing Li, Mingming Gu. Ship information system: overview and research trends, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 3, September 2014, pp. 670-684.
4. Jin Choi, Dongkon Lee, Hee Jin Kang, Soo-Young Kim, Sung-Chul Shin. Damage scenarios and an onboard support system for damaged ships, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 2, June 2014, pp. 236-244.
5. Douglas Rigerink, Rebecca Piks, David J. Singer. The use of network theory to model disparate ship design information, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, V. 6, Issue 2, June 2014, pp. 484-495.
6. Poljakov A.S., Skorohodov D.A. Principy obrabotki informacii po ocenke nadjozhnosti oborudovaniya transporta [The principles of information processing on the evaluation of the reliability of the equipment transport]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby*. 2013. № 3. pp. 65-69.
7. Rumshinskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of results of experiment]. *Spravochnoe rukovodstvo*. M. Nauka, 1971. 192 p.
8. Asaturyan V.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta [The theory of planning of experiment]: Ucheb. posobie. M. Radio i svyaz, 1983. 248 p.
9. Bogdanov A. G., Kaminskiy V. Yu., Skorokhodov D. A. Sintez optimal'nykh kharakteristik gidro-privodov upravleniya dvizheniem [Synthesis of optimal characteristics of hydraulic motion control]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. T. 2. № 2 (36). pp. 47-55.
10. Bogdanov A. G., Kaminskiy V. Yu., Skorokhodov D. A., Chernenko V.I. Vybór osnovnykh energeticheskikh kharakteristik ispolnitel'nogo privoda aerorulya sudna na vozdushnoy podushke [The selection of key energy characteristics of the executive drive air wheel the hower craft] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. T. 3. № 4 (38). pp. 79-84.
11. Bendat Dzh., Pirsol A. Prikladnoy analiz sluchaynykh dannyykh [Applied analysis of random data]. M. Mir, 1989. 540 p.
12. Rastrigin L.A. Statisticheskie metody poiska [Statistical methods search]. M. Nauka, 1968. 376 p.
13. Li R. Optimal'nye otsenki, opredelenie kharakteristik i upravlenie. [Optimal evaluation, characterization and management]. M. Nauka, 1966. 176 p.
14. Dreyper N., Smit G. Prikladnoy regressionnyy analiz [Applied regression analysis]. 3-e izd. M. Vil'yams, 2007. 912 p.

УДК 681.51(075.8)

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ НА ПЛОСКОСТИ**Александр Сергеевич Ветчинкин**

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5
тел. (911) 950-34-14 e-mail: ale7324@yandex.ru**Владимир Александрович Зуев**

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5**Алексей Леонидович Стариченков**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5
тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru**Аннотация**

Построение траектории движения является одной из основных задач, решаемых при управлении подвижными объектами. Наиболее естественным критерием качества траектории является время перехода между заданными точками.

К числу факторов, определяющих сложность задачи построения оптимальной траектории относятся:

- существенная нелинейность математической модели движения объекта по плоскости
- достаточно высокий порядок дифференциальных уравнений, описывающих динамику подвижных объектов с приемлемой точностью.

К настоящему времени известно решение поставленной задачи с использованием простейшей модели подвижного объекта – т.н. машины Дубинса. В настоящей статье рассматривается возможность решения задачи построения траектории движения для более сложных моделей подвижных объектов за счет установления аналогии между элементами оптимальных траекторий машины Дубинса и элементами траекторий, соответствующими более сложным моделям.

Ключевые слова траектория движения на плоскости, машина Дубинса, допустимые траектории.

THE FORMATION OF TRAJECTORIES ON THE PLANE**Aleksaner S. Vetchinkin**

PhD, the assistant professor

Saint-Petersburg Electrotechnical University
197022, St. Petersburg, prof. Popov st., 5
Tel. (911) 950-34-14 e-mail: ale7324@yandex.ru**Vladimir A. Zuev**

PhD, the assistant professor

Saint-Petersburg Electrotechnical University
197022, St. Petersburg, prof. Popov st., 5**Alexey L. Starichenkov**

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of Department,

Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,

Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376

phone: +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Abstract

The construction of the trajectory is one of the key tasks in the management of mobile objects. The most natural criterion for the quality of the trajectory is the transition time between specified points.

Among the factors that determine the complexity of the problem of constructing the optimal trajectory from runnin:

- significant nonlinearity of the mathematical model of the object on the plane

- a fairly high order differential equations describing the dynamics under-virnich objects with acceptable accuracy.

It is now known the solution of the problem using the simplest model of the mobile object, so – called machine Dubins. This article discusses the possibility of solving the problem of constructing a trajectory for the more complex patterns of moving objects by establishing an analogy between the elements of the optimal trajectories of the machine Dubins and elements of the trajectories corresponding to more complex models.

Key words trajectory, machine Dubins, a valid trajectory.

В настоящей статье рассматривается формирование траекторий движения объектов на плоскости, которые соответствуют минимальному времени перемещения объекта между заданными точками. В число исходных данных входят углы, определяющие положение вектора скорости в начальной и конечной точках.

В литературе описаны теоретические вопросы формирования траекторий, обеспечивающих оптимальное по быстродействию перемещение объекта между заданными точками [1]. Упомянутые исследования были выполнены в предположении, что динамика подвижного объекта соответствует т.н. машине Дубинса, т.е. объект управления описывался следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V \cos(\varphi), \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin(\varphi), \\ \frac{d\varphi}{dt} &= u, \end{aligned} \quad (1)$$

где x и y - декартовы координаты подвижного объекта, V - скорость движения объекта, φ - угол между вектором скорости и осью X, u - управляющее воздействие.

Особенностью рассматриваемой математической модели машины Дубинса (1) является то, что траектории ее движения из начальной точки и в конечную являются окружностями. Из этого свойства можно сделать вывод о том, что общая траектория движения между заданными точками состоит из двух дуг окружности и соединяющего их отрезка прямой. Пример траектории показан на рис. 1.

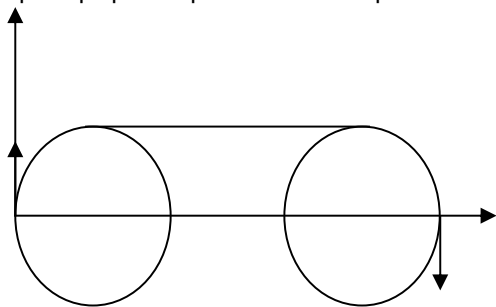


Рис. 1. Пример траектории, соответствующей машине Дубинса

При построении траекторий, соответствующих более сложным моделям подвижных объектов предлагается использовать аналогию с траекториями машины Дубинса. По нашему мнению траектории должны состоять из криволинейных участков, исходящих и входящих в граничные точки траектории, и прямолинейного участка, соединяющего траектории выхода и входа в граничные точки траектории. Криволинейные участки должны соответствовать оптимальным по быстродействию траекториям поворота объекта управления.

В отличие от случая машины Дубинса, в случае более сложных моделей объекта управления через граничные точки проходит не одна окружность, а некоторое семейство траекторий, каждый член которого соответствует некоторому углу поворота.

На рис.2 приведены траектории, проходящие через заданные начальную и конечную точки и соответствующие оптимальным по быстродействию поворотам судна на -60° (линии 1, 8), -80° (линии 2, 7), -100° (линии 3, 6) и -120° (линии 4, 5). При построении траекторий использовались уравнения движения судов (2) из [2]

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_y}{dt} &= a_{11}\omega_y + a_{12}\beta + b_{11}\delta_e, \\ \frac{d\beta}{dt} &= a_{21}\omega_y + a_{22}\beta + b_{21}\delta_e, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_y, \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos(\varphi - \beta), \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin(\varphi - \beta), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_y - угловая скорость рыскания, β - угол дрейфа, δ_e - угол перекладки руля, V - скорость движения судна, x , y - декартовы координаты судна на плоскости, $a_{11}=-0.16$, $a_{12}=0.0049$, $a_{21}=0.58$, $a_{22}=-0.021$, $b_{11}=0.0023$, $b_{21}=0.0088$

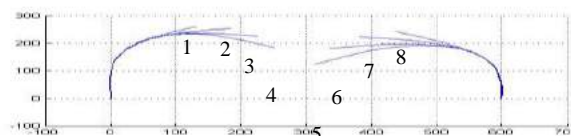


Рис. 2. Примеры траекторий судна проходящих через граничные точки

Для определения параметров прямолинейного участка траектории,

соединяющего траектории исходящего и входящего поворотов, возможно при наличии аналитического описания двух семейств прямых линий:

- семейство прямых линий, которыми заканчиваются траектории исходящих из начальной точки поворотов;
- семейство прямых линий, которыми начинаются траектории входящих в конечную точку поворотов;

Требуемые аналитические выражения могут быть получены, в частности, путем полиномиальной аппроксимации результатов математического моделирования процессов поворота судна. Следует отметить, что траектории входящих поворотов могут быть получены из траекторий исходящих поворотов путем преобразования системы координат без проведения расчетов по моделированию движения судна.

Таким образом, описание семейства прямых, которыми заканчиваются траектории исходящих из начальной точки поворотов может быть представлено в виде:

$$y = K_1(\alpha_1)x + B_1(\alpha_1), \quad (3)$$

где α_1 - угол исходящего поворота.

Подобным образом описание семейства прямых, которыми заканчиваются траектории входящих в конечную точку поворотов может быть представлено в виде:

$$y = K_2(\alpha_2)x + B_2(\alpha_2), \quad (4)$$

где α_2 - угол входящего поворота.

При наличии выражений (3) и (4) определение параметров прямолинейного участка траектории может быть получено из системы уравнений:

$$\begin{aligned} B_1(\alpha_1) &= B_0(\alpha_2), \\ K_1(\alpha_1) &= K_0(\alpha_2), \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, что система уравнений (5) может быть упрощена:

$$\begin{aligned} B_1(\alpha_1) &= B_0(\alpha_2), \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= \alpha_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где α_0 - угол между направлениями вектора скорости, соответствующими конечному и начальному положениям объекта управления.

Уравнения (6) позволяют определить необходимые углы входящего и исходящего поворотов и, следовательно, параметры

прямолинейного участка траектории связывающие траектории входящего и исходящего поворотов.

Для примера в таблице 1 показаны параметры прямолинейных траекторий, соответствующих исходящим и входящим поворотам, рассчитанным для объекта управления (2).

Таблица 1

Зависимость вертикального смещения исходящих/входящих прямых от входящего угла поворота

α_1	B_1	α_2	B_2
-60°	185.38	-120°	-56.18
-80°	221.72	-100°	122.2966
-100°	266.06	-80°	291.33
-120°	329.66	-60°	497.14

После аппроксимации данные таблицы 1 могут быть представлены в графическом виде:

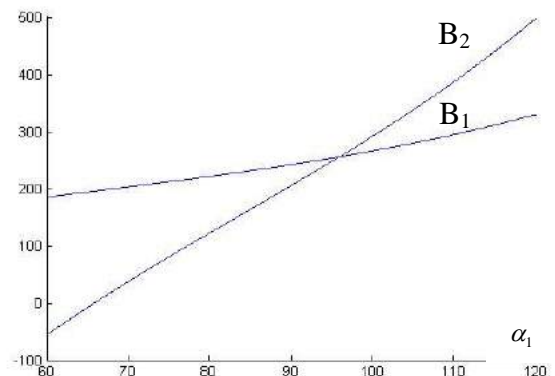


Рис. 3. Зависимость вертикального смещения исходящих/входящих прямых от входящего угла поворота

Вычисления по аналитическим зависимостям, соответствующим рис. 3, показывают, что траектория движения рассматриваемого объекта должна состоять из оптимального по быстродействию поворота на 96°, прямолинейного участка и оптимального по быстродействию поворота на 84°.

Выполненная работа показала, что использование аналогии с процессами управления машиной Дубинса позволяет формировать траектории движения объектов, описываемых достаточно сложными математическими моделями. Кроме того, получены требования к минимальному объему экспериментов с математическими моделями

подвижных объектов, необходимых для создания математических соотношений определяющих параметры участков искомых траекторий. Для получения соотношений (3) необходимо

выполнить моделирование только процессов исходящих поворотов в диапазоне углов, достаточном для определения элементов (3) с достаточной точностью.

Благодарности

Публикация выполнена в рамках государственного задания №8.7141.2017/8.9 Минобрнауки России.

The research work was supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task #8.7141.2017/8.9).

Литература

- Аграчев А.А., Сачков Ю.Л. Геометрическая теория управления/М.Физматлит.2005
- Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. Учебник.-СПб.:«Элмор», 2002.-360 с.

References

1. Agrachev A.F., Skachkov Ju.L. Geometric control theory // M.Fizmatlit. – 2005
2. Lukomskij Ju.A., Poshehonov V.G., Skorohodov D.A. Navigation and vessel traffic management // Spb.: «Elmor». – 2002.

УДК 681.884

СЛЕЖЕНИЕ ЗА МАНЕВРИРУЮЩИМИ ОБЪЕКТАМИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОРСКОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Андрей Владимирович Макшанов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных систем и информатики
Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.
Макарова

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
тел. +7 (812) 748-96-92 e-mail: otd_o@gumrf.ru

Аннотация

В статье рассматривается задача слежения за маневрирующим объектом распределённой морской системой наблюдения (PMCH), предполагающая интеграцию больших объемов разнохарактерной информации. Главное предназначение таких систем состоит в обеспечении условий навигации, мониторинге обстановки, спасении жизни людей в различных ситуациях. PMCH можно рассматривать как распределенную компьютерную систему, включающую набор сервисных подсистем для различных групп и уровней пользователей. Такая система высокого уровня базируется на данных ряда существующих морских информационных систем (AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS). Важнейшую проблему при разработке подобных систем представляют вопросы интеграции информации, поступающей в различной форме от различных источников и вопросы учета ограничений типа неравенств, отражающих особенности акватории. При этом даже при наличии больших объемов входных данных серьезные сложности для алгоритмов слежения вызывают глухие участки в последовательностях наблюдений продолжительностью от минут до часов. Аналитические решения здесь возможны только в узком классе моделей эволюции, измерений и экзогенной информации. В настоящей работе рассмотрены подходы к слиянию информации от различных источников при оценивании координат и параметров движения подвижного объекта в системе виртуальных сценариев его поведения. Предложены новые конструкции фильтров, основанные на возможностях выборочного представления апостериорной плотности распределения оценки. Предлагается общий сценарный подход для последовательного анализа ситуационных гипотез, основанный на синтезе аналитической техники и процедур компьютерного моделирования. На выходе такого фильтра на каждом шаге появляется векторная выборка, интерпретируемая как выборка из апостериорного распределения, которой можно распорядиться различными способами. Например, апостериорная вероятность попадания в некоторую зону может оцениваться как доля выборочных значений, попавших в эту зону, точечная оценка – как одна из характеристик центра и т.д.

Ключевые слова: маневрирующий объект, слияние данных, распределённая система наблюдения, эмпирический Байесовский подход, Монте-Карловские фильтры, ситуационный анализ, последовательное оценивание, полисценарный подход.

TRACKING MANEUVERING OBJECTS IN DISTRIBUTED MARITIME OBSERVATION SYSTEM

Andrey V. Makshanov

the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of DEPARTMENT OF COMPUTATION SYSTEMS AND
INFORMATICS,
ADMIRAL MAKAROV STATE UNIVERSITY OF MARITIME AND INLAND SHIPPING OF SAINT-PETERSBURG
Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation
tel: +7 (812) 748-96-92 e-mail: otd_o@gumrf.ru

Abstract

The paper regards processes of maneuvering target tracking at Distributed Maritime Observation System (DMOS), that requires integration of large volume of diverse information. The main purpose of DMOS is to support favorable navigation conditions, monitoring, save life on the sea for different ships in harbors, maritime roads and open sea. DMOS can be considered as a heterogeneous distributed computer system, it includes different layers of services at different levels of abstraction: ship, harbor, and regional and global levels. Such a framework is based on several satellite and maritime information systems that nowadays favor the integration of maritime data (e.g., AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS). Central problems at elaboration of such systems are integration of

information of different kind received from different sources and taking into account inequality restrictions on region peculiarities. Despite big volume of input data there are situations when there are different gaps (time delays from minutes to hours) between target observations points. Well known algorithms of target tracking do not work properly in such situations. Analytics here is available only at narrow classes of evolution, measurement and outer information models. A joined artificial techniques scenario approach for tactical situation hypothesis development is proposed. Data fusion approaches at estimating the parameters of moving object in the system of virtual scenarios of its behavior are regarded. New design of filters based on sample representations of posterior distribution is elaborated. The proposed approach describes synthesis of analytical and simulation methods for hypothesis statement when there are no variants to use suitable direct analytics. The result of filtering at each stage is the vector sample regarded as a sample from posterior distribution that may be treated variously. For example, probability of achieving any domain may be estimated as percentage of sample values at this domain, point estimate – as one of mean value statistics and so on.

Keywords: target tracking, data fusion, distributed observation systems, empiric Bayes approach, Monte-Carlo filtering, situation analysis, polyscenario approach.

Introduction

An experience at developing grand distributed systems of maritime monitoring [1, 2] shows that disregarding a great number of various interacting systems (e.g., AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS, etc) the problem of objects' tracking in the sea remains somewhat far from its solution. One of most important problems at elaborating similar systems consists in integration of information from different sources and in taking into account restrictions on region peculiarities. The current paper proposes procedures of sequential analysis of situation hypotheses (scenarios) being a synthesis of analytics and computer modeling.

Statement of the information integration problem in DMOS

In some area functions a distributed maritime observation system (DMOS) that incorporates N information sources and controls. The following elements are used as sources of information about situations:

- Space-distributed monitoring facilities (mobile and immobile), that possess different capabilities in registration of the objects under monitoring, in measuring coordinates and parameters of the objects' motion, and in intensity of the information release to the controls;
- Other distributed observation systems that release their data discretely in an integrated form.

Upon the processing the data from the i -th monitoring facility or from the k -th distributed system ($i \in N, k \in N$) are send to the DMOS controls in a form of discrete messages, at that, each message is related to one, j -th object ($j = 1, \dots, M, M$ – is a number of objects operating within the system function zone) Each message could be represented as vector C_{ij} :

$$C_{ij} = [i \ j \ K_{ij} \ \varphi_{ij} \ \lambda_{ij} \ h_{ij} \ k_{ij} \ v_{ij} \ P_{ij} \ t_{ij}], \quad (1)$$

Here i – is the information source number;
 j – is the object number assigned by the i -th information source;

- K_{ij} - is the monitoring object class;
- φ_{ij} - is the object's locality latitude;
- λ_{ij} - is the object's locality longitude;
- h_{ij} - is the object's locality height (depth);
- k_{ij} – is the object's source;
- v_{ij} – is the object's velocity (speed);
- P_{ij} – other object's features that can be generated by the monitoring facility, like feature of novelty, feature of object's maneuver attribute, feature of the object's loss, etc.
- t_{ij} – the time of an information receipt (may differ from the message receipt time).

For all i, j the covariance matrices that describe an uncertainty of the j -th object coordinates' assessment by the i -th source are known;

$$\psi_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & K_{xy} \\ K_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where σ_x^2, σ_y^2 - are variances of the object's locality assessments in the x and y directions correspondingly, K_{xy} – is the above assessments covariance.

The monitoring system controls have available the additional information that specifies a situation within a region and affects the information processing, like information about the:

- localities of the monitoring system's elements;
- monitoring facilities characteristics (detection range of the objects from various classes, resolution, silent spaces, etc.);
- region infrastructure (fairwaters, navigable waterways, navigational aids and other);
- hydro meteorological situation;
- ice conditions;
- fishing conditions.

This additional information allows for putting forward certain tactical situational hypotheses that are formalized in a form of exogenous Bayes distributions being sequentially shaped as messages continue to arrive.

DMOS is intended to solve problems of integrating the information arriving from various monitoring facilities and other distributed systems; these problems are as follows:

- a) calculation and construction of the zones of monitoring objects' possible localities.
- b) extrapolation of the discriminated object locality at a definite point of time.
- c) identification and mapping of the tracks for objects followed by the observation system elements.

Bayes recursive assessment under restrictive statement

Task of the track analysis [1] represents one of the versions in the problem of recursive non-linear assessment [3], and an extended Kalman filter is the most commonly used approach for the case. The task is exposed to linearization within a neighborhood of the predicted value and the sought density is approximated by the Gaussian density that may not match the real data structure and, in particular, lead to divergence. Other analytic approaches are based upon the approximation of the first two density moments [4, 5]. The better direct numerical approach uses the density assessment at the grid nodes in the state space [6], at that, the case of multi dimensional space requires calculations for an excessively great number of points (nodes), thus, involving considerable computational power for each point (node).

It is assumed that a state vector $x_k \in R^n$ keeps evolving in accordance with the dynamics model

$$x_{k+1} = f_k(x_k, w_k), \tag{3}$$

where $f_k : R_n \times R_m \rightarrow R_n$ - is the system transient function, $w_k \in R^m$ - is a sequence of errors with a zero average (mean) and independent of the state vector past and future values. The probability density w_k is assumed known. In terms of a discrete time there exist measurements $y_k \in R^p$ linked to the state vector values by the observation equation:

$$y_k = h_k(x_k, v_k), \tag{4}$$

where $h_k : R^n \times R^r \rightarrow R^p$ - is the measurements' transient function and $v_k \in R^r$ - is the other sequence with a zero average (mean) and known probability density independent of the past and future system states and noises. The initial density is assumed known for the state vector and function $f_i, h_i, i=1, \dots, k$.

Exogenous information based upon the current tactical situational hypothesis in most cases is formalized as an even distribution in some polygon U_k , independent of the past and future system states and noises. Let us denote the appropriate density as $u_k(x_k)$.

So, at the step k the available information is represented by the sequence of measurements' $\{y_j\}$ and the exogenous density $u_k(x_k)$:

$D_k = \{y_i, i = 1, \dots, k, u_k(x_k)\}$. The task consists in arriving at the values of state vector $p(x_k|D_k)$ based on complete information available by the moment k . This process is performed recurrently in two stages: prognosis and update.

Suppose that the sought density $p(x_{k-1}|D_{k-1})$ at step $k-1$ is already received. Then using the system dynamics model a priori density can be received as follows:

$$p(x_k|D_{k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1})p(x_{k-1}|D_{k-1})dx_{k-1}. \tag{5}$$

The probability model for the state vector

$p(x_k|x_{k-1})$ is the Markov one and is determined by the system of equations:

$$p(x_k|x_{k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1}, w_{k-1})p(w_{k-1}|x_{k-1})dw_{k-1}$$

Under an assumption $p(w_{k-1}|x_{k-1}) = p(w_{k-1})$

we have

$$p(x_k|x_{k-1}) = \int \delta(x_k - f_{k-1}(x_{k-1}, w_{k-1}))p(w_{k-1})dw_{k-1},$$

where $\delta(\cdot)$ - the Dirac delta function. Delta function appears since under the unknown x_{k-1} and w_{k-1} the assessment x_k is received from the determinate relation (5). At the step k become available the measurement y_k and exogenous distribution $u_k(x_k)$ that are used to update a priori distribution of the state vector based on the Bayes rule

$$p(x_k|D_k) = \frac{p(y_k|x_k)p(x_k|D_{k-1})u_k(x_k)}{p(y_k|D_k)}, \tag{6}$$

where a normalizing multiplier is determined through the relation

$$p(y_k|D_k) = \int p(y_k|x_k)p(x_k|D_{k-1})u_k(x_k)dx_k. \tag{7}$$

The conditional density y_k under the given $x_k, p(y_k|x_k)$ is determined by the measurements' model and by the known statistics distribution v_k :

$$p(y_k|x_k) = \int \delta(y_k - h_k(x_k, v_k))p(v_k)dv_k. \tag{8}$$

In the equations (6-8) the measurement y_k and density u_k are used for a correction of the prognosis starting from the preceding step and the receiving of a posteriori distribution for the state vector.

The equations (6-8) give a formal solution for the problem of the Bayes recurrent assessment. Here an analytical solution is only possible within a restricted class of evolution models, measurements and exogenous information. The case when f_k and h_k are linear, w_k and v_k are the additive Gaussian noises with the known covariance matrices, and u_k are the Gaussian densities is considered to be the most important, though for many applications this problem statement turns out the inadequate one.

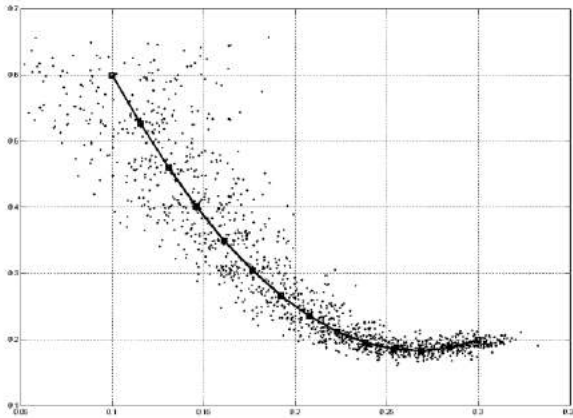


Fig.1. An example: maneuvering object trajectory and its bootstrap estimate

Restrictive Bayes bootstrap filter

Suppose that there exists a set of independent realizations for a random vector

$$\{x_{k-1}(i), i = 1, \dots, N\},$$

conforming to the distribution $p(x_{k-1}|D_{k-1})$. Bootstrap - filter [2,3] is an algorithm allowing based on the above to receive a set of independent realizations $\{x_k(i), i=1, \dots, N\}$, approximately conforming to the distribution $p(x_k|D_k)$. Such a filter presents a mechanism approximately emulating relations (6-8).

Prognosis: each sampling realization is transformed in accordance with the formula

$$x_k^*(i) = f_{k-1}(x_{k-1}(i), w_{k-1}(i)), i = 1, \dots, N, \quad (9)$$

Where $w_{k-1}(i)$ – are sampling realizations of the random vector with distribution $p(w_{k-1})$. So, in accordance with (9), $x_k^*(i)$ - is a vector sample matching distribution $p(x_k|D_{k-1})$.

Update: Based on y_k measurement the likelihood function is derived and weight coefficients are received for each realization:

$$q_i = \frac{p(y_k|x_k^*(i)) \cdot u_k(x_k^*(i))}{\sum_{j=1}^N p(y_k|x_k^*(j)) \cdot u_k(x_k^*(j))}. \quad (10)$$

In this way is defined the discrete distribution over the ensemble of points $\{x_k^*(i), i = 1, \dots, N\}$ with a probabilistic weight q_i in the i -th point. Let us construct out of this discrete distribution N random realizations and generate a sample $\{x_k(i), i = 1, \dots, N\}$ so that for any i, j

$$P\{x_k(i) = x_k^*(i)\} = q_i.$$

These prognosis and update procedures compose one the k -th iteration step. At the first step the

process is being initialized by N realizations of the random vector with a known distribution $p(x_1)$.

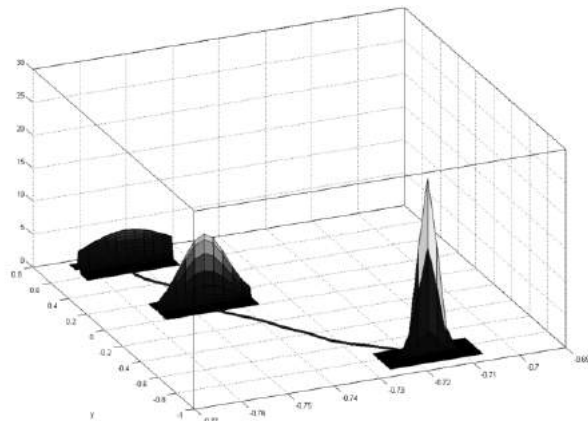


Fig.2. Posterior density evolution (Gaussian approximations)

The update procedure is based on the results received by Smith and Gelfand in [7]. Their work proves that Bayes formula could be interpreted as a weighted bootstrap [8]. Suppose that set $\{x_k^*(i)\}$ is received as a random sample out of a continuous distribution with density $G(x)$, and it is necessary to receive a sample out of distribution with a density proportional to $L(x)G(x)$, where $L(x)$ – is a known nonnegative function. The Smith-Gelfand theorem claims that a random sample out of discrete distribution concentrated in points $\{x_k^*(i)\}$ with probabilistic weights

$$q_i = \frac{L(x_k^*(i))}{\sum_{j=1}^N L(x_k^*(j))}$$

is a distribution converging one assumed that $N \rightarrow \infty$ to a sought density. In the case under consideration $G(x)$ replaced by $p(x_k|D_{k-1})$, and $L(x)$ – by $p(y_k|x_k)u_k(x_k)$.

The main advantage of the proposed approach is that it imposes no constraints on the functions' f_k , h_k and u_k form. The major requirements consist in the following:

- Distribution $p(x_1)$ is known and assumes modeling based on Monte-Carlo techniques;
- Distribution $p(y_k|x_k)$ is known;
- Distributions $p(w_k)$ and $u_k(x_k)$ are known and assume modeling based on Monte-Carlo techniques.

At each step of the filter output appears a vector sample that could be disposed in a variety of ways. Say, a posteriori probability of hitting some zone could be assessed as a rate of the sample values that have hit this zone. In case the reasons exist to suppose that a posteriori distribution is a unimodal one the statistic characteristics for each component of the state vector and their any function.

The proofs of the proposed approach appropriateness are based upon the asymptotic results [10]. To study the bootstrap properties for the

finite samples is difficult enough. Moreover, the relation between the samples N volume and the received results accuracy is not clear [3,4], it is influenced upon by three factors:

- The states space dimension;
- The goodness of a priori and a posteriori distributions;
- The number of steps required for recurrence.

It should be expected that N grows rapidly along with the task dimension growth, at that, the rapidity depends on the correlation between the components. Same time under the independent components this rapidity does not depend on the task dimension.

Conclusion

Principal advantage of Monte-Carlo basic approach consists in almost whole absence of limitations on functions at state and observation equations. They only have to admit imitational modeling. The shortage is exponential increase of computations. It may be relaxed under simplifying model suppositions. At this cage the problem reduces to ill-conditioned non-linear regression [10-12]. By this at every step we get a distribution on a set of virtual scenarios of object's behavior to be used as prior distribution at the next step. The filter output gives a vector sample that provides posterior estimates of state parameters.

Литература

1. Интеллектуальные GIS для морских систем наблюдения. Ред. В. Попович. М.: Наука, 2013, 283 с.
2. Popovich V., Claramunt C. (2013). Distributed Maritime Observation Systems for Navigation //Proceedings of the ENC, Vienna, April 23-25, 2013.
3. Carlin B.P., Polson N.G., Stoffer D.S. (1992). A Monte-Carlo approach to nonnormal and nonlinear state space modeling. *JASA*, 1992, No. 87, pp. 493-500.
4. Doucet A., de Freitas N. (editors). (2001). *Sequential Monte-Carlo methods in practice*. New York: Springer-Verlag, 2001.
5. West M., Harrison P.J., Migon H.S. (1985). Dynamic generalized linear model and Bayesian forecasting (with discussion). *JASA*, 1985, 80, pp.73-97.
6. Gordon N., Salmond D., Smith A. (1993). Novel approach to nonlinear/nongaussian state estimation. *Proc. Inst. Elect. Eng., ser.F*, 1993, v.40, №2, pp.107-113.
7. Smith A.F.M., Gelfand A.E. (1992). Bayesian statistics without tears: a sampling-resampling perspective. *Amer. Stat.*, 1992, No.46, pp. 84-88.
8. Efron B. Maximum Likelihood and decision Theory. (1982). *Ann. Statist.*, 1982, 10, pp.340-356.
9. Alspach D.L., Sorensen H.W. (1972). Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximation. – *IEE Trans. Auto. Control*, 1972, vol. AC-17, pp.439-447.
10. Popovich V.V., Ermolaev V.I., Makshanov A.V., Vlasov S.A. (2014). Moving Objects Tracking in Distributed Maritime Observation Systems. *REAL CORP 2014 Proceedings*. Tagundsband: *Clever Plans for Smart Cities*. Springer, 2014, pp. 187-196.
11. Леонтьев Ю.Б., Макшанов А.В., Попович Т. В. (2016). Полисценарный подход в траекторном анализе источников гидроакустических сигналов. *Международный Научный Институт «Educatio»*, Россия, Новосибирск: 1 (19), 2016, с. 32-39.
12. Ли И.В., Макшанов А.В. (2016). Решение задачи интегрирования информации в распределенной морской системе наблюдения. *Вестник ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова*, 2016, вып. 6(40), С. 228-235.

References

1. Intellectualnie GIS dla morskich system nabludenia. Red. V. Popovich. M.: Nauka, 2013, 283 pp.
2. Popovich V., Claramunt C. (2013). Distributed Maritime Observation Systems for Navigation. *Proceedings of the ENC, Vienna, April 23-25, 2013*.
3. Carlin B.P., Polson N.G., Stoffer D.S. (1992). A Monte-Carlo approach to nonnormal and nonlinear state space modeling. *JASA*, 1992, No. 87, pp. 493-500.
4. Doucet A., de Freitas N. (editors). (2001). *Sequential Monte-Carlo methods in practice*. New York: Springer-Verlag, 2001.
5. West M., Harrison P.J., Migon H.S. (1985). Dynamic generalized linear model and Bayesian forecasting (with discussion). *JASA*, 1985, 80, pp.73-97.
6. Gordon N., Salmond D., Smith A. (1993). Novel approach to nonlinear/nongaussian state estimation. *Proc. Inst. Elect. Eng., ser.F*, 1993, v.40, №2, pp.107-113.

-
7. Smith A.F.M., Gelfand A.E. (1992). Bayesian statistics without tears: a sampling-resampling perspective. Amer. Stat., 1992, No.46, pp. 84-88.
 8. Efron B. Maximum Likelihood and decision Theory. (1982). Ann. Statist., 1982, 10, pp.340-356.
 9. Alspach D.L., Sorensen H.W. (1972). Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximation. – IEE Trans. Auto. Control, 1972, vol. AC-17, pp.439-447.
 10. Popovich V.V., Ermolaev V.I., Makshanov A.V., Vlasov S.A. (2014). Moving Objects Tracking in Distributed Maritime Observation Systems. REAL CORP 2014 Proceedings. Tagundsband: Clever Plans for Smart Cities. Springer, 2014, pp. 187-196.
 11. Leontiev Y.B., Makshanov A.V., Popovich T.V. (2016). Polyscenarny podhod v traectornom analize istochnikov hydroacusticheskikh signalov. Mejdunarodny Nauchny Institute "Educatio", Russia, Novosibirsk: 1 (19), 2016, pp. 32-39.
 12. Lee I.V., Makshanov A.V. (2016). Reshenie zadachi integririvanja informatsii v raspredelennoy morskoy systeme nabludenia. Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota imeni admirala S.O. Makarova, 2016, вып. 6 (40), pp. 228-235.

УДК 656; 004.8, 004.942, 007.5, 51-7, 510.67

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМИ ВОДНЫМИ ПАССАЖИРСКИМИ ПЕРЕВОЗКАМИ

Святослав Александрович Селиверстов

кандидат технических наук, научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Ярослав Александрович Селиверстов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Ольга Юрьевна Лукомская

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

Шакиб Субхиевич Фахми

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
e-mail: shakeebf@mail.ru

Евгения Олеговна Выдрина

кандидат экономических наук, доцент
Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации 190008, Санкт-Петербург, пл. Репина, д. 1
Тел.: (812) 495-22-55, Jenek_55@mail.ru

Алексей Анатольевич Фирстов

Магистрант 2-го курса, кафедра транспорта и хранения нефти и газа
Санкт-Петербургский горный университет
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2
e-mail: nemfor23568@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается применение трилинейной модели в задачах прогнозирования транспортной нагрузки на улично-дорожной сети и станций метрополитена при вводе в эксплуатацию внутреннего водного транспорта в г. Санкт-Петербурге. Представлено сравнение уровня автомобилизации подвижности населения на общественном городском пассажирском транспорте в Санкт-Петербурге. Рассмотрен перечень проблем, вызванных повышением уровня автомобилизации, таких как: загрязнение атмосферного воздуха, повышение уровня смертности жителей в городах и нарушение экологического баланса и указаны пути их решения в границе концепции устойчивого развития. Обосновывается актуальность использования водного пространства мегаполиса при устойчивом развитии видов транспорта. Выполнен обзор отечественных и зарубежных работ в области математического моделирования транспортных потоков и применение комплексов транспортного моделирования для решения задач на водном транспорте. Представлено математическое описание трилинейной модели. Рассмотрен практический пример моделирования транспортных потоков и проведена оценка их перераспределения, связанного с вводом новой линии водного пассажирского транспорта.

Ключевые слова: внутренний водный транспорт, водное такси, прогнозирование транспортных потоков, имитационное моделирование, трилинейная модель.

APPLICATION OF THE TRILINEAR MODEL IN THE PROBLEMS OF IMPROVING THE QUALITY OF MANAGEMENT OF INLAND WATER TRANSPORTATIONS

Svyatoslav A. Seliverstov

Phd, Senior researcher,
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Yaroslav A. Seliverstov

Phd, Senior researcher,
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

O'l'ga Yu. Lukomskaya

Phd, Leading researcher,
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: luol@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi

Dr.Tech.Sc, docent, Leading researcher
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel. (812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru

Evgenia O. Vydrina

PhD economics, docent
St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
190008, St. Petersburg, Sq. Repina, 1
Tel: (812) 495-22-55, Jenek_55@mail.ru

Aleksey A. Firstov

Graduate student,
Department of Oil and Gas Transportation and Storage
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
e-mail: nemfor23568@gmail.com

Abstract

The article considers the application of the trilinear model to the tasks of forecasting the transport load on the street-road network and metro stations during the commissioning of inland waterway transport in St. Petersburg. The comparison of the level of motorization of mobility of the population on public urban passenger transport in St. Petersburg is presented. Reviewed the list of problems caused by high levels of car ownership, such as air pollution, increased mortality of residents in cities and the destruction of the ecological balance and indicates ways to solve them at the boundary of the concept of sustainable development. The urgency of using the water space of the megalopolis under sustainable transport development is substantiated. The review of domestic and foreign works in the field of mathematical modeling of transport flows and application of transport simulation complexes for solving problems on water transport is reviewed. A description of the trilinear model is presented. A practical example of modeling traffic flows and an assessment of its redistribution with the introduction of a new line of water passenger transport is considered.

Key words: inland waterways, water taxi, traffic forecasting, simulation modeling, trilinear model.

Введение

В настоящее время транспорт связан со всеми аспектами жизни городского человека. Качество городской среды, природное окружение жителей и их социальное и экономическое благополучие и безопасность почти всецело зависят от

эффективности функционирования и доступности транспортной системы. Однако текущие прогнозы [1, 2] указывают на неуклонный рост мобильности населения и транспортных перевозок, совершенных на личном автомобильном транспорте. Последнее подтверждается сравнением динамики автомобилизации и

годовой подвижности населения на общественном городском пассажирском транспорте за 2005-2013 гг. в таком крупном городе как Санкт-Петербург [3], (Рис. 1).

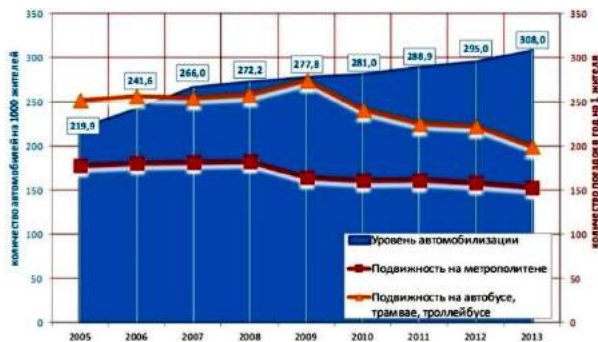


Рис. 1. Сравнение уровня автомобилизации подвижности населения на общественном городском пассажирском транспорте в Санкт-Петербурге

В российских и зарубежных исследованиях [4–11] отмечают, что такие процессы являются причиной серьезных негативных последствий в городах, а именно: загрязнение атмосферного воздуха, водных ресурсов и почвенного покрова, повышение уровня смертности жителей в городах, нарушение экологического баланса и снижение природного биоразнообразия. Анализ этих факторов в глобальном контексте [12] выявил множество проблем, вызванных ненадлежащим развитием транспортных систем в городах, и отметил серьезность такой угрозы для будущих поколений. Решением столь сложной проблемы стала концепция устойчивого развития. Суть данной концепции заключается в таком развитии транспорта, которое отвечает потребностям настоящего поколения, без ущерба для будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Достижение такого развития в крупных городах возможно лишь при сбалансированном развитии транспортной инфраструктуры, позволяющей эффективно использовать природный ландшафт в границах городской среды с целью повышения качества транспортного процесса движения и перевозок и минимизации нефункциональных простоев транспортных средств внутри сети. Одной из уникальных особенностей такого ландшафта является наличие в городе поверхностных вод, в том числе естественных и искусственных рек и каналов.

Согласно [13, 14, 15] рациональное использование данного ресурса при организации городской транспортной системы может серьезно повысить ее доступность и устойчивость в условиях пространственного дефицита, а также снизить экологический ущерб.

Мировой опыт показывает, что в большинстве городов, имеющих такой водный ресурс, эффективно организованные перевозки на внутреннем водном городском пассажирском транспорте (ВВГПТ) являются широко востребованными как жителями, так и гостями, и

позволяют снизить нагрузку на улично-дорожную сеть.

Примером интеграции ВВГПТ в систему городских пассажирских перевозок могут служить такие города как Гамбург и Нью-Йорк, рис [2].



Рис. 2. Пример маршрутных сетей городского пассажирского водного транспорта в Нью-Йорке

Основной сложностью при организации внутренних водных пассажирских коммуникаций и встраивания их в существующую систему городских перевозок является определение маршрутной сети, а также оптимального парка транспортных средств с учетом растущего спроса на перевозки. Корректное решение столь сложной задачи допустимо, однако затрагивает современные технологии и методы создания транспортных моделей и перераспределение транспортных потоков. Применению данных методов и посвящена настоящая статья.

1. Анализ предметной области

В водный транспорт математическое моделирование транспортных потоков как самостоятельная научная область пришла из автомобильного транспорта. Именно поэтому обзор источников и их анализ опирается преимущественно на научные работы, посвященные моделированию потоков на автомобильном транспорте.

Первые исследования дорожного трафика математическими методами, а точнее с использованием аппарата теории вероятности, были проведены В.Ф. Адамсом (W.F. Adams) [16].

В своей работе ему удалось получить выражение для вычисления средней задержки пешеходов на перекрестке, которое позднее получило название «задержка Адамса». Новаторскими также можно считать результаты, полученные Брюсом Д. Гриншилдом (B.D. Greenshields) [17] в области исследования пропускной способности и вычисления средней скорости свободного движения транспортных средств на дорогах в штате Огайо. Позднее в [18] были выявлены фундаментальные отношения,

возникающие между отдельными транспортными средствами внутри дорожного трафика.

Более подробно поведение транспортного потока, описываемое экспоненциальным распределением, исследовали М.С. Рафф (M.S. Raff) [19] и Д.К. Таннер (J.C. Tanner) [20].

Модели для изучения динамики движения трафика стали разрабатываться с начала 1950-х. В 1951 Л.А. Гудмен (L.A. Goodman) [21], исследуя распределения интервалов между последовательно движущимися автомобилями, представил формулу распределения автомобилей при синхронном счёте, названную в [22] обобщённым распределением Пуассона. Независимо, анализируя задачи субъективного целеполагания динамических дорожных треков, формулируют принципы потокового равновесия Ф.Х. Найт (F.H. Knight) [23] и А.К. Пигу (A.C. Pigou) [24].

Позднее в рамках концепции равновесия Нэша Дж. разрабатывает первый и второй поведенческие принципы Г. Вардроп [25]. Годом позже Л.А. Пайпесом (L.A. Pipes) [26] предлагается модель, описывающая изменение скорости транспортных средств в соответствии с безопасным расстоянием до впереди идущего транспортного средства (лидера). В 1952 М.Дж. Лайтхилл (M.J. Lighthill) и Г.Б. Уитем (G.B. Whitham) [26, 27, 28], а также П.И. Ричардс (P.I. Richards) [29] разрабатывают первую математическую модель, описывающую поведение транспортного потока на однополосной бесконечной дороге (модель LWR).

В данной модели транспортный поток рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости, при этом существует взаимно-однозначная зависимость между скоростью и плотностью транспортного потока, а также выполняется закон сохранения (количество автомобилей в потоке). Однако модель LWR имела существенные недостатки, а именно – не позволяла генерировать снижение пропускной способности [30], режимы отставания, свободное движение в потоке или внезапную перегрузку.

Г. Гринберг (H. Greenberg) в 1959 предположил логарифмическую связь между скоростью и плотностью [31].

Позднее в 1961 году Л. К. Эди (L.C. Edie) [32] разработал модифицированную модель для несвязанного трафика, которая позволяет количественно описать внезапное изменение состояния, происходящее в транспортном потоке, движущимся из относительно свободного протекающего состояния в состояние остановки – движение и обратно. Эди показал, что данная модель при снижении пропускной способности лучше отражает рассеянные данные.

Несколько лет спустя, в 1965 году, Г.Ф. Ньюэлл (G.F. Newell) [33] ввел понятие запаздывания трафика: при перегрузке, когда отношение плотности скорости при ускорении отличается от отношения плотности скорости при замедлении.

Почти десять лет спустя Третиерир (J. Treiterer) и Дж.А. Майерс (J.A. Myers) [34] показали, что запаздывание трафика может объяснить большую часть наблюдаемой рассеянности транспортного потока.

В 1981 году П.Г. Гиппс (P.G. Gipps, P.G.) в [35] уточняет модель управления безопасным расстоянием до впереди идущего транспортного средства [26]. Предложенная им модель теперь включает два режима. В одном режиме скорость транспортных средств ограничена законным допущением, а в другом режиме скорость уменьшается, поскольку водители сохраняют безопасное расстояние до ведущего транспортного средства. Позднее, с развитием моделей клеточных автоматов и кинематических волн, "модель безопасного расстояния до лидера" заметно упрощается [36, 37, 38]. Используя опыт [25], описывающий процессы сетевого равновесия, Роберт Б. Митчелл и Честер Рапкин в 1954 публикуют результаты исследований в области методологии прогнозирования городских поездок [39]. Предложенная ими методология, основанная на четырех последовательных этапах получила названием модель 4SM (*four step model*). Позднее Марвин Л. Мангейм (Marvin L. Manheim) применил ее как часть в более крупной модели анализа эффективности транспортных систем [40]. Центральное место в этом контексте занимает понятия «спроса и предложения». Согласно [41, 42] они, соответственно, представляют собой трафик, который хочет использовать городскую и дорожную инфраструктуру. Интеграция этого направления в теорию моделирования позволила подойти к созданию трилинейных моделей, представляющих собой ядро современных комплексов стратегического транспортного планирования [43, 44, 45].

Среди современных работ в области развития таких моделей хочется отметить [42–47].

Практическое применение комплексов транспортного моделирование для решения задач на водном транспорте представлено в работах [46, 47]. Однако до настоящего времени, применение трилинейной модели в задачах повышения качества управления внутренними водными пассажирскими перевозками в Санкт-Петербурге рассмотрено не было.

2. Постановка задачи

Целью работы является применение трилинейной модели для оценки эффективности развития транспортной системы Санкт-Петербурга при вводе новой линии ВВГПТ.

3. Описание трилинейной модели

Трилинейная модель [41, 48] способна математически описать процессы создания, распределения и разделения транспортных потоков (ТП). Расчет объема ТП из локаций

района отправления в локации района прибытия производится с использованием определенных данных, полученных в результате специальных натуральных исследований. К таким показателям относятся показатели подвижности населения, социально-демографические и экономические показатели. Вычисление производится отдельно для каждого слоя спроса. Слой состоит из группы транспортных классов, которую образуют целевые треки «место отправления – место прибытия». Последние представляют собой дезагрегированные, транспортные классы (таблица 1), полученные из цепочек транспортной активности.

Перемещение жителей соответствует определенной группе: место отправления (источник) - место прибытия (цель), например: Дом - Учебное заведение.

Таблица 1. Группы транспортных классов [48]

Место отправления - Место прибытия	К	Р	Д	У	До	П
Квартира (К)		КР(1)	КД(1)	КУ(1)	КДо(1)	КП(1)
Работа (Р)	РК	—				РП(1)
Детское учреждение (Д)	ДК					
Учебное заведение (У)	УК					
Учреждение досуговой деятельности (До)	ДоК	ПР(2)	ПП(3)			
Прочее учреждение(П)	КП					

С «создаваемой стороны» к группе «источник-цель» относится как минимум одна базовая группа населения и со «стороны притяжения» как минимум одна величина структуры. Например, к группе Дом–Работа со стороны источника относится основная базовая группа населения «Трудящиеся».

Указанные в таблице 2 группы могут быть разделены на подгруппы по дополнительным признакам и использоваться для создания транспортного спроса. Таким образом, процесс классификации городского населения по слоям спроса задается следующим образом: каждой паре «место отправления – «(i)», «место прибытия – (j)», отражающей определенный слой спроса $DStr_c$ из множества $DStr_c \in DStr$, оператор классификации f_{ψ}^d ставит в соответствие свойство структуры $SG_{i(j)s}$ из множества $SG_{i(j)}$, отражающее этот слой спроса; запишем это в следующем виде:

$$f_{\psi}^d : DStr_c \rightarrow SG_{i(j)s}.$$

Таблица 2.

Свойства структуры и группы людей в слоях спроса [48]

Слой спроса	Свойство структуры /Группа района источника i	
$DStr_c$	$SG_{i(j)s}$	
ДР (WA)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДДет (WK)	МД(КК)	Маленькие дети
ДШ (WB)	Ш(SCH)	Школьники, обучающиеся в ПТУ, студенты
ДС (WD)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДМ (WE)	Ж(EW)	Жители
ДСвоб (WF)	Ж(EW)	Жители
.....

Для каждого слоя спроса, а также группы жителей, использующиеся в нем, определяются степени подвижности (MR). Степень подвижности группы рассчитывается как среднее количество перемещений на человека в день:

$$MR_{pc} = \frac{\text{Кол-во произ-х в СлСпр передв эр р}}{\text{Кол-во людей в группер}}$$

На основе данных социальной структуры населения для всех слоев спроса вычисляется объем ТП из истока Q_{ic} и объем ТП в цель Z_{jc} .

Таким образом, Q_{ic}^{max} и Z_{jc}^{max} являются верхними границами для этих объемов.

Метод расчета определяется в зависимости от того, к какому типу источника–цели относится данная пара действий слоя спроса.

При создании транспортного движения в трилинейной модели используются три типа условий: 1) действие источника равно действию в месте порождения ТП; 2) действие цели равно действию в локации порождения ТП; 3) действие источника и действие цели не равны действию в локации порождения ТП. Последовательно рассмотрим процесс создания транспортного движения, согласно [48]. Будем считать, что перемещение пользователя h начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j и при этом используется транспортное средство k .

I. Тип источник – цель1.

Первый этап. Объем ТП на месте зарождения H :

$$H_{erc} = MR_{erc} B P_{ep} U_{erc};$$

$$H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{erc} B P_{ep} U_{erc}.$$

Второй этап. Объем ТП из источника Q :

$$Q_{Max}: Q_{ic} = H_{ic}.$$

Третий этап. Общий объем потоков V :

$$V_c = \sum_{i=1}^m Q_{ic};$$

$$f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1 \in S}^n \sum ER_{lsc} SG_{ls} V_{lsc}}.$$

Четвертый этап. Объем ТП в месте назначения Z , Z_{Max} :

$$Z_{jc} = f_c \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} V_{jsc};$$

$$Z_{jc} \leq Z_{jc}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} V_{jsc};$$

$$\hat{Z}_{jc} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} V_{jsc};$$

$$\underline{Z}_{jc} \hat{Z}_{jc} \leq Z_{jc} \leq \bar{Z}_{jc} \hat{Z}_{jc};$$

$$Z_{jc}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} V_{jsc}.$$

II. Тип источник – цель 2

Первый этап. Объем ТП в локации порождения H :

$$H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc};$$

$$H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}.$$

Второй этап. Объем ТП в месте назначения Z :

$$Z_{Max}: Z_{jc} = H_{jc}.$$

Третий этап. Общий объем потоков V :

$$V_c = \sum_{j=1}^m Z_{jc};$$

$$f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} V_{lsc}}.$$

Четвертый этап. Объем ТП из источника Q , Q_{Max} :

$$Q_{ic} = f_c \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} V_{isc};$$

$$Q_{ic} \leq Q_{ic}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} V_{isc};$$

$$\hat{Q}_{ic} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} V_{isc};$$

$$\underline{Q}_{ic} \hat{Q}_{ic} \leq Q_{ic} \leq \bar{Q}_{ic} \hat{Q}_{ic};$$

$$Q_{ic}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} V_{isc}.$$

III. Тип источник – цель 3

Первый этап. Объем ТП на месте зарождения H :

$$H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc};$$

$$H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}.$$

Второй этап. Общий объем потоков V :

$$V_c = \sum_{e=1}^m H_{ec}.$$

Третий этап.

Объем ТП из источника Q :

$$Q_{ic} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} V_{isc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} V_{lsc}} V_c.$$

Объем ТП в месте назначения Z :

$$Z_{jc} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} V_{jsc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} V_{lsc}} V_c.$$

Обозначения: c – индекс слоя спроса; e – индекс локации порождения ТП; i – индекс локации истока перемещений; j – индекс локации цели перемещений; s – индекс характеристики структуры; p – индекс группы; m – количество районов в области исследования; MR_{epc} – степень подвижности группы p за единицу времени; ER_{isc} – степень создания свойства структуры s за единицу времени; BP_{ep} – количество людей в группе p ; SG – свойство структуры; u_{epc} – доля перемещений, реализованных в области исследования как внутреннее транспортное движение; V_{isc} – доля свойств структуры, действительная для внутреннего транспортного движения в области исследования; H_{epc} – объем ТП в локации порождения для группы p ; H_{ec} – общий объем ТП в локации порождения; Q_{ic} – объем ТП из источника; Z_{jc} – объем ТП в цель; Q_{ic}^{max} – максимально возможный объем ТП из источника; Z_{jc}^{max} – максимально возможный объем ТП в цель; $\underline{Q}_{ic}, \bar{Q}_{ic}$ – фактор нижней или верхней границы объема ТП из источника; $\underline{Z}_{jc}, \bar{Z}_{jc}$ – фактор нижней или верхней границы объема ТП в цель; Q_{ic}^{pot} – потенциально возможный объем ТП в источнике; Z_{jc}^{pot} – потенциально возможный объем ТП в цели; V_c – общий объем ТП; фактор, который учитывает соблюдение балансового условия $V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j$ при расчете объемов ТП локаций.

С помощью A_i, E_j, M_k обозначаются события о том, что перемещение начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j , при этом используется транспортное средство k .

Предполагается, что эти события независимы, тогда вероятности $P(A_i), P(E_j), P(M_k)$ можно представить, как

$$P(A_i) = \frac{s_i}{\Phi} \phi_{s_i}; P(E_j) = \frac{d_j}{\Phi} \phi_{d_j}; P(M_k) = \frac{tr_k}{\Phi} \phi_{tr_k}.$$

Условные вероятности примут вид:

$$P(A_i|W) = \frac{s_i}{\Phi}; P(E_j|W) = \frac{d_j}{\Phi}; P(M_k|W) = \frac{tr_k}{\Phi},$$

где $\Phi = \sum_i s_i$ – общий ТП.

Таким образом, для всех i, j, k определены условные вероятности наступления события W в виде:

$$L_{ijk} = P(W|(A_i \cap E_j \cap M_k)),$$

или ненаступления события \bar{W} , в виде:

$$\bar{L}_{ijk} = P(\bar{W}|(A_i \cap E_j \cap M_k)) = 1 - L_{ijk}.$$

Из предположения о том, что ТП $\rho_{i,j,k}$ пропорциональны условным вероятностям $P(\bar{W}|(A_i \cap E_j \cap M_k))$, следует что:

$$\rho_{i,j,k} = P(A_i \cap E_j \cap M_k | W) \cdot \Phi = \frac{P(A_i)P(E_j)P(M_k)P(W|(A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P(A_{i'})P(E_{j'})P(M_{k'})P(W|(A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}))} \cdot \Phi.$$

Вероятность может быть квантифицирована с помощью установок, которые можно проверить эмпирическим путем. Базовая трилинейная модель с условиями контрольных сумм транспортных корреспонденций задается в виде:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} = s_i, \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} = d_j, \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j,k} = tr_k, \rho_{i,j,k} = L_{i,j,k} \phi_{s_i} \phi_{d_j} \phi_{tr_k},$$

где $L_{i,j,k}$ – вероятность оценки; $\phi_{s_i}, \phi_{d_j}, \phi_{tr_k}$ – калибровочные коэффициенты, содержащие информацию о транспортном предпочтении.

Трилинейная модель позволяет учитывать данные с навигационных систем и с высокой степенью достоверности оценить величину транспортного предложения и транспортного спроса.

Заключение

Рассмотренная трилинейная модель была использована в решении задачи анализа эффективности развития внутригородского водного пассажирского вида транспорта (аквабус) в Санкт-Петербурге.

Особенности формирования исходных данных и характеристика разрабатываемой маршрутной сети частично представлена в [48, 49].

В результате моделирования была получена эюра перераспределения распределения транспортных потоков рис. 3.

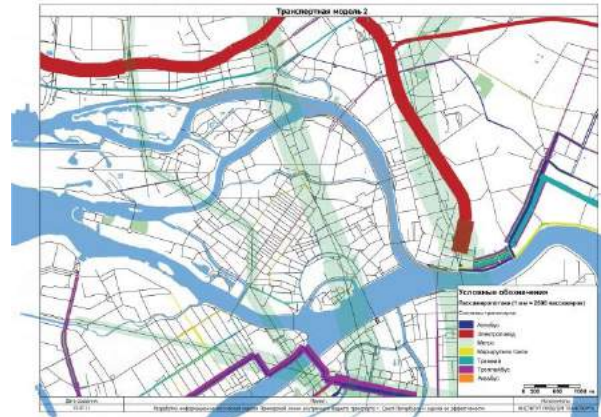


Рис. 3. Эюра распределения транспортных потоков при вводе ВВГПТ в г. Санкт-Петербурге

Было установлено, что величина отклонения пассажиропотока на УДС не превышает 0.1%. (таблица 3).

Таблица 3.

Прогнозный расчет суточного пассажиропотока на внутренней сети метрополитена (пасс/сут)

Ст-ция метрополитена	До ввода ВВГПМ ПЛ		После ввода ВВГПМ ПЛ	
	выход	Вход	выход	вход
Приморская	21919	24509	21914	24520
Старая деревня	14759	15585	14700	15532
Василеостровская	36898	40031	36881	40011
Крестовский остров	2876	2255	2870	2241
Черная речка	18965	20556	18960	20541
Лесная	13794	12454	13794	12454
Выборгская	22668	23774	22639	23770
Площадь Ленина	60592	60745	60571	60741
Чернышевская	38354	32639	38352	32639
Петроградская	17767	5215	17767	5218
Горьковская	21114	23641	21123	23635
Чкаловская	9989	10953	9980	10950

Адекватность результатов моделирования и низкая величина отклонения обосновывается данными по перевозкам на Приморской линии (ПЛ) ВВГПТ в течение недели.

Модели показали высокую скорость сходимости при работе с матрицами большой размерности.

Таким образом, применение трилинейной модели позволило адекватно оценить величину изменения транспортных нагрузок на расчетных участках улично-дорожной сети и прилегающих станциях метрополитена в результате введения нового маршрута водного городского пассажирского транспорта.

Развитие подобных систем моделирования [48, 50] согласуется с моделями систем интеллектуального управления [51, 52] и может быть использованы в обобщенной системе управления транспортом мегаполиса [53–55].

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 16-31-00306 в рамках проекта «Построение модели интеллектуального управления городскими транспортными потоками».

Литература

1. European Commission I Sustainable Urban Mobility. Sustainable Urban Mobility: European Policy, Practice and Solutions. EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Mobility and Transport. Directorate - Investment, Innovative & Sustainable. Transport. Unit B4 - Sustainable & Intelligent Transport. 2017. 40P. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-sustainable-urban-mobility-european-policy-practice-and-solutions.pdf>
2. Schrank D., Eisele B., Lomax T., Bak J. 2015 Urban Mobility Scorecard . The Texas A&M Transportation Institute and INRIX. August 2015. 47P.
3. Петрович М.Л., Истомина Л.Ю., Жеблиенок М.А. и др. Аналитическая записка «Транспортные проблемы Санкт-Петербурга, решаемые на уровне комплексного планирования территориальной транспортной системы». ООО «Лаборатория градопланирования», Санкт-Петербург, 2015г. http://labgrad.ru/d/180205/d/01_analiticheskayazapiska_problemytssspb29_05_2015.pdf
4. Селиверстов С.А. Разработка показателей транспортной обеспеченности. Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 4 (45). С. 48-63.
5. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Прогнозирование загрязнения воздуха отработавшими газами двигателей судов и автотранспорта. Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1 (68). С. 59-62
6. Carlos D. & Phillips M. Transport, environment and health. WHO regional publications. European series; No. 89, 86P. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/107336/1/E72015.pdf>
7. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (СО₂): учебное пособие/ СПбГТУРП.– СПб., 2014. – 52 с. – ISBN 978-5-91646-071-1.
8. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Обзор показателей транспортной обеспеченности мегаполиса. Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 237-247
9. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса. Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 2 (50). С. 91-96.
10. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О разработке показателей анализа оценки транспортной составляющей в структуре городского квартала. Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 4 (52). С. 55-69
11. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Разработка показателей интегрального развития транспортной системы мегаполиса. Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 5 (30). С. 156
12. The Millennium Development Goals Report 2005. United Nations New York, 2005. P.48. <https://unstats.un.org/unsd/mi/pdf/MDG%20Book.pdf>
13. Caris A., Janssens G.K., Macharis C. Modelling and optimising the inland waterway network in Belgium. 18P. <https://doclib.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/1389/1/modelling%20and%20optimising.pdf>
14. S.A. Seliverstov, I.G. Malygin, A.L. Starichenkov, R.R. Muksimova, V.A. Grigoriev, A.N. Asaul. Modeling of megalopolis traffic flows with the introduction of a new line of water intercity passenger transport. Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017. pp. 278-280. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970560. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970560/?reload=t.>
15. Ya.A. Seliverstov, I.G. Malygin, V.I. Komashinskiy, A.A. Tarantsev, N.V. Shatalova, V.A. Petrova. The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations. Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017. pp. 284-287. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970562. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970562/>
16. Adams W. F. Road traffic considered as a random series // J.Inst. Civil Rengrs. 1936. Vol. 4. P. 121–130.
17. Greenshields B.D. Highway Res. Board Proc. Vol. 13. 1933.
18. Greenshields, B.D. A study of traffic capacity. in Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Highway Research Board. 1935.
19. Raff M.S., The distribution of blocks in an uncongested stream of automobile traffic, J. Am. Stat. Soc. 46, 114 (1951).
20. Tanner J.C., The delay to pedestrians crossing a road, Biometrika 38, pp383-342 (1951).
21. Goodman L.A., On the Poisson-Gamma Distribution Problem, Ann. Inst. Statist. Math., 3, 123—125 (1952).
22. Ф. Хейт. Математическая теория транспортных потоков. Пер. с англ. Е. Г. Коваленко Под ред. д-ра техн. наук И.Н. Коваленко. Издательство «МИР» Москва 1966. 287 с.
23. Knight F. H. Some fallacies in the interpretation of social cost // The Quarterly Journal of Economics. 1924. V. 38. №4. P. 582–606.
24. Piugou A. C. The economics of welfare, London: MacMillan, 1932, 4-th edition. (Русский перевод: Пигу А.С. Экономическая теория благосостояния Т. 1–2, Сер. Экономическая мысль Запада, М.: Прогресс, 1985).
25. Wardrop, J. G. Some theoretical aspects of road traffic research. –Proc. Inst. Civ. Eng. Part II, 1952, 1(2), p. 325 – 365.
26. Pipes, L.A., An operational analysis of traffic dynamics. Journal of applied physics, 1953. 24(3): p. 274-281.
27. Lighthill MJ, Whitham GB (1955a) On kinematic waves I: flood movement in long rivers. Proc R Soc Lond Ser A Math Phys Sci 229(1178):281–316
28. Lighthill MJ, Whitham GB (1955b) On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads. Proc R Soc Lond Ser A Math Phys Sci 229(1178):317–345
29. Richards P.I. Shock Waves on the Highway // Oper. Res, V.4. 1956. pp. 42–51

30. Hans van Lint, Serge P. Hoogendoorn, Marco Schreude. Multi-Class First Order Traffic Flow Modeling. *Traffic and Granular Flow '07*. 2009, pp 421-426
31. Greenberg, H., (1959), "An Analysis of Traffic Flow," *Operations Research*, 7, pp. 78–85.
32. Edie, L. C., Car following and steady state theory for noncongested traffic, *Operations Research*, 9, (1961), p66-76
33. Newell, G.F. Instability in dense highway traffic, a review. in *The 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1963. 1965.
34. Treiterer, J. and J.A. Myers. The hysteresis phenomenon in traffic flow. in *Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1974. 1974. Elsevier.
35. Gipps, P.G., A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1981. 15(2): p. 105-111.
36. Newell, G.F., *A simplified car-following theory: a lower order model*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002. 36(3): p. 195-205.
37. Daganzo, C.F., *In traffic flow, cellular automata = kinematic waves*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006. 40(5): p. 396-403.
38. Bourrel, E. and J.-B. Lesort, *Mixing Microscopic and Macroscopic Representations of Traffic Flow Hybrid Model Based on Lighthill-Whitham-Richards Theory*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003. 1852: p. 193-200.
39. Robert B. Mitchell and Chester Rapkin. *Urban Traffic: A Function of Land Use*. Columbia University Press, New York, 1954.
40. Marvin L. Manheim. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1979.
41. Maerivoet S and De Moor B. *Transportation Planning and Traffic Flow Models*. Departement Elektrotechniek. ESAT-SCD (SISTA) / TR 05-155. July 2005.
42. David E. Boyce. Forecasting travel on congested urban transportation networks: Review and prospects for network equilibrium models. In *Proceedings of TRISTAN V: The Fifth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Le Gosier, Guadeloupe, June 2004.
43. Helbing, D., *Modeling multi-lane traffic flow with queuing effects*. *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*, 1997. 242(1-2): p. 175-194.
44. Hoogendoorn, S.P. and P.H.L. Bovy, *Generic gas-kinetic traffic systems modeling with applications to vehicular traffic flow*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001. 35(4): p. 317-336.
45. Tampère, C.M.J., B. van Arem, and S.P. Hoogendoorn, Gas-Kinetic Traffic Flow Modeling Including Continuous Driver Behavior Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003. 1852: p. 231-238.
46. L. Chen, J. Mou H. Ligteringen. Simulation of Traffic Capacity of Inland Waterway Network. *International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models 2013*, Delft, The Netherlands. 2013. 12 p.
47. Nelson, K.; Camp, J.; Philip, C. Navigable Inland Waterway Transportation Modeling: A Conceptual Framework and Modeling Approach for Consideration of Climate Change Induced Extreme Weather Events. *SMART RIVERS 2015*. 9p.
48. Д. Лозе «Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта – обзор теории моделирования»; 7-я международная научно-практическая конференция "Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах", секция «Интеллектуальные и телематические автоматизированные системы управления дорожным движением», Санкт-Петербург, 2006г.
49. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2015. № 2 (30). С. 69-80.
50. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальное построение цепочек транспортной активности городского населения. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 4 (224). С. 91-104
51. Ya. A. Seliverstov, Sv. A. Seliverstov, V. I. Komashinskiy, A. A. Tarantsev, N. V. Shatalova, V. A. Grigoriev. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. 2017. pp. 489-492. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970626. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970626/>
52. Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov, I.G. Malygin, A.A. Tarantsev, N.V. Shatalova, O. Yu. Lukomskaya, I.P. Tishchenko, A.M. Elyashevich. Development of Management Principles of Urban Traffic Under Conditions of Information Uncertainty. *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017, Volgograd, Russia, September 12-14, 2017, Proceedings*. PP. 399-418. DOI: 10.1007/978-3-319-65551-2_29
53. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Использование систем класса ГАТЛОСЭМИ для предупреждения причин возникновения ДТП и неблагоприятных социальных исходов в «умном городе». *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2016. № 1 (236). С. 65-81
54. Мальгин И.Г., Комашинский В.И., Королев О.А. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2017. № 8. С. 3-12.

55. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Королев О.А., Михалев О.А., Аванесов М.Ю. Индустриальные революции и водный транспорт. Информатика и космос. 2017. № 3. С. 38-47.

References

1. European Commission I Sustainable Urban Mobility. Sustainable Urban Mobility: European Policy, Practice and Solutions. EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Mobility and Transport. Directorate - Investment, Innovative & Sustainable. Transport. Unit B4 - Sustainable & Intelligent Transport. 2017. 40P. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-sustainable-urban-mobility-european-policy-practice-and-solutions.pdf>
2. Schrank D., Eisele B., Lomax T., Bak J. 2015 Urban Mobility Scorecard . The Texas A&M Transportation Institute and INRIX. August 2015. 47P.
3. Petrovich M.L., Istomina L.YU., Zheblienok M.A. i dr. Analiticheskaya zapiska «Transportnye problemy Sankt-Peterburga, reshaemye na urovne kompleksnogo planirovaniya territorial'noj transportnoj sistemy». ООО «Laboratoriya gradoplanirovaniya», Sankt-Peterburg, 2015g. http://labgrad.ru/d/180205/d/01_analiticheskayazapiska_problemytsspb29_05_2015.pdf
4. Seliverstov S.A. Razrabotka pokazatelej transportnoj obespechennosti. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. № 4 (45). S. 48-63.
5. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Prognozirovaniye zagryazneniya vozduha otrabotavshimi gazami dvigatelej sudov i avtotransporta. Transport Rossijskoj Federacii. 2017. № 1 (68). S. 59-62
6. Carlos D. & Phillips M. Transport, environment and health. WHO regional publications. European series; No. 89, 86P. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/107336/1/E72015.pdf>
7. Belousov V.N., Smorodin S.N., Lakomkin V.YU. EHnergobezbezhenie i vybrosy parnikovyh gazov (SO₂): uchebnoe posobie/ SPbGTURP.– SPb., 2014. – 52 s. – ISBN 978-5-91646-071-1.
8. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A. Obzor pokazatelej transportnoj obespechennosti megapolisa. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2015. № 5 (52). S. 237-247
9. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A. O metode ocenki ehffektivnosti organizacii processa dorozhnogo dvizheniya megapolisa. Vestnik transporta Povolzh'ya. 2015. № 2 (50). S. 91-96.
10. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A. O razrabotke pokazatelej analiza ocenki transportnoj sostavlyayushchej v strukture gorodskogo kvartala. Vestnik transporta Povolzh'ya. 2015. № 4 (52). S. 55-69
11. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A. Razrabotka pokazatelej integral'nogo razvitiya transportnoj sistemy megapolisa. Internet-zhurnal Naukovedenie. 2015. T. 7. № 5 (30). S. 156
12. The Millennium Development Goals Report 2005. United Nations New York, 2005. P.48. <https://unstats.un.org/unsd/mi/pdf/MDG%20Book.pdf>
13. Caris A., Janssens G.K., Macharis C. Modelling and optimising the inland waterway network in Belgium. 18P. <https://doclib.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/1389/1/modelling%20and%20optimising.pdf>
14. S.A. Seliverstov, I.G. Malygin, A.L. Starichenkov, R.R. Muksimova, V.A. Grigoriev, A.N. Asaul. Modeling of megalopolis traffic flows with the introduction of a new line of water intercity passenger transport. Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017. pp. 278-280. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970560. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970560/?reload=t..>
15. Ya.A. Seliverstov, I.G. Malygin, V.I. Komashinskiy, A.A. Tarantsev, N.V. Shatalova, V.A. Petrova. The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations. Proceed-ings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017. pp. 284-287. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970562. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970562/>
16. Adams W. F. Road traffic considered as a random series // J.Inst. Civil Rengrs. 1936. Vol. 4. P. 121–130.
17. Greenshields B.D. Highway Res. Board Proc. Vol. 13. 1933.
18. Greenshields, B.D. A study of traffic capacity. in Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Highway Research Board. 1935.
19. Raff M.S., The distribution of blocks in an uncongested stream of automobile traffic, J. Am. Stat. Soc. 46, 114 (1951).
20. Tanner J.C., The delay to pedestrians crossing a road, Biometrika 38, pp383-342 (1951).
21. Goodman L.A., On the Poisson-Gamma Distribution Problem, Ann. Inst. Statist. Math., 3, 123—125 (1952).
22. F. Hejt. Matematicheskaya teoriya transportnyh potokov. Per. s angl. E. G. Kovalenko Pod red. d-ra tekhn. nauk I.N. Kovalenko. Izdatel'stvo «MIR» Moskva 1966. 287 c.
23. Knight F. H. Some fallacies in the interpretation of social cost // The Quarterly Journal of Economics. 1924. V. 38. №4. P. 582–606.
24. Piugou A. C. The economics of welfare, London: MacMillan, 1932, 4-th edition. (Russkij pere-vod: Pigu A.S. EHkonomicheskaya teoriya blagosostoyaniya T. 1–2, Ser. EHkonomicheskaya mysl' Zapada, M.: Progress, 1985).
25. Wardrop, J. G. Some theoretical aspects of road traffic research. –Proc. Inst. Civ. Eng. Part II, 1952, 1(2), p. 325 – 365.
26. Pipes, L.A., An operational analysis of traffic dynamics. Journal of applied physics, 1953. 24(3): p. 274-281.
27. Lighthill MJ, Whitham GB (1955a) On kinematic waves I: flood movement in long rivers. Proc R Soc Lond Ser A Math Phys Sci 229(1178):281–316
28. Lighthill MJ, Whitham GB (1955b) On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads. Proc R Soc Lond Ser A Math Phys Sci 229(1178):317–345
29. Richards P.I. Shock Waves on the Highway // Oper. Res, V.4. 1956. pp. 42–51

30. Hans van Lint, Serge P. Hoogendoorn, Marco Schreude. Multi-Class First Order Traffic Flow Modeling. *Traffic and Granular Flow '07*. 2009, pp 421-426
31. Greenberg, H., (1959), "An Analysis of Traffic Flow," *Operations Research*, 7, pp. 78–85.
32. Edie, L. C., Car following and steady state theory for noncongested traffic, *Operations Research*, 9, (1961), p66-76
33. Newell, G.F. Instability in dense highway traffic, a review. in *The 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1963. 1965.
34. Treiterer, J. and J.A. Myers. The hysteresis phenomenon in traffic flow. in *Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1974. 1974. Elsevier.
35. Gipps, P.G., A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1981. 15(2): p. 105-111.
36. Newell, G.F., A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002. 36(3): p. 195-205.
37. Daganzo, C.F., In traffic flow, cellular automata = kinematic waves. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006. 40(5): p. 396-403.
38. Bourrel, E. and J.-B. Lesort, Mixing Microscopic and Macroscopic Representations of Traffic Flow Hybrid Model Based on Lighthill-Whitham-Richards Theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003. 1852: p. 193-200.
39. Robert B. Mitchell and Chester Rapkin. *Urban Traffic: A Function of Land Use*. Columbia University Press, New York, 1954.
40. Marvin L. Manheim. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1979.
41. Maerivoet S and De Moor B. *Transportation Planning and Traffic Flow Models*. Departement Elektrotechniek. ESAT-SCD (SISTA) / TR 05-155. July 2005.
42. David E. Boyce. Forecasting travel on congested urban transportation networks: Review and prospects for network equilibrium models. In *Proceedings of TRISTAN V: The Fifth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Le Gosier, Guadeloupe, June 2004.
43. Helbing, D., Modeling multi-lane traffic flow with queuing effects. *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*, 1997. 242(1-2): p. 175-194.
44. Hoogendoorn, S.P. and P.H.L. Bovy, Generic gas-kinetic traffic systems modeling with applications to vehicular traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001. 35(4): p. 317-336.
45. Tampère, C.M.J., B. van Arem, and S.P. Hoogendoorn, Gas-Kinetic Traffic Flow Modeling Including Continuous Driver Behavior Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003. 1852: p. 231-238.
46. L. Chen, J. Mou H. Ligteringen. Simulation of Traffic Capacity of Inland Waterway Network. In *International Workshop on Next Generation Nautical Traffic Models 2013*, Delft, The Netherlands. 2013. 12 p.
47. Nelson, K.; Camp, J.; Philip, C. Navigable Inland Waterway Transportation Modeling: A Conceptual Framework and Modeling Approach for Consideration of Climate Change Induced Extreme Weather Events. *SMART RIVERS 2015*. 9p.
48. D. Loze «Modelirovanie transportnogo predlozheniya i spros na transport dlya passa-zhirskogo i sluzhebnoy transporta – obzor teorii modelirovaniya»; 7-ya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Organizaciya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya v krupnyh gorodah", sekciya «Intellektual'nye i telematicheskie avtomatizirovannye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem», Sankt-Peterburg, 2006g.
49. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A. Modelirovanie transportnyh potokov megapolisa s vvidom novyh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskogo transporta. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2015. № 2 (30). S. 69-80.
50. Seliverstov YA.A., Seliverstov S.A. Formal'noe postroenie cepochek transportnoj aktivnosti gorodskogo naseleniya. *Nauchno-tekhnicheckie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie*. 2015. № 4 (224). S. 91-104
51. Ya. A. Seliverstov, Sv. A. Seliverstov, V. I. Komashinskiy, A. A. Tarantsev, N. V. Shatalova, V. A. Grigoriev. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. 2017. pp. 489-492. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970626. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7970626/>
52. Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov, I.G. Malygin, A.A. Tarantsev, N.V. Shatalova, O. Yu. Lukomskaya, I.P. Tishchenko, A.M. Elyashevich. Development of Management Principles of Urban Traffic Under Conditions of Information Uncertainty. *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017, Volgograd, Russia, September 12-14, 2017, Proceedings*. PP. 399-418. DOI: 10.1007/978-3-319-65551-2_29
53. Seliverstov YA.A., Seliverstov S.A. Ispol'zovanie sistem klassa GATLOSEHMI dlya up-rezhdeniya prichin vozniknoveniya DTP i neblagopriyatnyh social'nyh iskhodov v «umnom gorode». *Nauchno-tekhnicheckie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie*. 2016. № 1 (236). S. 65-81
54. Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Korolev O.A. Informacionno-upravlyayushchie sistemy vodnogo transporta v period chetvertoj industrial'noj revolyucii. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2017. № 8. S. 3-12.
55. Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Korolev O.A., Mihalev O.A., Avanesov M.YU. Industrial'nye revolyucii i vodnyj transport. *Informaciya i kosmos*. 2017. № 3. S. 38-47.

УДК 629.12.014

БЕЗОТКАЗНОСТЬ 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, дом 5,
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Алексей Леонидович Стариченков

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
, 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5,
тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Аннотация

Определено, что цель управления системы всегда задается в виде ограничения на параметры движения объекта управления, но обеспечивается системой случайным образом по двум практически не зависящим друг от друга причинам. Первая из них – случайное изменение внешних воздействий, действующие на объект управления, которые отражены в математической модели системы и определяют случайность реализации изменения параметров движения, а вторая причина - внезапные отказы элементов схемно-конструктивной реализации, определяемая вероятностью безотказной работы. В статье показано, что для оценки качества работы системы управления движением необходимо использовать единую меру, которая связала бы воедино качество функционирования системы управления в виде среднеквадратической ошибки стабилизации параметра движения судна, и надежность аппаратурной части системы управления движением, реализующей алгоритм управления. Введен термин безотказности управления, обоснованный математически, который является мерой качества построения системы, как по качеству управления, так и по его характеристикам надёжности. Показано, что реализация адаптивных алгоритмов на микропроцессорных контроллерах, позволяет ожидать высокой безотказности управления для различных условий эксплуатации судна, так как он позволяет получить большое увеличение качества управления по управлению курсом судна, в то время как элементная надёжность практически не изменяется. В качестве примера сформулирована и решена задача применения единой меры безотказности управления для оценки канала резервного дистанционного управления курсом судна на воздушной подушке в режиме стабилизации. Доказано математически, что в этом случае необходимо использование в качестве резервного вида управления в режиме стабилизации следящего управления с демпфирование. Показана возможность применения математического выражения безотказности управления для оценки и оптимального выбора вида резервного канала управления, и выведены математические выражения для оценки качества дублирования основного канала управления параметрами движения судна, а также для оценки противоаварийного управления, обеспечивающего безопасность движения судна.

Ключевые слова: аппаратурная часть, безотказность управления, внешние воздействия, математическая модель, мера, надёжность, ошибка, объект управления, система управления движением, функционирование.

NO-FAILURE OPERANION OF MOTION CONTROL SYSTEMS**Valery Y. Kaminsky**

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

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

Dmitriy A. Skorokhodov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher Officer,
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13
Professor of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,
Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376
phone: +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Alexey L. Starichenkov

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,
Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376
phone: +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Abstract

It is determined that the goal of system management is always set in the form of a constraint on the parameters of the control object's movement, but it is provided by the system in a random manner for two reasons that are practically independent of each other. The first of them is a random change of external influences acting on the control object, which are reflected in the mathematical model of the system and determine the randomness of the realization of the change in the motion parameters, and the second reason is the sudden failure of the elements of the circuit-constructive realization, determined by the probability of failure-free operation. The article shows that to assess the quality of the motion control system, it is necessary to use a single measure that would link the quality of the control system functioning in the form of the root-mean-square error of stabilization of the ship's motion parameter and the reliability of the hardware part of the motion control system that implements the control algorithm. The term "trouble-free control", justified mathematically, is introduced, which is a measure of the quality of the system construction, both in terms of management quality and reliability characteristics. It is shown that the implementation of adaptive algorithms on microprocessor controllers allows to expect high reliability of control for various operating conditions of the ship, since it allows to obtain a large increase in the quality of control over the course of the ship, while elemental reliability practically does not change. As an example, the problem of applying a single measure of failure-free control for estimating the channel of remote control of the course of an air-cushion vehicle in the stabilization mode is formulated and solved. It is proved mathematically that in this case it is necessary to use as a backup type of control in the stabilization mode of follow-up control with damping. The possibility of applying the mathematical expression of failure-free control for the estimation and optimal choice of the type of the backup control channel is shown, and mathematical expressions are derived for estimating the quality of duplication of the main control channel for the vessel's motion parameters, and for evaluating the emergency control that ensures the safety of the vessel.

Keywords: hardware part, trouble-free management, external influences, mathematical model. measure, reliability, error, control object, motion control system, operation.

Введение

Большие функциональные нагрузки, возлагаемые на системы управления движением (СУД) с целью повышения эффективности использования судов, приводят к значительному их усложнению. В жизни требования эффективности и сложности являются чаще всего антагонистическими, поэтому задачу достижения наивысшей эффективности систем управления нельзя считать технически корректной без оценки сложности системы, так как современные средства в принципе позволяют реализовать алгоритмы управления любой сложности, а практически приходится сложность ограничивать из-за

массогабаритных характеристик и надежности её аппаратуры [1]. Это требует найти единую меру, которая связала бы воедино качество функционирования и надежность системы управления движением. Анализ зарубежной литературы [2-14] показал, что отсутствуют исследования систем управления в данном направлении. И только в отечественно работе [15] предложен метод поиска структуры алгоритма минимальной сложности, обеспечивающего требуемое качество стабилизации координат объекта управления. Однако этот метод не решает проблемы согласования мер качественных и надежностных характеристик системы. В тоже время только совмещение этих показателей в

единый критерий численной оценки качества построения системы позволяет нам с уверенностью ответить на вопрос «чего стоит» улучшение одних и одновременное ухудшение других характеристик системы.

1. Обоснование единой меры элементарных и функциональных отказов

Цель управления СУД всегда задается в виде ограничения на параметры движения объекта управления (ОУ), но обеспечивается системой случайным образом по двум практически не зависящим друг от друга причинам [16]. Первая из них – случайное изменение внешних воздействий F_i ($i=1-k$), действующие на ОУ, которые отражены в математической модели системы и определяют случайность реализации изменения параметров движения

$$X_l(F_i) \in [-X_l; +X_l] \quad (1)$$

где: | –

– X_l - нижняя граница изменения параметра движения,

+ X_l - верхняя граница изменения параметра движения.

Вторая причина - внезапные отказы элементов схемно-конструктивной реализации, определяемая вероятностью безотказной работы

$$P_R(t) = e^{-\tau_r}; \quad \tau_r = \int_0^t \lambda_r(t) dt \quad (2)$$

где: $\lambda_r(t)$ - интенсивность отказов аппаратурной части системы,

t – время работы СУД.

Так как $\lambda_r(t)$ – суммарная интенсивность отказов аппаратурной части системы, то τ_r есть мера элементарных отказов системы, которая преобразуется в вероятность безотказной работы [16] $P(R) = \exp(-\tau_r)$, изменяющуюся в пределах

$$P(R) \in [0-1] \quad (3)$$

Тогда задача согласования меры (1) и (2) сводится к математическому определению меры

функционального отказа $\tau_F(X_i, F_i)$ как меры события противоположного (1) такого, что

$$\tau_F(X_i, F_i) \leftrightarrow e^{-\tau_{fi}} = P(F_i) \in [0,1] \quad (4)$$

где $P(F_i)$ вероятность реализации события (1). Учитывая при этом различную физическую природу случайных событий отказов, единая оценка вероятности того, что система обеспечит удержание в границах, заданных целью управления, характеризуется выражением

$$P(F_i \& R_i) = P(F_i)P(R_i) = e^{-\tau_{si}}; \quad (5)$$

$$\tau_{si} = \tau_{ri} + \tau_{fi}$$

что гарантирует неразличимость мер τ_r, τ_f .

2 Определение функциональной безотказности и качества управления

Будем полагать, что процесс проектирования данной системы находится в стадии моделирования, в результате которого определен алгоритм управления и известны варьируемые его параметры. Как результат моделирования в виде осциллограмм могут быть получены случайные реализации решений дифференциальных уравнений однозначно определяющие синтезируемые показатели качества управления координатами пространственного движения объекта управления (ОУ). Множество случайных реализаций ограничено согласно (1) целью управления. Для оценки динамических свойств системы по математическим ожиданиям и дисперсиям, которые чаще всего применяются для оценки качества работы СУД, правомерно использование уточненного неравенства Чебышева [16]. Неравенство Чебышева справедливо для любой системы управления и одновременно предполагает возможность строгого согласования данной вероятностной меры с оценкой внезапных отказов, что позволяет сконструировать универсальную вероятностную оценку (5) и является оценкой реализации события (1) т.е. определяет функциональную безотказность системы по параметру X_l .

Тогда

$$P(F) \geq e^{-\frac{\sigma_x^2}{(X_i - m_x)^2}}, \quad (6)$$

где:

σ_x^2 - квадрат среднеквадратического отклонения параметра движения ОУ,

m_x - математическое ожидание параметра движения ОУ.

X_i - параметрическое ограничение, характеризующееся динамикой судна или его безопасностью использования.

Поэтому, если обозначить

$$\tau_f = \frac{\sigma_x^2}{(X_i - m_x)^2}, \quad (7)$$

и нестрогое равенство заменить на строгое, что практически всегда оправдано, то функциональная безотказность системы будет полностью определена. Таким образом, функциональная безотказность системы по показателю качества управления параметра движения, вычисленная по условию случайного изменения внешних воздействий будет иметь вид

$$P(F_i) = e^{-\frac{\sigma_{xi}^2}{(X_i - m_{xi})^2}}, \quad (8)$$

где: $(X_i - m_{xi})^2$ - функциональный запас системы управления по качеству её работы.

В этом случае математически определенным оказывается критерий безотказности управления (5)

$$P(F_i \& R_i) = e^{-\left[\frac{\sigma_{xi}^2}{(X_i - m_{xi})^2} + \int_0^t \lambda_{si}(t) dt \right]}. \quad (9)$$

Причем, так как величина дисперсии σ_{xi}^2 и функционального запаса $(X_i - m_{xi})^2$ характеризует качество функционирования системы по X_i , то (9) для случая одноуровневой

системы является также и критерием качества ее функционально – надежностного построения СУД, т.е.

$$P(F_i \& R_i) = K(F_i, R_i). \quad (10)$$

Безотказность управления системы, цель управления которой задана несколькими показателями качества управления, целесообразно задавать набором ограничений на безотказность управления по каждому из показателей качества управления, что соответствует реальному положению, при котором каждый из показателей качества управления в различной степени «отвечает» за безотказность и тем более за безопасность ОУ.

Анализ этих зависимости (9) позволяет сформулировать следующие выводы:

- увеличение функционального запаса увеличивает безотказность функционирования;
- снижение качества стабилизации снижает безотказность функционирования;
- чем выше качество стабилизации, тем меньше влияние функционального запаса на безотказность функционирования.

3 Оценка качества функционирования системы управления движением

Конфликтность задачи заключается в том, что улучшая качество функционирования применением, например, адаптивного алгоритма управления, что усложняет приборную реализацию канала управления и, следовательно, ухудшает его аппаратурную безотказность. Так как безотказность управления системы

$$P(F_i \& R_i) = e^{-\tau_{fi}} e^{-\tau_{ri}} \quad (11)$$

является также мерой качества функционально-надежностного построения системы, то вариант с усложненным алгоритмом управления будет целесообразным по сравнению с первым, если его оценка по (11) окажется не хуже. Это приводит к неравенству

$$P_2(F_2)P_2(R_2) \geq P_1(F_1)P_1(R_1) \quad (12)$$

$$\tau_{f2} + \tau_{r2} \geq \tau_{f1} + \tau_{r1},$$

которое сохраняет конфликтность ситуации при проектировании и, следовательно, представляет

собой математическую формулировку оптимальности решения данной задачи. Поэтому оценка оптимальной сложности управления должна производиться с учетом этих особенностей. Использование принципов адаптации позволяет получить неизменное качество управления при значительных изменениях характеристик ОУ и внешних ветроволновых возмущений, обеспечивая тем самым постоянство безотказности управления системы

$$P(F\&R) = \text{const} \tag{13}$$

4 Резервирование каналов управления

Учитывая согласованность меры функциональных и элементарных отказов [1], в соответствии с аксиоматикой теории надежности безотказность управления системы с резервным, полностью заменяющим основной, каналом управления будет иметь вид

$$P(F \& S) = 1 - (1 - \exp(-\tau_{so})) * (1 - \exp(-\tau_{sp})) \tag{14}$$

где $\tau_{so} = \tau_{of} + \tau_{or}$;

$$\tau_{sp} = \tau_{pf} + \tau_{pr}$$

τ_{or} , τ_{pr} - меры элементарных отказов основного и резервного каналов,

τ_{of} , τ_{pf} - меры функциональных отказов основного и резервного каналов.

В это же время можно показать, что оценка качества функционирования системы с резервным каналом управления имеет вид

$$K(\Phi) = e^{-\left(\tau_{of} + \tau_{pf}\right)} \tag{15}$$

Это очевидно имеет смысл, т.к. введение резервного канала управления основывается только возможностью появления внезапных отказов в основном канале. Если же предположить, что основной канал управления по безотказности элементов идеален (безотказен), то введение резервного способа управления, уступающего по качеству функционирования основному, представляется лишним смысла и

это показывает формула (15) уменьшением оценки качества функционирования всей системы в большей степени, чем функционально хуже резервный способ управления. При этом элементарная безотказность системы, как известно, возрастает и критерий оценки качества построения двухуровневой системы приобретает вид

$$K(\Phi, H) = e^{-\left(\tau_{of} + \tau_{pf}\right)} * \left[1 - \left(1 - e^{-\tau_{or}} \right) \left(1 - e^{-\tau_{pr}} \right) \right] \tag{16}$$

Учитывая, что оценка качество построения системы только по каналу автоматического управления определяется критерием безотказности, введение резервного канала не должно ухудшать качество системы в целом при условии

$$K(\Phi, H) \geq P(F_o) \cdot P(R_o);$$

$$e^{-\left(\tau_{of} + \tau_{pf}\right)} * \left[1 - \left(1 - e^{-\tau_{or}} \right) \cdot \left(1 - e^{-\tau_{pr}} \right) \right] \geq P(F_o) \cdot P(R_o) \tag{17}$$

или

$$P_o(F) \cdot P_p(F) * \left[1 - \left[1 - P_o(R) \right] \cdot \left[1 - P_p(R) \right] \right] \geq P_o(F) \cdot P_o(R) \tag{18}$$

Условие (5) приводит к неравенству

$$P_o(R) \cdot \left[1 - \left[1 - P_o(R) \right] \cdot \left[1 - P_p(R) \right] \right] \geq P_o(R) \tag{19}$$

из которого и определяется оптимум между качеством функционирования и безотказностью

резервного канала управления. Т.е. наличие резервного способа управления ставит задачу построения резервного канала в таком виде, чтобы оценка качества построения системы, содержащей основной и резервный конструктивно-самостоятельные каналы управления, вычисленная по (16) была бы не ниже для основного канала управления

$$P(F_o) \cdot P(R_o) = e^{-\tau_{of}} \cdot e^{-\tau_{or}} \quad (20)$$

Рассмотрим в качестве примера качество стабилизации судна на воздушной подушке (СВП) по курсу [1]. В этом случае для системы управления движением (СУД), обеспечивающей стабилизацию СВП по курсу, имеем вероятность элементной безотказности работы $P_o(R) = 0,95$.

Безотказность функционирования для основного режима автоматической стабилизации СВП на курсе при $\sigma_0 = \pm 1,0^\circ$ вычислим по формуле [1]

$$P_o(F) = e^{-\frac{\sigma_{0\phi}^2}{(X_{0\phi} - m_{0\phi})^2}}, \quad (21)$$

где m_ϕ - математическое ожидание по курсу ϕ равно 0° , а параметрическое ограничение равно $X_{0\phi} = \pm 10^\circ$ по требованиям функционирования СВП по прямому назначению. Получим $P_o(F) = 0,99$.

Рассчитаем безотказность управления СВП для основного режима автоматической стабилизации судна на курсе (19), получим $P(F_o) \cdot P(R_o) = 0,94$.

По формуле

$$P_p(F) = e^{-\frac{\sigma_{p\phi}^2}{(X_{p\phi} - m_{p\phi})^2}} \quad \text{определим}$$

качество функционирования системы с резервным видом управления (следающее управление), учитывая, что $\sigma_{p\phi} = \pm 5,7^\circ$, параметрическое ограничение тоже, что и для автоматического вида управления $X_{p\phi} = \pm 10^\circ$ и элементная безотказность $P_p(R) = 0,98$. В результате получим $P_p(F) = 0,72$ и по формуле $P(F_p) \cdot P(R_p)$

получим безотказность управления равную 0,7. Т.е. она значительно ниже безотказности управления в режиме автоматической стабилизации и в данном случае никакое повышение элементной безотказности канала следающего управления не позволит приблизиться к безотказности управления основного канала ввиду низкой безотказности функционирования резервного вида управления. Т.е. по выполнению основной функции – управление движением по использованию СВП по прямому назначению данный вид, как резервный, не целесообразен к использованию. Его применение может быть оправдано исходя только из обеспечения безопасности движения СВП, что определяется увеличением значения функционального запаса до величины $X_\phi = \pm 20^\circ$. В этом случае безотказность функционирования будет равна 0,923, а безотказность управления $P(F_{pc}) \cdot P(R_{pc}) = 0,923 \times 0,98 = 0,9$, что является достаточным для безаварийной эксплуатации судна.

При использовании следающего вида управления с демпфированием, как резервного для основного режима функционирования СВП, получено качество стабилизации $\sigma_p = \pm 2,1^\circ$, которое обеспечивает функциональную безотказность $P_{pd}(F) = 0,96$. При обеспечении элементной безотказности управления такого канала $P_{pd}(R) = 0,98$ получим безотказность управления $P_{pd}(F) \cdot P_{pd}(R) = 0,94$, равную безотказности управления в режиме автоматической стабилизации курса судна. Поэтому его целесообразно использовать в качестве резервного вида управления СВП по прямому назначению.

5 Дублирования каналов управления движением

Необходимость дублирования диктуется возможностью появления элементарных отказов в СУД, так как – дублированием с низким качеством функционирования лишено смысла. Другими словами, аналогично задаче проектирования резервного канала управления необходимо определенным образом соотносить качество функционирования и безотказность кправления судном, чтобы с позиции качества системы в целом ее дублирование оказалось целесообразным. Дублирование можно

рассматривать как предельный случай введения в систему резервного канала управления с функциональной и элементной безотказностью такими же как у основного канала. Тогда качество построения дублированной системы по критерию качества можно записать следующим образом

$$K_{\partial}(\Phi, H) = e^{(-2\tau_{df}) \cdot \left(1 - \left(1 - \exp(-\tau_{dr})\right)^2\right)} \quad (22)$$

Дублирование будет целесообразным, если оценка окажется не меньше, чем (16). Отсюда

$$\tau_{df} \leq \ln(2 - e^{-\tau_{ds}}) \quad (23)$$

которое определяет необходимое соотношение между τ_{df} и τ_{ds} , т.е условие целесообразности дублирования.

Принимая во внимание, что дублирование системы определяется необходимостью улучшения ее надежностных характеристик, а также то, что различные показатели качества управления имеют различную значимость в задаче обеспечения безотказности управления судном, в качестве исходной позиции будем полагать, что безотказность управления системы по основному показателю качества определяется выражением(18). Согласно безотказности управления n-кратное дублирование системы дает численную оценку безотказности управления, вычисленную по формуле

$$P_n(F) \cdot P_n(R) = 1 - \left(1 - e^{-\tau_{1f}} \cdot e^{-\tau_{1s}}\right)^n, \quad (24)$$

которая при $n \geq 2$ будет всегда выше полученной для одного канала управления.

Как нам уже известно, по формуле для $P(F)$ можно оценить качество функционирования системы $K(\Phi)$. Это дает право использовать критерий качества построения системы в форме (16) при n-кратном дублировании данной системы. В результате оценка качества такой системы определяется выражением

$$K(\Phi, H) = e^{-n\tau_f} \left(1 - \left(1 - e^{-\tau_s}\right)^n\right), \quad (25)$$

Очевидно n- кратное дублирование системы с позиции оценки качества будет целесообразным только в случае, если окажется, что

$$K(\Phi, H) \geq P_1(F) \cdot P_1(R) \quad (26)$$

6 Оценка безотказности управления в аварийных ситуациях

Выбор СУД для нормальных условий эксплуатации судна должен быть неотделим от анализа и синтеза ее поведения в аварийных ситуациях. Т.е. СУД, на которую возложена вычислительная задача обеспечения нормальной работы при аварии судна или его технических средств, должна гарантировать, что его управление будет обеспечено внутри области безопасного движения.

Математической основой для разработки критерия безопасности управления может также служить критерий безотказности управления

$$K(\Phi, H) = e^{-\tau_s}, \quad \tau = \tau_{fj} + \tau_s; \quad (27)$$

Действительно, помимо граничных значений показателя качества управления, заданных целью из условий эффективного использования судна, любое судно характеризуется граничными значениями показателей качества, выход за пределы которых удовлетворяет условиям безопасности движения. Так, например, если цель канала стабилизации крена судна на подводных крыльях (СПК) задана в виде среднеквадратической ошибки угла крена из условий его функционирования, то всегда существует некоторая большая величина крена X_{θ} , выход за которую не отвечает условиям

безопасности. Т.е. можно говорить, что пространство эффективного движения судна "вложено" в пространство его безопасного движения. Учитывая при этом, что безопасность управления ищется в форме некой вероятностной оценки, безотказность управления в форме (13) подстановкой в функциональную составляющую граничного значения показателя качества управления по условиям безопасности движения судна, оценить степень сближения системы с

границей области, за пределами которой движение судна не отвечает условиям безопасности.

Та, например, для СПК по условиям использования по назначению $\sigma = \pm 0,7^\circ$, по условиям безопасности движения $X_{\text{об}} = \pm 9^\circ$ и

Закключение

1. Определено, что цель работы системы управления движением всегда задается в виде ограничения на параметры движения объекта управления, но обеспечивается системой случайным образом по двум практически не зависящим друг от друга причинам. Первая из них – случайное изменение внешних воздействий – ветро-волновых возмущений, действующие на объект управления, которые отражены в математической модели системы, и определяют случайность реализации изменения параметров движения, а вторая причина - внезапные отказы элементов схемно-конструктивной реализации канала управления движением, определяемая вероятностью безотказной работы.

2. Доказано, что для оценки качества работы системы управления движением необходимо использовать единую меру, которая связала бы воедино качество функционирования системы управления в виде среднеквадратической ошибки стабилизации параметра движения судна, и надежность аппаратурной части системы управления движением, реализующей алгоритм управления. Выведено математическое выражение для возможности оценки единой меры, применимое для практических целей.

3. Введён термин безотказности управления, обоснованный математически, который является мерой качества построения системы управления, как по качеству управления параметрами движения судна, так и по её характеристикам надёжности, применение которого возможно для систем, обеспечивающих стабилизацию параметра движения объекта управления.

4. Предложенная оценка безотказности управления позволила математически оценить реализацию адаптивных алгоритмов управления курсом судна на микропроцессорных контроллерах, так как для различных условий эксплуатации судна, он позволяет получить большое увеличение качества управления по управлению курсом судна, в то время как элементная надёжность практически не изменяется.

5. Сформулирована и решена задача применения единой меры безотказности управления для оценки канала резервного дистанционного управления курсом судна на воздушной подушке в

при $m_\theta = 0^\circ$. При величине элементной безотказности, равной $P_\sigma(R) \cong 0,99$, и в

соответствие с (7) безопасность управления будет составлять

$$K_\sigma(\Phi, H) = P_\sigma(F) \cdot P_\sigma(R) = 0,96.$$

режиме стабилизации. Доказано математически, что в этом случае необходимо использование в качестве резервного вида управления в режиме стабилизации следящего управления с демпфированием.

6. Показана возможность применения математического выражения безотказности управления для оценки качества дублирования основного канала управления параметрами движения судна. Выведено математическое выражение, определяющее целесообразность n -кратного дублирования канала управления.

7. Математической основой для разработки критерия безопасности управления в аварийных ситуациях движения судна также может служить критерий безотказности, так как помимо граничных значений показателя качества управления, заданных целью из условий эффективного использования судна, любое судно характеризуется граничными значениями показателей качества, выход за пределы которых удовлетворяет условиям безопасности движения.

Благодарности

Публикация выполнена в рамках государственного задания №8.7141.2017/8.9 Минобрнауки России.

The research work was supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task #8.7141.2017/8.9).

Литература

1. Д.А.Скороходов. Системы управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания. СПб. ЦНИИ «Электроприбор». 2000.- 282 с.
2. Alex E. Ockfen, Konstantin I. Matveev, Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 1, Issue 1, September 2009, Pages 1-12, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0001>.
3. Roberto Muscia, Giacomo Sciuto, Analytic study of a new conceptual propulsion device for ships, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 2, Issue 2, June 2010, Pages 75-86, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0022>.
4. Roberto Muscia, Giacomo Sciuto, Analytic study of a new conceptual propulsion device for ships, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 2, Issue 2, June 2010, Pages 75-86, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0022>.
5. Jung-Hun Kim, Jung-Eun Choi, Bong-Jun Choi, Seok-Ho Chung, Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 3, September 2014, Pages 715-722, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0207>.
6. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 2, June 2014, Pages 323-332, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0182>.
7. Seung-Jae Lee, Jun-Hyeok Lee, Jung-Chun Suh, Further validation of the hybrid particle-mesh method for vortex shedding flow simulations, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 6, November 2015, Pages 1034-1043, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0072>.
8. Zaopeng Dong, Lei Wan, Yueming Li, Tao Liu, Guocheng Zhang, Trajectory tracking control of underactuated USV based on modified backstepping approach, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 5, September 2015, Pages 817-832, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0058>.
9. Konstantin I. Matveev, Hydrodynamic modeling of semi-planing hulls with air cavities, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 3, May 2015, Pages 500-508, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0036>.
10. Wei Yang, Zhigang Yang, Maurizio Collu, Longitudinal static stability requirements for wing in ground effect vehicle, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 259-269, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0018>.
11. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 364-374, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0025>.
12. Omer Kemal Kinaci, A numerical parametric study on hydrofoil interaction in tandem, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 1, January 2015, Pages 25-40, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0003>.
13. Qing Jia, Wei Yang, Zhigang Yang, Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 8, Issue 2, March 2016, Pages 209-217, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.03.001>.
14. Resistance reduction on trimaran ship model by biopolymer of eel slime. Y. Yanuar, G. Gunawan, M. A. Talahatu, R. T. Indrawati, A. Jamaluddin 95-102
15. Куриленко А.М., Ледовский А.Д.. Качество судовых динамических систем управления. - СПб.: Судостроение. 1994.-176 с.: ил.

References

1. D.A.Skorohodov. Sistemy upravleniya dvizheniem korablej s dinamicheskimi principami podderzhanija. SPb. CNII «Jelektroprigor». 2000.- 282 с.
2. Alex E. Ockfen, Konstantin I. Matveev, Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 1, Issue 1, September 2009, Pages 1-12, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0001>.

3. Roberto Muscia, Giacomo Sciuto, Analytic study of a new conceptual propulsion device for ships, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 2, Issue 2, June 2010, Pages 75-86, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0022>.
4. Roberto Muscia, Giacomo Sciuto, Analytic study of a new conceptual propulsion device for ships, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 2, Issue 2, June 2010, Pages 75-86, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0022>.
5. Jung-Hun Kim, Jung-Eun Choi, Bong-Jun Choi, Seok-Ho Chung, Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 6, Issue 3, September 2014, Pages 715-722, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0207>.
6. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 6, Issue 2, June 2014, Pages 323-332, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0182>.
7. Seung-Jae Lee, Jun-Hyeok Lee, Jung-Chun Suh, Further validation of the hybrid particle-mesh method for vortex shedding flow simulations, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 6, November 2015, Pages 1034-1043, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0072>.
8. Zaopeng Dong, Lei Wan, Yueming Li, Tao Liu, Guocheng Zhang, Trajectory tracking control of underactuated USV based on modified backstepping approach, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 5, September 2015, Pages 817-832, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0058>.
9. Konstantin I. Matveev, Hydrodynamic modeling of semi-planing hulls with air cavities, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 3, May 2015, Pages 500-508, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0036>.
10. Wei Yang, Zhigang Yang, Maurizio Collu, Longitudinal static stability requirements for wing in ground effect vehicle, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 259-269, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0018>.
11. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 364-374, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0025>.
12. Omer Kemal Kinaci, A numerical parametric study on hydrofoil interaction in tandem, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 7, Issue 1, January 2015, Pages 25-40, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0003>.
13. Qing Jia, Wei Yang, Zhigang Yang, Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 8, Issue 2, March 2016, Pages 209-217, ISSN 2092-6782, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.03.001>.
14. Resistance reduction on trimaran ship model by biopolymer of eel slime. Y. Yanuar, G. Gunawan, M. A. Talahatu, R. T. Indrawati, A. Jamaluddin 95-102
15. Kurilenko A.M., Ledovskij A.D.. Kachestvo sudovyh dinamicheskikh sistem upravlenija.-SPb.:Sudostroenie. 1994.-176 s.: il.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 517.925

**КРИТЕРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
И НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ****Борис Павлович Башуров**

доктор технических наук, профессор
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93

Геннадий Анатольевич Зеленков

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и управления процессами на водном транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: mathshell@mail.ru

Михаил Сергеевич Лопатин

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: quadropoint@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты авторов по исследованию робастного поведения интервальных полиномов. Задачи исследования устойчивости и неустойчивости при наличии неопределенности в пространстве параметров системы автоматического управления часто возникают на этапах анализа и синтеза таких систем. Интервальное описание неопределенности в коэффициентах характеристического полинома матрицы системы первого приближения является одним из наиболее простых и часто используемых в инженерной практике. В статье показаны особенности поведения вещественных и комплексных семейств полиномов.

Исследование робастно неустойчивых систем, поведение которых описывается характеристическими полиномами, формирует теоретическую базу для разработки быстродействующих и экономичных регуляторов, которые позволят быстро и с минимальными энергетическими и временными затратами изменять параметры системы. Результаты являются теоретическими, но они направлены на решение проблем, возникающих при создании и эксплуатации судовых систем управления.

Ключевые слова: Динамические системы, системы управления, устойчивость, робастная неустойчивость, интервальная неопределенность.

**GUIDELINES FOR PREPARATION OF ARTICLES FOR THE ACADEMIC
PERIODICAL «MARINE INTELLIGENCE TECHNOLOGIES»****Boris P. Bashurov**

the professor, Dr.Sci.Tech.,
Admiral Ushakov State Maritime University
353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93

Gennadiy A. Zelenkov

the docent, Dr. Sci. Phys.-Math.,
the professor of department of system analysis and process management on water transport
Admiral Ushakov State Maritime University
353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93
e-mail: mathshell@mail.ru

Mihail S. Lopatin

Ph. D., associate professor of department of ship's mechanical plants operation
Admiral Ushakov State Maritime University
353918, Novorossisk, Lenin's avenue, 93
e-mail: quadropoint@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of the authors on the study of robust behavior of interval polynomials. Research objectives of stability and instability in the presence of uncertainty in the parameter space of the automatic control often occur at the stages of analysis and synthesis of such systems. Interval description of the uncertainty in the coefficients of the characteristic polynomial of the first approximation system is one of the simplest and most commonly used in engineering practice. The article shows the features of behavior of polynomials with real and complex coefficients.

A study of robust instability of systems whose behavior is described by characteristic polynomials forms a theoretical basis for the development of high-speed and effective controllers. Such controllers will allow changing the parameters of the system quickly and with minimal energy and time. The results are theoretical, but they are aimed to solve problems which appears in development and operating ship control systems.

Key words: Dynamical systems, control systems, stability, robust instability, interval uncertainty.

Введение

В настоящее время при решении задач проектирования и управления судами [4] и энергетическими установками судов учет фактора неопределенности является обязательным инженерным правилом. Не случайно исследованию неопределенности посвящено множество работ за последние 100 лет. Учет неопределенности является одной из составляющих проблемы обеспечения безопасности на морском транспорте. А также качество управления неопределенностью во многих случаях определяет энергоэффективность энергетических установок судов.

Например, самый простой релейный закон регулирования лежит в основе работы судовой системы автоматики, поддерживающей давления в сервисной системе баллонов сжатого воздуха (Service Air Receiver System). Этот воздух применяется в пневматических судовых системах управления, например, судовым котлом. Релейный закон регулирования в такой системе обеспечивает широкие границы изменения давления, например, изменения давления на 15% между уставками регулятора. Т.к. воздух от сервисных баллонов сжатого воздуха поступает на системы управления, то и величина изменения скорости переходных процессов в этих пневматических системах управления также содержит неопределенность. На судах пневматические элементы управления имеют, например, системы дистанционного управления главным двигателем и, системы защиты судовых инверторов. Последние должны срабатывать даже в случае, когда судно обесточено. На судах в настоящее время применяются системы управления с электрическими, электронными, пневматическими, гидравлическими и кинематическими системами управления, каждая из которых имеет свою величину неопределенности как в параметрах устойчивости, так и в параметрах переходных процессов.

Помимо особенностей конструктивного исполнения на величину неопределенности в системах управления влияют шумы различной

природы, износ отдельных элементов систем автоматики или конструктивных элементов энергетических установок, а также влияния других элементов, включенных в ту же систему управления, например, при обеспечении параллельной работы дизель-генераторов.

Учет неопределенности переходных процессов, позволяет оценить экономические характеристики энергетических установок, которые зависят от точности поддержания заданной величины в задаче стабилизации или от качества переходной характеристики при реализации программного управления. Важным с точки зрения безопасности эксплуатации энергетических установок является обеспечение робастной устойчивости. Исследование робастной устойчивости по части переменных, как один из видов робастной неустойчивости, позволяет разработать методы как изменяющие запасы устойчивости по параметрам, определяющим безопасность и эксплуатационную надежность [1] судовых энергетических установок, так и методы, позволяющие установить ограничения на параметры напрямую определяющие экономические показатели эксплуатации судовых энергетических установок.

Настоящая работа посвящена исследованию критериев для управления неопределенностью параметров систем управления с помощью математического аппарата теории автоматического управления.

В статье представлены некоторые результаты авторов по исследованию робастного поведения интервальных полиномов [2,3] и являются продолжением работ известных ученых, обзор которых можно посмотреть в [5]. Задачи исследования устойчивости и неустойчивости при наличии неопределенности в пространстве параметров системы автоматического управления часто возникают на этапах анализа и синтеза таких систем. Интервальное описание неопределенности в коэффициентах характеристического полинома матрицы системы первого приближения является одним из наиболее простых и часто используемых в инженерной практике. Статья разбита на 2 тематических раздела.

1. Приведены аналитические критерии робастной неустойчивости семейств непрерывных полиномов с интервальными ограничениями на коэффициенты (что впервые рассмотрено в [6]), т.е. принадлежности этих семейств классам (n, k) -эквивалентности полиномов для вещественного случая. Причем известные критерии о робастной устойчивости семейств полиномов являются частным случаем полученных теорем.

2. Приведены аналитические критерии робастной неустойчивости семейств непрерывных полиномов с комплексными коэффициентами с интервальными ограничениями на коэффициенты, т.е. принадлежности этих семейств классам (n, k) -эквивалентности полиномов.

1. Аналитические критерии робастного поведения интервальных полиномов с вещественными коэффициентами

Определение 1. Полиномы степени n

$$\varphi(s) = a_0 + a_1s + \dots + a_n s^n, \quad a_n \neq 0 \quad (1)$$

принадлежат классу (n, k) -эквивалентности, если они не имеют нулевых и чисто мнимых корней и в правой полуплоскости находится ровно k корней каждого из этих полиномов, с учетом их кратностей.

Очевидно, $a_0 \neq 0$, а для полиномов с вещественными коэффициентами предполагаем для определенности $a_0 > 0$.

Теорема 1. Пусть семейство полиномов с непрерывными вещественными коэффициентами

$$F(s, q) = a_0(q) + a_1(q)s + \dots + a_n(q)s^n, \quad (2)$$

$$q \in Q, \quad Q \in R^m, \quad Q - \text{связно,} \\ a_n(q) \neq 0, \quad a_0(q) > 0$$

принадлежит классу (n, k) -эквивалентности для некоторого $q \in Q$. Тогда семейство $F(s, q)$ принадлежит классу (n, k) -эквивалентности тогда и только тогда, когда выполняется условие:

$$0 \notin S(\omega) = \{F(j\omega, q) : q \in Q, \omega \in [0, +\infty)\} \quad (3)$$

Эта теорема является обобщением известного принципа исключения нуля, справедливого для устойчивых семейств полиномов, на классы (n, k) -эквивалентности, так как класс эквивалентности при $k=0$ совпадает с семейством устойчивых полиномов.

Заметим, что при изменении параметров $q \in Q$ по непрерывным кривым наблюдается

следующая картина поведения нулей полиномов семейства: в полиноме $f_{n-k}(s, q)$ нули «слипаются» или «делятся» так, что их количество с учетом кратностей остается постоянным n , а $n-k$ из них локализованы в левой полуплоскости. Причем, нули движутся» по непрерывным кривым не пересекая мнимую ось при изменении q .

Отметим, что старшие коэффициенты всех полиномов не обращаются в ноль.

Одно из доказательств этой теоремы основано на критерии Михайлова. При использовании подхода Михайлова надо иметь в виду, что годографы неустойчивых полиномов могут оказаться немонотонными функциями.

Определение 2. Назовем интервальный полином с вещественными коэффициентами

$$F(s) = \{f(s) = a_0 + a_1s + \dots + a_{n-1}s^{n-1} + a_n s^n, \quad a_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, \quad i = \overline{1, n}\} \quad (4)$$

интервальным полиномом класса (n, k) -эквивалентности, если любой полином из этого семейства принадлежит классу (n, k) -эквивалентности. Для определенности будем считать, что $a_0 > 0, \quad \underline{a}_n \cdot \bar{a}_n > 0$.

Определение 3. Четыре полинома, коэффициенты, которых составлены из крайних значений их интервалов, называются угловыми полиномами $\varphi_1(s), \varphi_2(s), \varphi_3(s), \varphi_4(s)$ семейства интервальных полиномов $F(s)$. Точнее:

$$\varphi_1(s) = \underline{a}_0 + \underline{a}_1s + \bar{a}_2s^2 + \bar{a}_3s^3 + \dots, \varphi_2(s) = \bar{a}_0 + \underline{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \bar{a}_3s^3 + \dots, \quad (5) \\ \varphi_3(s) = \bar{a}_0 + \bar{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots, \varphi_4(s) = \underline{a}_0 + \bar{a}_1s + \bar{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots$$

1. Угловые полиномы (5) принадлежат классу (n, k) -эквивалентности.

2. Для всех положительных корней полиномов $\underline{g}(\omega), \bar{g}(\omega), \underline{h}(\omega), \bar{h}(\omega)$ выполняются следующие условия:

$$\text{если } \underline{g}(\omega) = 0 \text{ или } \bar{g}(\omega) = 0, \text{ то } \underline{h}(\omega)\bar{h}(\omega) > 0;$$

$$\text{если } \underline{h}(\omega) = 0 \text{ или } \bar{h}(\omega) = 0, \text{ то}$$

$$\underline{g}(\omega)\bar{g}(\omega) > 0,$$

где

$$\bar{g}(\omega) = \bar{a}_0 - \underline{a}_2\omega^2 + \bar{a}_4\omega^4 - \dots, \underline{g}(\omega) = \underline{a}_0 - \bar{a}_2\omega^2 + \underline{a}_4\omega^4 - \dots, \quad (6)$$

$$\bar{h}(\omega) = \bar{a}_1\omega - \underline{a}_3\omega^3 + \bar{a}_5\omega^5 - \dots, \underline{h}(\omega) = \underline{a}_1\omega - \bar{a}_3\omega^3 + \underline{a}_5\omega^5 - \dots$$

Утверждение можно доказать, используя критерий Михайлова или с помощью теоремы 1.

Нетрудно видеть, что теорема 2 является обобщением теоремы Харитонова, которая является ее частным случаем при $k=0$. Следует отметить, что в теореме Харитонова не нужно проверять второе условие теоремы 2, т.к. оно выполняется как следствие первого условия.

Отметим, что аналоги следствия теоремы Харитонова для порядков $n < 6$ для неустойчивых интервальных семейств не имеют места из-за немоного поведения $S(\omega)$.

Можно ослабить теорему 2, но получить утверждение, которое легче проверить.

Теорема 3. Интервальный полином $F(s)$ принадлежит классу (n, k) -эквивалентности тогда и только тогда, когда все политопы, соответствующие четырем сторонам прямоугольника с вершинами из угловых полиномов принадлежат классу (n, k) -эквивалентности.

В теореме 3 проверку угловых полиномов на принадлежность классу (n, k) -эквивалентности можно сделать с помощью метода понижения порядка по методике Зубова Н.В. [2] или критерия Михайлова, а проверку реберных политопов, с помощью обобщения критерия Найквиста для класса (n, k) -эквивалентности. Заметим, что для проверки второго условия теоремы 2 необходимо найти все корни полиномов $\underline{g}(\omega)$, $\bar{g}(\omega)$, $\underline{h}(\omega)$, $\bar{h}(\omega)$, что является отдельной и не всегда простой задачей для больших порядков. Поведение годографов в пространстве показано в двух вариантах ниже на рисунке 1. Обычно, динамику такого рода можно увидеть на плоскости. Найти трехмерную визуализацию в литературе нам не удалось.

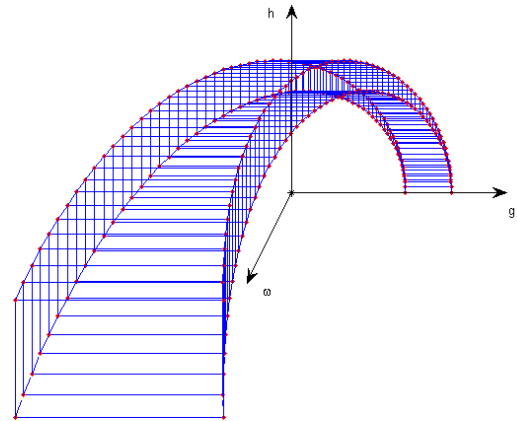
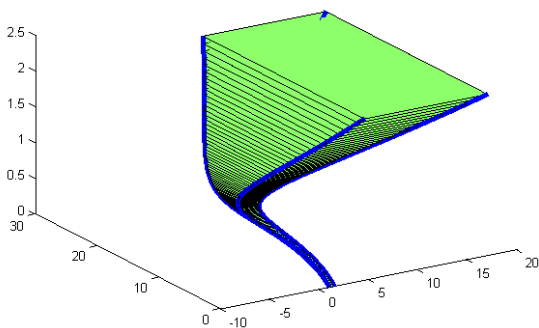


Рис. 1. Два варианта визуализации численного расчета поведения семейства годографов в пространстве $(0 \leq \omega \leq +\infty)$

Опираясь на теоремы 2-3 можно сформулировать критерий робастного поведения, т.е. устойчивости ($k=0$) и неустойчивости ($k=1, n$) интервальных полиномов в пространстве параметров.

Теорема 4. Пусть $\underline{a}_i \leq a_i(q) \leq \bar{a}_i$, $i = \overline{0, n}$, $\underline{a}_0 > 0$, $\underline{a}_n \bar{a}_n > 0$, $q \in Q$, $Q \in \mathbb{R}^m$, Q -связно. Тогда для того, чтобы семейство полиномов с непрерывными коэффициентами

$$U(s, Q) = \{u(s, q) = a_0(q) + a_1(q)s + \dots + a_n(q)s^n; q \in Q\} \quad (7)$$

принадлежало классу (n, k) -эквивалентности необходимо и достаточно, чтобы выполнялось одно из следующих условий:

1. Либо все четыре угловых полинома были из класса (n, k) -эквивалентности и для всех положительных корней полиномов $\underline{g}(\omega)$, $\bar{g}(\omega)$, $\underline{h}(\omega)$, $\bar{h}(\omega)$ выполнялись соотношения, если:

- а) $\underline{g}(\omega) = 0$ или $\bar{g}(\omega) = 0$, то $\underline{h}(\omega)\bar{h}(\omega) > 0$;
- б) $\underline{h}(\omega) = 0$ или $\bar{h}(\omega) = 0$, то $\underline{g}(\omega)\bar{g}(\omega) > 0$.

2. Либо все политопы соответствующие сторонам прямоугольника с вершинами из угловых полиномов принадлежали классу (n, k) -эквивалентности.

Доказательство этой теоремы непосредственно вытекает из теорем 2-3 приведенных выше.

2. Аналитические критерии робастного поведения интервальных полиномов с комплексными коэффициентами

Пусть полином степени n с комплексными коэффициентами

$$\varphi(s) = A_0 + A_1s + \dots + A_n s^n \quad (8)$$

принадлежит классу (n, k) -эквивалентности. Очевидно, для таких полиномов $A_0 \neq 0, A_n \neq 0$. В частности, если $k=0$, то полином является устойчивым.

Имеет место обобщение принципа исключения нуля для семейств полиномов с комплексными коэффициентами.

Теорема 5. Пусть семейство полиномов с непрерывными комплексными коэффициентами

$$\Phi(s, Q) = \{ \varphi(s, q) = A_0(q) + A_1(q)s + \dots + A_n(q)s^n \}, \quad (9)$$

$q \in Q, Q \in R^m, Q$ – связно, $A_n(q) \neq 0$ при некотором $q \in Q$ имеет полином $\varphi(s, q)$ из класса (n, k) – эквивалентности. Тогда семейство $\Phi(s, Q)$ полиномов целиком принадлежит классу (n, k) – эквивалентности тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$0 \notin S(\omega) = \{ \varphi(j\omega, q) : q \in Q \}, \omega \in (-\infty, +\infty) \quad (10)$$

Доказательство аналогично рассуждениям для вещественного случая.

Замечание 1. Требование в условии рассматривать годографы полиномов семейства $\Phi(s, Q)$ на всей мнимой оси $(-\infty < \omega < +\infty)$, а не на полуоси $\omega \geq 0$, как обычно, для полиномов с вещественными коэффициентами, связано с отсутствием симметрии годографов в первом случае для $\omega \leq 0$ и $\omega \geq 0$. Последнее является следствием того, что корни полиномов с комплексными коэффициентами, вообще говоря, не имеют симметрии относительно вещественной оси. Это дает неудобную формулу для приращения аргумента годографа при $\omega \geq 0$:

$$\Delta \arg \varphi(j\omega, q) = \sum_{k=1}^n \arg s_k + \frac{\pi}{2}(n - 2k)$$

где s_k – корни полинома $\varphi(s, q)$.

Условие для полиномов с вещественными коэффициентами из класса (n, k) – эквивалентности означает, что семейство годографов полиномов $\Phi(s, Q)$ из образует

связное замкнутое множество $S(\omega)$, которое при $\omega \rightarrow +\infty$ "уходит" в бесконечность, «поворачиваясь» вокруг нуля. Точнее, на комплексной плоскости замкнутое множество $S(\omega)$, «поворачиваясь» вокруг нуля (монотонно при $k=0$ и немонотонно при $k > 0$), прижимается при $\omega \rightarrow +\infty$ к одной из осей и удаляется в бесконечность в направлении угла $\pi(n - 2k) / 2$. Симметричная картина будет наблюдаться асимптотически при $\omega \rightarrow -\infty$ (ось симметрии совпадает с вещественной осью).

Для семейства полиномов $\Phi(s, Q)$ с комплексными коэффициентами при «движении» $S(\omega), \omega \rightarrow \pm\infty$, «прижимается» к прямой, проходящей через точку ноль и точку $a_n j^n$. Причем приращение $\Delta \varphi$ аргумента всех годографов $\varphi(j\omega, q)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ равно $\pi(n - 2k)$. В отличие от вещественного случая, годографы полиномов с комплексными коэффициентами симметрии могут не иметь.

Действительно, из критерия Михайлова для того, чтобы полином

$$\varphi(s) = A_0 + A_1s + \dots + A_n s^n, \quad A_n \neq 0, \quad A_0 \neq 0 \quad (11)$$

с комплексными коэффициентами, не имеющий нулевых и чисто мнимых корней принадлежал классу (n, k) – эквивалентности необходимо и достаточно, чтобы его годограф $\varphi(j\omega)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ проходил, не пересекая точку ноль комплексной плоскости, ровно $n - 2k$ полуоборотов, против часовой стрелки, т.е.

$$\Delta \arg \varphi(j\omega) = \pi(n - 2k) \quad -\infty < \omega < +\infty$$

Замечание 2. Принцип исключения нуля принадлежности семейства полиномов из класса (n, k) – эквивалентности (теорема 5) можно обобщить для комплексных множеств параметров Q и для нестационарных коэффициентов полиномов. То же справедливо и для семейства полиномов из (2) (теорема 1).

Теорема 6. Пусть семейство полиномов с непрерывными комплексными коэффициентами

$$\Omega(s, Q, T) = \{ W(s, q, t) = A_0(q, t) + A_1(q, t)s + \dots + A_n(q, t)s^n \} \quad (12)$$

$t \in T, T \in [0, \infty), q \in Q, Q \in C^m, Q$ – связно, $A_n(q, t) \neq 0$ при некотором $t_0 \in [0, \infty)$ и некотором $q_0 \in Q$ имеет полином $W(s, q_0, t_0)$ из класса (n, k) – эквивалентности. Все полиномы семейства

$\Omega(s, Q, T)$ принадлежат классу (n, k) эквивалентности тогда и только тогда, когда $0 \notin S(\omega) = \{W(j\omega, q, t) : t \in T, q \in Q\}, \omega \in (-\infty, \infty)$.

Фактически, точка (q, t) есть вектор $m+1$ -мерного пространства, где параметры q_1, \dots, q_m являются первыми m комплексными координатами, а t это $m+1$ вещественная координата. Однако, в некоторых случаях семейство $\Omega(s, Q, T)$ может быть «плохим», т.к., вообще говоря, хотя $A_0(q, t) \neq 0, A_n(q, t) \neq 0$, эти коэффициенты могут быть не отделены от нуля. Это теоретически может позволить корням произвольно близко «подходить» к мнимой оси, оставаясь в своих полуплоскостях. Чтобы избежать этого, надо требовать, чтобы множество Q было связным и ограниченным замкнутым множеством, а $T = [t_1, t_2]$ - конечный интервал. Можно также в условиях теоремы 6 потребовать отделения от нуля свободного члена и коэффициента при старшей степени s^n .

Определение 4. Назовем семейство $\Phi(s)$ полиномов степени n с комплексными коэффициентами

$$\Phi(s) = \left\{ \begin{array}{l} \varphi(s) = A_0 + A_1 s + \dots + A_n s^n, A_i = a_i + j b_i, \\ a_i \in [a_i, \bar{a}_i], b_i \in [b_i, \bar{b}_i], \max(a_n, \bar{a}_n, b_n, \bar{b}_n) > 0, i = 0, n \end{array} \right\} \quad (13)$$

комплексным интервальным полиномом.

Заметим, что при $b_i = \bar{b}_i = 0, i = 0, n$, семейство $\Phi(s)$ является интервальным полиномом с вещественными коэффициентами.

Отметим, что условие в (13) не дает обратиться в ноль старшему коэффициенту A_n , а число полуоборотов в может быть отрицательным числом.

Определение 5. Будем говорить, что интервальный полином $\Phi(s)$ принадлежит классу (n, k) эквивалентности, если каждый полином $\varphi(s)$ из $\Phi(s)$ находится в этом классе.

Не трудно видеть, что состав корней может меняться от полинома к полиному, не меняя общее их число с учетом кратностей.

Замечание 3. Очевидно, если интервальный полином $\Phi(s)$ принадлежит классу (n, k) эквивалентности, то для всех полиномов из $\Phi(s)$ необходимо $A_0 \neq 0$ и $A_n \neq 0$, или, что то же самое, выполняется условие: $\max(a_0, \bar{a}_0, b_0, \bar{b}_0) > 0$, $\max(a_n, \bar{a}_n, b_n, \bar{b}_n) > 0$.

Рассмотрим годограф $\varphi(j\omega)$ полинома семейства $\Phi(s)$ из:

$$\varphi(j\omega) = g(\omega) + jh(\omega), \quad -\infty < \omega < +\infty, \\ g(\omega) = \text{Re} \varphi(j\omega), \quad h(\omega) = \text{Im} \varphi(j\omega),$$

$$\begin{cases} g(\omega) = a_0 - b_1 \omega - a_2 \omega^2 + b_3 \omega^3 + a_4 \omega^4 - b_5 \omega^5 - a_6 \omega^6 + \dots \\ h(\omega) = b_0 + a_1 \omega - b_2 \omega^2 - a_3 \omega^3 + b_4 \omega^4 + a_5 \omega^5 - b_6 \omega^6 + \dots \end{cases} \quad (14)$$

Нетрудно вычислить границы изменения всех годографов интервального полинома $\Phi(s)$ из для $\omega \leq 0$ и $\omega \geq 0$.

Если $\omega \geq 0$, то:

$$\begin{cases} \underline{g}_1(\omega) \leq g(\omega) \leq \bar{g}_1(\omega), \\ \underline{h}_1(\omega) \leq h(\omega) \leq \bar{h}_1(\omega); \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \underline{g}_1(\omega) = a_0 - \bar{b}_1 \omega - \bar{a}_2 \omega^2 + b_3 \omega^3 + a_4 \omega^4 - \bar{b}_5 \omega^5 - \dots, \\ \bar{g}_1(\omega) = a_0 - b_1 \omega - a_2 \omega^2 + \bar{b}_3 \omega^3 + \bar{a}_4 \omega^4 - b_5 \omega^5 - \dots; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \underline{h}_1(\omega) = b_0 + a_1 \omega - \bar{b}_2 \omega^2 - \bar{a}_3 \omega^3 + b_4 \omega^4 + a_5 \omega^5 - \dots, \\ \bar{h}_1(\omega) = b_0 + \bar{a}_1 \omega - b_2 \omega^2 - a_3 \omega^3 + \bar{b}_4 \omega^4 + \bar{a}_5 \omega^5 - \dots \end{cases} \quad (17)$$

Если $\omega \leq 0$, то:

$$\begin{cases} \underline{g}_2(\omega) \leq g(\omega) \leq \bar{g}_2(\omega), \\ \underline{h}_2(\omega) \leq h(\omega) \leq \bar{h}_2(\omega); \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \underline{g}_2(\omega) = a_0 - b_1 \omega - \bar{a}_2 \omega^2 + \bar{b}_3 \omega^3 + a_4 \omega^4 - b_5 \omega^5 - \dots, \\ \bar{g}_2(\omega) = a_0 - \bar{b}_1 \omega - a_2 \omega^2 + b_3 \omega^3 + \bar{a}_4 \omega^4 - \bar{b}_5 \omega^5 - \dots; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \underline{h}_2(\omega) = b_0 + \bar{a}_1 \omega - b_2 \omega^2 - a_3 \omega^3 + b_4 \omega^4 + \bar{a}_5 \omega^5 - \dots, \\ \bar{h}_2(\omega) = b_0 + a_1 \omega - b_2 \omega^2 - \bar{a}_3 \omega^3 + \bar{b}_4 \omega^4 + a_5 \omega^5 - \dots \end{cases} \quad (20)$$

Заметим, что при $\omega = 0$ неравенства совпадут с неравенствами, а равенства - совпадут с. Кроме того, для интервального полинома с вещественными коэффициентами, т.е. для случая, когда $b_i = \bar{b}_i = 0, i = 0, n$, первые оценки в и в совпадут, а второе неравенство в будет зеркальным отражением второго из неравенств. Точнее для $\omega \leq 0$:

$$\underline{g}_1(\omega) \leq g(\omega) \leq \bar{g}_1(\omega); \bar{h}_1(\omega) \leq h(\omega) \leq \underline{h}_1(\omega) \quad (21)$$

Обозначим множество всех значений годографов семейства $\Phi(s)$ при $\omega \geq 0$ через $S_1(\omega)$, а при $\omega \leq 0$ через $S_2(\omega)$.

соответственно. Очевидно, что оба множества являются прямоугольниками со сторонами параллельными вещественной и мнимой осям комплексной плоскости.

Определение 6. Назовем угловыми полиномами восемь полиномов вида:

$$\begin{cases} \varphi_{11}(s) = \underline{g}_1(-js) + j\underline{h}_1(-js), & \varphi_{21}(s) = \overline{g}_1(-js) + j\overline{h}_1(-js), \\ \varphi_{22}(s) = \underline{g}_1(-js) + j\overline{h}_1(-js), & \varphi_{12}(s) = \overline{g}_1(-js) + j\underline{h}_1(-js); \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \varphi_{33}(s) = \underline{g}_2(-js) + j\underline{h}_2(-js), & \varphi_{43}(s) = \overline{g}_2(-js) + j\overline{h}_2(-js), \\ \varphi_{34}(s) = \underline{g}_2(-js) + j\overline{h}_2(-js), & \varphi_{44}(s) = \overline{g}_2(-js) + j\underline{h}_2(-js). \end{cases} \quad (23)$$

Используя обобщенный принцип исключения нуля в C или критерий Михайлова и следствия из него для полиномов с комплексными коэффициентами можно показать, что справедлива теорема.

Теорема 7. Семейство полиномов с комплексными коэффициентами $\Phi(s)$ из принадлежит классу (n, k) -эквивалентности тогда и только тогда, когда выполняется два следующих условия.

Все восемь угловых полиномов находятся в классе (n, k) -эквивалентности.

При $\omega \geq 0, i = 1$ и при $\omega \leq 0, i = 2$ выполняется:

$$\begin{aligned} \text{Если } \underline{g}_i(\omega) \cdot \overline{g}_i(\omega) = 0, & \text{ то } \underline{h}_i(\omega) \cdot \overline{h}_i(\omega) > 0; \\ \text{если } \underline{h}_i(\omega) \cdot \overline{h}_i(\omega) = 0, & \text{ то } \underline{g}_i(\omega) \cdot \overline{g}_i(\omega) > 0. \end{aligned}$$

Замечание 4. При $k = 0$ из теоремы 7 следует обобщение теоремы Харитонова об устойчивости интервального полинома с комплексными коэффициентами. Второе условие в этом случае проверять не требуется.

Замечание 5. Так как условие 2 в теореме 7 обеспечивает отсутствие нуля в $S_1(\omega)$ при $\omega \geq 0$ и в $S_2(\omega)$ при $\omega \leq 0$, то первое условие в этом критерии можно ослабить и требовать принадлежность к классу (n, k) -эквивалентности только одного углового полинома любого из восьми, а для остальных семи достаточно потребовать отсутствия у них нулевых и чисто мнимых корней. Более того, первое условие в теореме 7 можно заменить требованием принадлежности к классу (n, k) -эквивалентности любого одного полинома из семейства $\Phi(s)$, а все восемь угловых полиномов не должны обращаться в ноль на мнимой оси.

Используя условие 2 теоремы 7 и замечание 5 можно объединить несколько критериев принадлежности комплексного интервального полинома классу (n, k) -эквивалентности и сформулировать следующую теорему.

Теорема 8. Семейство полиномов $\Phi(s)$ из принадлежит классу (n, k) -эквивалентности тогда и только тогда, когда выполняются два условия.

1.1 Либо все восемь угловых полиномов находятся в классе (n, k) -эквивалентности.

1.2 Либо один из восьми угловых полиномов находится в классе (n, k) -эквивалентности, а остальные семь угловых полиномов не имеют нулевых и чисто мнимых корней.

1.3 Либо все восемь угловых полиномов не имеют нулевых и чисто мнимых корней и имеется в семействе $\Phi(s)$ хотя бы один полином из класса (n, k) -эквивалентности.

2. При $\omega \geq 0, i = 1$ и при $\omega \leq 0, i = 2$ выполняется:

$$\begin{aligned} \text{если } \underline{g}_i(\omega) \cdot \overline{g}_i(\omega) = 0, & \text{ то } \underline{h}_i(\omega) \cdot \overline{h}_i(\omega) > 0; \\ \text{если } \underline{h}_i(\omega) \cdot \overline{h}_i(\omega) = 0, & \text{ то } \underline{g}_i(\omega) \cdot \overline{g}_i(\omega) > 0. \end{aligned}$$

Замечание 6. При $k = 0$ получим теоремы об устойчивости интервального полинома с комплексными коэффициентами. Например, условия 1.1 при $k = 0$ дает теорему Харитонова для комплексного случая и тогда условие 2 проверять не требуется. Однако в случае $k > 1$ (неустойчивость) для порядков $n < 6$ ослабить условия нельзя из-за немонотонного движения $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$.

Рассмотрим на рисунке 2 поведение годографов всех восьми угловых полиномов. Все значения годографов этих полиномов находятся в множестве $S(\omega)$ при $-\infty < \omega < +\infty$. Первые 4 годографа для угловых полиномов при $\omega \geq 0$ являются по существу угловыми, т.е. находятся в вершинах прямоугольника $S_1(\omega)$. Однако при $\omega \leq 0$ эти годографы оставаясь в вершинах также ориентированного прямоугольника находятся уже внутри множества $S_2(\omega)$. Аналогично для четырех годографов угловых полиномов прослеживается такое же поведение: "движение" прямоугольника $S_2(\omega)$ во внутрь $S_1(\omega)$ при переходе от $\omega < 0$ к $\omega > 0$.

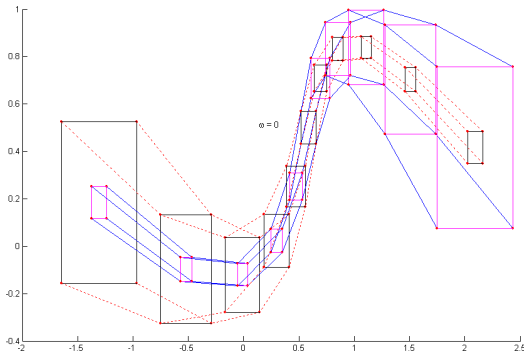


Рис. 2. Поведение угловых годографов комплексного интервального семейства полиномов на плоскости

Действительно, рассмотрим, например, угловой полином $\varphi_{11}(S) = \underline{g}_1(-jS) + j\bar{h}_1(-jS)$ и годограф $\varphi_{11}(j\omega) = \underline{g}_1(\omega) + j\bar{h}_1(\omega)$. Для $\omega \geq 0$ этот годограф является левой нижней вершиной прямоугольника $S_1(\omega)$ (см. рис. 3). Однако для $\omega < 0$ годограф $\varphi_{11}(j\omega)$ «заходит» во внутрь $S_2(\omega)$, т.к. справедливы оценки:

$$\begin{cases} \underline{g}_2(\omega) \leq \underline{g}_1(\omega) \leq \bar{g}_2(\omega), \\ \bar{h}_2(\omega) \leq \bar{h}_1(\omega) \leq \bar{h}_2(\omega). \end{cases} \quad (24)$$

Аналогичные оценки верны и для остальных годографов трех полиномов из. Подобные оценки не трудно получить и для годографов полиномов, которые являются вершинами прямоугольника $S_2(\omega)$ при $\omega \leq 0$ и перестают быть таковыми при $\omega > 0$. Для интервальных полиномов с вещественными коэффициентами следует отметить, что при переходе прямоугольника годографов $S(\omega)$ через $\omega = 0$ ориентация его несколько отличается от комплексного случая. Точнее, годографы 4-х угловых полиномов остаются в вершинах прямоугольника $S(\omega)$ при $-\infty < \omega < \infty$. Однако, они меняются местами на боковых ребрах прямоугольника с верхнего положения на нижнее при переходе с $\omega > 0$ на $\omega < 0$ и наоборот при обратном переходе. Внутренних прямоугольников уже нет, а $S(\omega)$ вырождается в отрезок на вещественной оси. Вместо 8 угловых полиномов достаточно оставить 4 из, т.к. четыре других угловых полинома из совпадут с ними. Точнее,

$$\begin{aligned} \varphi_{11}(s) &= \varphi_{34}(s), \varphi_{21}(s) = \varphi_{44}(s), \\ \varphi_{22}(s) &= \varphi_{43}(s), \varphi_{12}(s) = \varphi_{33}(s). \end{aligned} \quad (25)$$

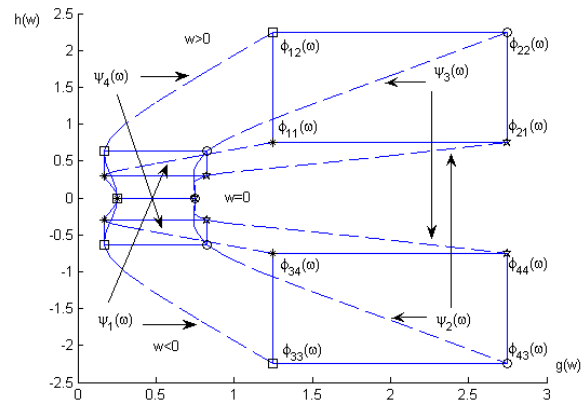


Рис. 3. Поведение угловых годографов в окрестности нуля для вещественного интервального семейства

Отметим, что симметрия $S(\omega)$ для вещественного случая при $\omega > 0$ и $\omega < 0$ для классов (n, k) -эквивалентности объясняет почему в т. Харитонова ($k=0$) весь анализ проводится для $\omega \geq 0$. Сформулируем критерии принадлежности интервального полинома с комплексными коэффициентами классу (n, k) -эквивалентности так, чтобы уменьшить число угловых полиномов. На рисунке 4 предлагается модель-схема динамики «ящика» годографов комплексного интервального полинома. Предварительно определим вспомогательные функции.

Определение 7. Назовем сложными угловыми годографами функции:

$$\psi_1(\omega) = \begin{cases} \varphi_{11}(j\omega) = \underline{g}_1(\omega) + j\bar{h}_1(\omega), & \omega \geq 0, \\ \varphi_{33}(j\omega) = \underline{g}_2(\omega) + j\bar{h}_2(\omega), & \omega \leq 0; \end{cases} \quad (26)$$

$$\psi_2(\omega) = \begin{cases} \varphi_{21}(j\omega) = \bar{g}_1(\omega) + j\bar{h}_1(\omega), & \omega \geq 0, \\ \varphi_{43}(j\omega) = \underline{g}_2(\omega) + j\bar{h}_2(\omega), & \omega \leq 0; \end{cases} \quad (27)$$

$$\psi_3(\omega) = \begin{cases} \varphi_{22}(j\omega) = \bar{g}_1(\omega) + j\bar{h}_1(\omega), & \omega \geq 0, \\ \varphi_{44}(j\omega) = \underline{g}_2(\omega) + j\bar{h}_2(\omega), & \omega \leq 0; \end{cases} \quad (28)$$

$$\psi_4(\omega) = \begin{cases} \varphi_{12}(j\omega) = \underline{g}_1(\omega) + j\bar{h}_1(\omega), & \omega \geq 0, \\ \varphi_{34}(j\omega) = \underline{g}_2(\omega) + j\bar{h}_2(\omega), & \omega < 0. \end{cases} \quad (29)$$

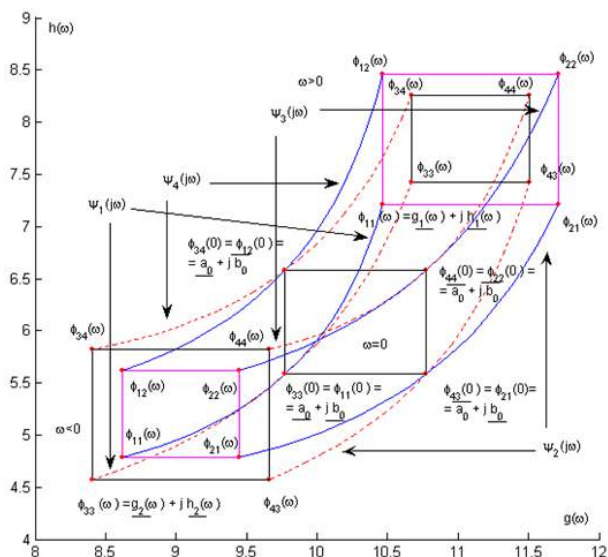


Рис. 4. Поведение угловых годографов в окрестности нуля для комплексного интервального семейства полиномов

Замечание 7. Сложные угловые годографы являются непрерывными функциями при $-\infty < \omega < \infty$, но при $\omega = 0$ они все имеют скачок первой производной действительных и мнимых частей. Это легко проверить, используя полиномы из. Однако для сложных угловых годографов в случае интервального полинома с вещественными коэффициентами изломов в нуле нет.

Теорема 9. Комплексный интервальный полином $\Phi(s)$ принадлежит классу (n, k) – эквивалентности если и только если выполняются два следующих условия:

1.1 Либо каждый из четырех сложных угловых годографов из совершает вокруг нуля при изменении ω от $-\infty$ до ∞ ровно $n - 2k$ полуоборотов против часовой стрелки.

1.2 Либо один из четырех сложных угловых годографов совершает вокруг нуля при

Заключение

Рассмотренные в статье методы являются продвижением в вопросе исследования робастной устойчивости и неустойчивости вещественных и комплексных семейств полиномов. В частности, эта работа относится к исследованиям устойчивости семейств характеристических полиномов матриц систем первого приближения по части переменных. Исследования робастной неустойчивости позволяют дать дополнительную информацию о

изменении ω от $-\infty$ до ∞ ровно $n - 2k$ полуоборотов против часовой стрелки, а другие три при этом не обращаются в ноль.

1.3 Либо все четыре сложных угловых годографа не обращаются в ноль при $-\infty < \omega < \infty$, а в семействе $\Phi(s)$ имеется хотя бы один полином, годограф которого совершает вокруг нуля при изменении ω от $-\infty$ до ∞ ровно $n - 2k$ полуоборотов против часовой стрелки.

2. Если для какого-либо годографа $\psi_i(\omega)$, $i = \overline{1, 4}$ имеется ω_i^r такой, что $\text{Re}\psi_i(\omega_i^r) = 0$, то при $\omega_i^r \geq 0$ $h_1(\omega_i^r)h_1(\omega_i^r) > 0$, а при $\omega_i^r \leq 0$ $h_2(\omega_i^r)h_2(\omega_i^r) > 0$.

Если для какого-либо годографа $\psi_i(\omega)$ $i = \overline{1, 4}$ имеется ω_i^j такой, что $\text{Im}\psi_i(\omega_i^j) = 0$, то при $\omega_i^j \geq 0$ $g_1(\omega_i^j)g_1(\omega_i^j) > 0$, а при $\omega_i^j \leq 0$ $g_2(\omega_i^j)g_2(\omega_i^j) > 0$.

Замечание 8. При $k = 0$ из теоремы 9 следуют обобщения теоремы Харитоновой об устойчивости комплексного интервального полинома. В случае 1.1 и $k = 0$ проверять условие 2 не нужно.

Замечание 9. В теоремах 7-9 обойтись без второго условия нельзя, т.к. для неустойчивых полиномов могут быть «немонотонные» движения годографов при изменении ω от $-\infty$ до ∞ (аргумент годографа – немонотонная функция). В связи с этим в первых условиях число полуоборотов может быть отрицательным.

поведении робастно устойчивых систем, особенно, что важно, в пограничных режимах. Исследование робастно неустойчивых режимов формирует теоретическую базу для формирования быстродействующих и экономичных регуляторов, которые позволяют быстро и с минимальными энергетическими и временными затратами изменять параметры системы.

Дополнительная информация

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 11-07-00201)

Литература

1. Башуров Б.П., Шарик В.В. Оценка функциональной надежности элементов судовых дизелей и обслуживающих систем Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2013. 152 с.
2. Дикусар В.В., Зеленков Г.А., Зубов Н.В. Методы анализа робастной устойчивости и неустойчивости. М.: ВЦ РАН, 2007, 233 стр.
3. Зеленков Г.А., Зубов И.Н., Лопатин М.С. О робастном поведении интервальных полиномов. // Материалы I международной и VI региональной научно-технической конференции «Стратегия развития транспортно-логистической системы Азово-Черноморского бассейна; Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта». Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2007.
4. Осокина, Е.Б. Оптимизация параметров робастного регулятора системы управления курсом судна / А.А. Дыда, Е.Б. Осокина, П.А. Дыда // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2016. – №3 (37). – С. 211–216.
5. Поляк Б.Т., Щербakov П.С. Робастная устойчивость и управление – М.: Наука, 2002, 303 стр.
6. Padmanabhad P., Hollot C.V. Complete instability of a box of polynomials // IEEE Trans. Autom. Control. 1992. V.37. No. 8. P. 1230-1233.

References

1. Bashurov B.P., Sharik V.V. Ocenka funkcional'noj nadezhnosti jelementov sudovyh dizelej i obslu-zhivajushhih sistem Novorossijsk: RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2013. 152 s.
2. Dikusar V.V., Zelenkov G.A., Zubov N.V. Metody analiza robastnoj ustojchivosti i neustojchivosti. M.: VC RAN, 2007, 233 str.
3. Zelenkov G.A., Zubov I.N., Lopatin M.S. O robastnom povedenii interval'nyh polinomov. // Materialy I mezhdunarodnoj i VI regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Strategija razvitija transportno-logisticheskoy sistemy Azovo-Chernomorskogo bassejna; Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tehnicheckoy i kommercheskoj jekspluatacii morskogo transporta». Novorossijsk: MGA im. adm. F.F. Ushakova, 2007.
4. Osokina, E.B. Optimizacija parametrov robastnogo reguljatora sistemy upravlenija kursom sudna / A.A. Dyda, E.B. Osokina, P.A. Dyda // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. – 2016. – №3 (37). – S. 211–216.
5. Poljak B.T., Shherbakov P.S. Robastnaja ustojchivost' i upravlenie – M.: Nauka, 2002, 303 str.
6. Padmanabhad P., Hollot C.V. Complete instability of a box of polynomials // IEEE Trans. Autom. Control. 1992. V.37. No. 8. P. 1230-1233.

УДК 629.5.072

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДНА С ПОМОЩЬЮ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Дмитрий Евгеньевич Студеникин

Кандидат технических наук, доцент кафедры "Технические средства судовождения",
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353900 г. Новороссийск, пр.Ленина,93
e-mail: dm.studenikin@mail.ru

Евгений Владимирович Хекерт

Доктор технических наук, профессор, проректор,
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353900 г. Новороссийск, пр.Ленина,93
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Марина Александровна Модина

Кандидат технических наук, доцент кафедры "Безопасность жизнедеятельности",
начальник отдела магистратуры,
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353900 г. Новороссийск, пр.Ленина,93
e-mail: marishamodina@yandex.ru

Аннотация

Поскольку задача обеспечения безопасности мореплавания была и остаётся важнейшей, предлагается создание системы, осуществляющей помощь в принятии решений по анализу вектора состояния судна вахтенному помощнику капитана, тем самым повышая безопасность. Такую задачу могут решить системы поддержки принятия решений. Тем не менее, в некоторых ситуациях необходимо точно предсказывать состояние судна для того, чтобы осуществлять инвариантную фильтрацию данных. Существует множество способов прогнозировать движение судна, например, классический подход, нейронные сети, системы серого/черного ящика, эволюционные алгоритмы, экспертные системы (особенно нечеткой логики). Большинство из этих подходов апробированы на данных, взятых с судна в течение реального рейса. На вход всех моделей, рассмотренных в статье, подавались сырые, нефильТРованные данные. Экспертные системы показали значительно худший результат, в сравнении с другими. После машинной корректировки, система на нечеткой логике дала результаты, слегка лучшие, нежели другие подходы. Некоторые любопытные особенности были обнаружены.

Ключевые слова: нечеткая логика, иерархические системы, прогнозирование движения судна, функции принадлежности, экспертные системы, системы черного ящика, безопасность мореплавания, фильтрация.

ESTIMATION OF VESSEL MOVEMENT WITH THE AID OF FUZZY LOGIC BASED HIERARCHY SYSTEMS

Dmitriy E. Studenikin,

Candidate of Technical sciences, Associate professor of the Technical means of navigation department
Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,
Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93,
e-mail: dm.studenikin@mail.ru

Evgeniy V. Khekert,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice Rector,
Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,
Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93,
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Marina A. Modina

Candidate of Technical sciences, Associate professor of the Life Safety department,
Head of magistracy department,
Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,
Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93,
marishamodina@yandex.ru

Abstract

The task of increasing safety has always been vital, hence a way of increasing safety in creating a system capable of aiding officer on watch to analyze vessel's current state vector is introduced. That task may be carried out by modern decision support systems. However, in certain circumstances the vessel's trajectory must be precisely estimated to the future state to perform invariant filtering of data sources. There are many ways that allow us to estimate the movement of a vessel, for example classical modeling approach, neural networks, black/grey box estimation, evolution-based algorithms, expert systems (especially fuzzy logic). Most of those approaches were checked with the data obtained from a real vessel engaged in an actual voyage. All the models reviewed in the paper were fed with raw unfiltered data. Expert-based fuzzy logic system's performance was significantly worse, than classical or black box ones. After machine adjustment the results of fuzzy logic based performance were slightly better than the others. Some other peculiarities were also discovered.

Key words: fuzzy logic, hierarchy systems, vessels movement estimation, membership functions, expert systems, black box systems, safety of navigation, filtering.

Introduction

It is no secret that most causes of maritime incidents are now ascribed to human factor. One way to increase safety is to create a system capable of aiding an officer on watch in their analysis of vessel's current state vector. That task may be carried out by modern decision support systems [1, 2]. There are various navigation solutions allowing short-time predictions, for example, the ones built into Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), but most of them calculate vessel's movement on the basis of maneuvering characteristics in the ship's maneuvering booklet. However, that attitude may sometimes be insufficient [3-5]. It is not a rare situation that ill-defined or noisy state vector may ruin the performance of such system. For example, if there is to be a system, aiding a navigator in taking a decision on handling the ship in congested waters, in certain circumstances it must estimate vessel's trajectory very closely to the future position, otherwise it will take more corrective actions from a navigator, which would decrease safety [2-4]. Therefore, it may be vital to have them filtered somehow. There is quite a number of ways to do that, the authors believe, however, that if we have information from many sources, invariant filtering should be used. Obviously we just have to make some movement estimation to do that.

Methods

There is a great number of ways that allow us to estimate the movement of a vessel. Among them the following are to be pointed out:

- Classical modeling approach (differential equations, describing the physical laws of vessels movement), including simplified ones;
- Neural networks;
- Black/grey box estimation;
- Evolution-based algorithms;
- Expert systems (fuzzy logic).

First of all, classical modeling has a number of negative factors, when used for vessel's track estimation. As a rule, the system created becomes very complex, thus, it is hard to be adjusted, at least in a classical manner, excluding black/grey box systems. If a system is simplified, it loses its

accuracy. If a system is to be "fit for all circumstances", it requires a great deal of filtered data to define its coefficients. But they have a great advantage - due to the laws of physics they are based on they are capable of well-estimated extrapolation.

Neural network is a powerful tool for achieving the desired goal. However, its disadvantage is the complexity the system has. Thus, with massive additional layers these systems often have overfitting [5, 6] problems. And, as for the classical approach, they require a lot of good filtered data to train. Also, they have harder limits compared to classical modeling – good results are not guaranteed if condition outside the data trained. But the great advantage of the system is that they are capable of self-training.

Black (or grey) box estimation is a combination of methods to obtain the functions to fit the input to the output data. It is obvious that it has its main negative factors in very sharp limits of the model, and sometimes in its inability to determine if an extrapolation is possible. However this method is good in local conditions that are within the fitting data.

Evolution-based algorithms are relatively new methods of assessment, but the system becomes quite complex, requires a lot of training and has no guarantee of obtaining the best modeling results. However they are good for obtaining coefficients for classical models.

Fuzzy systems are accurate [7], as well as ideal for treating the experience gained from human experts, and not limited to the use of human knowledge. Its negative factor is that the number of factors experts can describe correctly is approximately 7. If a problem is very complex, the hierarchy systems are used. Fuzzy systems are easily integrated into neural networks for their training. In addition, they are generally good if noisy data are fed. So, the system estimating vessel's movement was created on the basis of fuzzy logic.

Vessel movement estimation system

The input information for the system was: vessel's speed, course, angular speed, depth below keel/draft, rudder angle, current position (latitude/longitude) and ship's load. The information was obtained from vessel's bridge systems, e.g.

gyrocompass, speed log, echo sounder etc The data come to the measuring unit that converts some values, to fit the ones the system was built for. It is easy to put a simple filter there, however, that was not done due to the purpose of dealing with vessel's data "as they are".

Then we have to define the model of vessel's movement. We tried various ways to do that, including dealing with experts, using different methods[1, 3]. In this case we get something like this:

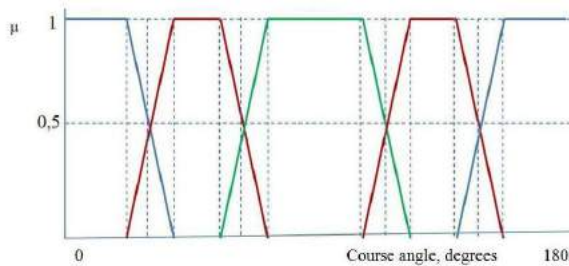


Fig. 1. Fuzzy sets of course angle, obtained from expert

Although sometimes it is an easy and sufficiently correct way to process the data, we encountered that it is not enough to use this method only. In some cases there are no human experts, or human experts are sometimes deeply wrong in their decision when the time scale changes dramatically. Therefore we used the following algorithm, which is a slight modification of the one Wang-Mendel [8] proposed.

Firstly, Euclid metric was chosen as a difference scale between two sets of data

$$S = \sqrt{(v_{1i} - v_{2i})^2 + (v_{2i} - v_{2i})^2 + \dots + (v_{ni} - v_{ni})^2} \quad (1)$$

Where v_i is normalized parameter (e.g. taking into account that 1 is maximum possible value, 0 minimum possible, if vessel's speed can vary between 0 and 10 knots for speed of 5 kts v_i is 0,5), v_0 is the cluster center value

Then, for M lines of data we have to first set number of clusters (e.g. 4) and define a degree for each parameter:

$$\mu_1 = [(1 + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_3}{S_1} + \frac{S_4}{S_1})^{\frac{2}{m+1}}]^{-1} \quad (2)$$

where m is used to define the "steepness" of membership function [9]. We have had quite good results with m=2.

After that we must update cluster center value:

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^M (\mu_{ik})^m v_k}{\sum_{k=1}^M (\mu_{ik})^m} \quad (3)$$

Then we make some iterations, practically we had less than 5 which mattered. Other steps are almost the same as in Wang-Mendel method: we create rules, assign weights, and create the rule base. Note, that we do not need to defuzzify the center of the the set. However, the problem of complexity arises as we go to hierarchy levels

connections. That is where experts give valuable data for starting the algorithm.

Estimation of position is done via calculating changes in vessel's speed and angular speed (that is longitudinal and cross accelerations; Z rotary acceleration). The system has three channels, to which hierarchy systems contribute their factors. It is a comfortable approach allowing a wide flexibility of system's structure, which is thus capable of meeting various conditions. The main structure is shown in fig.2:

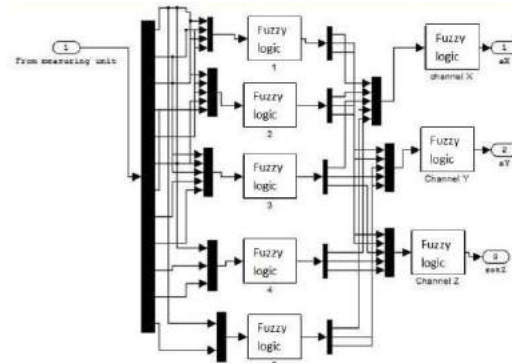


Fig. 2. Structure of hierarchy-based fuzzy ship's movement estimation system

Performance of the system

The system was checked with the data collected from a real vessel engaged in an actual voyage of (m/v DS Power, Mediterranean area). First (expert creation only) the performance was quite bad, probably due to the reasons mentioned above. The results are shown in Fig 3. When most of membership functions were switched to algorithm creation from the dataset it naturally increased the performance as per checking dataset test.

Overall performance of the system compared to classical methods (regression, [10,11, 12]), as well as black box (armax, nlarx (best), Hammerstein-Viener) was also carried out.

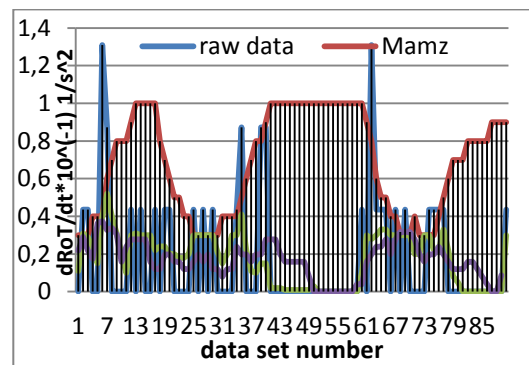


Fig. 3. Performance of fuzzy logic systems.

All the models were fed with raw unfiltered data. Root-mean square deviation of the last parameter was $2,06 \cdot 10^{-2} 1/s^2$. These results were slightly superior to classical regression-obtained model ($3,62 \cdot 10^{-2} 1/s^2$) and black box estimation model

(Hammerstein-Viener $4,12 \cdot 10^{-2} \text{ 1/s}^2$, ARX $4,01 \cdot 10^{-2} \text{ 1/s}^2$, nIARX $3,88 \cdot 10^{-2} \text{ 1/s}^2$).

Better accuracy was obtained for longitudinal acceleration ($0,0023 \text{ m/s}^2$) and, though it might seem strange, much less accurate cross acceleration ($0,099 \text{ m/s}^2$). The differences with the above alternative methods are more or less of the same percentage.

Conclusion

The results finally showed that fuzzy logic modeling was slightly superior to other methods, however, the difference between all the methods is not so big. So all methods of modeling are good, however, fuzzy logic system seems to treat raw data better.

Литература

1. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. под ред. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
2. Субанов, Э.Э. Разработка моделей эффективной оценки опасности столкновения судов при принятии решения методом анализа иерархий: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 / Эркин Эргешевич Субанов ; Мор. гос. акад. им. адм. Ф.Ф.Ушакова. – Новороссийск., 2012 – 182 с.
3. Studenikin D.E., Piskun A.V. Some issues of the systems design to assess the maneuvering capabilities of the vessel based on fuzzy logic/ Moscow.: Bulletin of Transport Information, #12 2013.
4. Studenikin D.E., Kondratiev S.I. Analysis of estimated trajectory of large-capacity vessel considering its maneuvering capabilities./ NATURAL AND TECHNICAL SCIENCES, Moscow.: Sputnik+, #5 2013.
5. Shtovba S.D. Making fuzzy logic systems with the means of MATLAB./ – Moscow.: Goryachaya liniya - Telecom, 2007. – p. 288.
6. Studenikin D.E Structure of fuzzy logic controller predicting ship's movement in congested waters/ Moscow.: Bulletin of Transport Information, #1 2010.
7. Kosko B. Fuzzy thinking / Hyperion, 1993. 5. Kosko, Bart. Neural Networks and Fuzzy Systems / Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991. – p. 336.
8. Wang, L. and Mendel, J. M. (1992). Generating fuzzy rules by learning from examples. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 22(6):1414–1427.
9. Л. Рутковский. Методы и технологии искусственного интеллекта/пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. - 520 с., ил.
10. Дмитриев, С.П., Пелевин, А.Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. [Текст]: научный труд / СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – 160 с.
11. Иващенко, А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления [Текст].: научный труд / Киев.: Техника, 1969. – 392 с.

References

1. Saati T. L. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhi. Per. s angl. pod red. R.G. Vachnadze. – M.: Radio i svjaz, 1993. – 278 p.
2. Subanov Je.Je. Razrabotka modelej jeffektivnoj ocenki opasnosti stolknovenija sudov pri prinjatii reshenija metodom analiza ierarhij: dis. ... kand. tehn. nauk : 05.22.19 / Jerkin Jergeshevich Subanov ; Mor. gos. akad. im. adm. F.F.Ushakova. – Novorossiysk., 2012 – 182 p.
3. Kosko B. Fuzzy thinking. Hyperion, 1993. 5. Kosko, Bart. Neural Networks and Fuzzy Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991. – p. 336.
4. Wang, L. and Mendel, J. M. (1992). Generating fuzzy rules by learning from examples. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 22(6):1414–1427.
5. L. Rutkovskij. Metody i tehnologii iskusstvennogo intellekta/per. s pol'sk. I.D. Rudinskogo. – M.: Gorja-chaja linija–Telekom, 2010.- 520 p., il.
6. Dmitriev S.P., Pelevin A.E. Zadachi navigacii i upravlenija pri stabilizacii sudna na traektorii. [Tekst] : nauchnyj trud / SPb.: GNC RF-CNII «Jelektropribor», 2002. – 160 p.
7. Ivahnenko A. G. Samoobuchajushhiesja sistemy raspoznavanija i avtomaticheskogo upravlenija [Tekst] : nauch-nyj trud / Kiev.: Tehnika, 1969. – 392 p.
8. Studenikin D.E., Piskun A.V. Some issues of the systems design to assess the maneuvering capabilities of the vessel based on fuzzy logic. Moscow.: Bulletin of Transport Information, #12 2013.
9. Studenikin D.E., Kondratiev S.I. Analysis of estimated trajectory of large-capacity vessel considering its maneuvering capabilities. NATURAL AND TECHNICAL SCIENCES, Moscow.: Sputnik+, #5 2013.
10. Shtovba S.D. Making fuzzy logic systems with the means of MATLAB. – Moscow.: Goryachaya liniya - Telecom, 2007. – p. 288.
11. Studenikin D.E Structure of fuzzy logic controller predicting ship's movement in congested waters. Moscow.: Bulletin of Transport Information, #1 2010.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 658.3.07; ГРНТИ 73.01.75

**МЕТОДИКА УЧЕТА ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ЦЕННОСТНОГО АСПЕКТА
ДЕЙСТВИЙ СУДОВОДИТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ТРЕНАЖЕРНОЙ
ПОДГОТОВКИ****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

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

Дмитрий Алексеевич Скороходов

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Института проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13
профессор кафедры 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(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается один из аспектов проблемы влияния человеческого фактора на безопасность профессиональной деятельности на морском транспорте, связанный с ценностной оценкой её действий. Авторами предлагается новый методологический подход оценки и прогнозирования профессионального поведения специалистов водного транспорта в нормальных и экстремальных условиях (на примере оценки судоводителей). При рассмотрении влияния человека на безопасность транспортной деятельности не учитывается влияние самых мощных и устойчивых факторов поведения, не зависящих от его текущего состояния, конкретных условий и продолжительности работы - факторы мораль, воля и интерес. Влияние этих ключевых поведенческих факторов еще более сильное 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 мораль является фундаментальным, определяющим фактором безопасности человеческого поведения. Воздействие всех факторов комплексное и только их рассмотрение в единстве и динамической взаимосвязи может указать на подлинные человеческие склонности. Те факторы, которые сейчас считаются определяющими безопасность профессионального поведения специалистов и руководителей транспорта, в действительности можно назвать *второстепенными (оперативными) факторами*. Такими факторами являются профессионализм, способности и качество психофизиологической подготовки. Стремление оптимизировать второстепенные факторы и невнимание к ключевым поведенческим факторам (мораль – воля – интерес) в нормальной обстановке и чрезвычайных ситуациях, является фундаментальной ошибкой и причиной низкой эффективности современных подходов к оптимизации профессиональной деятельности.

Ключевые слова: безопасность, воля, интерес, качество, мораль, профессиональное поведение, судоводитель, человеческий фактор, эффективность.

**THE TREATMENT OF PROFESSIONAL-VALUE ASPECT OF ACTION
NAVIGATORS DURING SIMULATOR TRAINING****Valery Yu. Kaminsky**

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

Marin L. Marinov

PhD, leading researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsy@gmail.com

Dmitry A. Skorokhodov

Dr. Sci. Tech., the professor, Chief researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel. (812) 321-95-68 e-mail skorohodovda@mail.ru
Professor of Department,
Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,5,
Professor Popov street, Saint-Petersburg, 197376
phone: +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Abstract

This article deals with one aspect of the problem of human factor influence on the security of professional activity on the maritime transport associated with the value assessment. The authors propose a new methodological approach for assessing and forecasting of professional conduct water transport specialists in normal and extreme conditions (for example, evaluation of navigators). When examining the human impact on the security of transport does not take into account the influence of the most powerful and sustainable behavior, factors beyond the control of its current state, the specific conditions and duration of work factors morals, will and interest. The influence of these key behavioral factors even stronger in emergency situations, where under stress and unpredictability of professionalism and abilities often lose their value. Human morality in such situations is kind of frame, which may include free will and interest. So the moral is a fundamental determinant of human behavior security. The impact of all the complex factors and their only consideration in unity and dynamic relationship can indicate a genuine human tendency. Those factors that are now considered defining safety professional conduct for transport professionals and executives, in fact, can be called secondary (operational) factors. Such factors are professionalism, ability, quality, Psychophysiological training. In this regard, studies vary existing still of the opinion that the only effort aimed at recruiting people with qualities, abilities and high professional and psychological preparation, can lead to a noticeable increase in security and increase efficiency for professional action. Trying to optimize secondary factors and disregard for the influence of key behavioral factors (moral-will-interest) in normal circumstances and emergency situations is a fundamental mistake and cause of low efficiency of today's approaches to optimize professional activities.

Key words: security, will, interest, quality, morality, professional conduct, the skipper, the human factor, efficiency.

Введение

Сейчас подготовка специалистов водного транспорта, во время обучения на тренажерах, оценивается по проявленным профессиональным качествам, способностям и по количеству и качеству достигнутых результатов во время тренировок и экзаменов. Подобная оценка содержит в себе частичную оценку вложенной человеком воли и частично может выразить проявленный им интерес. Но в этой распространенной системе оценивания, к сожалению, полностью отсутствует один из самых важных аспектов оценки человеческой деятельности – ценностный аспект. А именно этот аспект, охватывающий морально-нравственную оценку вместе с оценкой воли и интереса, очень часто является определяющим для достижения успеха в морской профессии, или ведет к авариям и несчастным случаям.

В представленной методике учет ценностных характеристик судоводителей осуществляется обучающим инструктором (во время тренировок) или экспертной группой (из инструкторов, преподавателей и морских специалистов) во время экзамена - по нескольким

взаимосвязанным критериям (ответственность, воля и интерес).

Оценка по ценностным критериям ответственность, воля и интерес является неотъемлемой частью профессиональной оценки по каждому действию на каждом из этапов: маневрирование, переход и действие в чрезвычайных ситуациях.

Основное преимущество групповой экспертной оценки заключается в уменьшении различий во мнениях, в возможности получения в какой-то степени обобщенного и более представительного мнения. Учитывая характер производимых оценок, синтез обобщенного мнения целесообразно осуществить статистическим способом (среднее арифметическое, среднее взвешенное, сумма рангов, мажоритарная выборка).

Последовательность расчетов по учету ценностного аспекта действий судоводителей во время обучения на тренажерах

Используя зависимость между субъективными оценками и их количественными выражениями в Таблице 1, инструктор заполняет Таблицу 3;

Инструктор, напротив каждой оценки, определяет условную количественную величину, по каждому показателю, в соответствии с функцией Харрингтона в виде, указанном в Таблице 1;

Таблица 1

Субъективные оценки	Количественные выражения
Очень хорошо	1,00 – 0,81
Хорошо	0,80 – 0,64
Удовлетворительно	0,63 – 0,38
Плохо	0,37 – 0,21
Очень плохо	0,20 – 0,00

3. В соответствии с величинами ценностных показателей, определяется суммарная величина по каждой профессиональной оценке судоводителя, по всем ценностным показателям 3-х ценностных критериев с учётом весовых коэффициентов каждого ценностного критерия на этапе „Маневрирование при входе и выходе в порту”, по формуле:

$$P_{Mn} = \lambda_i \sum_{i=1}^5 QM_i + \lambda_j \sum_{j=1}^2 VM_j + \lambda_k \sum_{k=1}^2 IM_k \quad (1)$$

где: P_{Mn} – суммарная оценка по всем показателям для «n»- той профессиональной оценки, на этапе маневрирования;

QM_i – оценка i – ого показателя по ценностному критерию «ответственность» на этапе маневрирования: QM_1 -превентивность,

QM_2 - резерв, QM_3 - разумный риск, QM_4 - постоянная готовность, QM_5 - дисциплина;

VM_j - оценка j – ого показателя по критерию «воля» на этапе маневрирования: VM_1

- постоянство, VM_2 - решительность;

IM_k – оценка k – ого показателя по критерию „интерес”, на этапе маневрирования: IM_1 - инициативность, IM_2 - неординарность;

λ^i - весовой коэффициент для ценностного критерия „ответственность”, на этапе маневрирования;

λ^j - весовой коэффициент для ценностного критерия „воля”, на этапе маневрирования;

λ^k - весовой коэффициент для ценностного критерия „интерес”, на этапе маневрирования;

4. Определяется средняя величина ценностного критерия по всем

профессиональным оценкам судоводителей на этапе маневрирования, по формуле:

$$P_{Mcp} = \frac{\sum_{n=1}^{10} P_{Mn}}{10} \quad (2)$$

где: P_{M1} - качество организации и подготовки к маневрированию,

P_{M2} - степень усвоения гидрометеорологической информации в районах маневрирования и перехода,

P_{M3} - степень изучения и навигационной информации в районах маневрирования и перехода,

P_{M4} - степень подготовленности идей для маневрирования в различных обстоятельствах,

P_{M5} - степень готовности средств движения и средств управления к маневрированию,

P_{M6} - степень знания и готовности систем судна к использованию для маневрирования,

P_{M7} - степень готовности экипажа к маневрированию,

P_{M8} - степень практической готовности к проведению заданного инструктором маневра,

P_{M9} - качество наблюдения за маневренными характеристиками судна во время маневра,

P_{M10} - качество наблюдения за обстановкой во время маневра.

5. В соответствии с величинами ценностных показателей, определяется суммарная величина по каждой профессиональной оценке судоводителя, по всем ценностным показателям 3-х ценностных критериев с учётом весовых коэффициентов каждого ценностного критерия на этапе „Переход в заданный район”, по формуле:

$$P_{Pn} = \lambda_i \sum_{i=1}^5 Qp_i + \lambda_j \sum_{j=1}^2 Vp_j + \lambda_k \sum_{k=1}^2 Ip_k \quad (3)$$

где: P_{Pn} – суммарная оценка по всем показателям для «n»- той профессиональной оценки, на этапе перехода;

Qp_i – оценка i – ого показателя по ценностному критерию «ответственность» на этапе перехода: Qp_1 - превентивность, Qp_2 -

резерв, Qp_3 - разумный риск, Qp_4 -

постоянная готовность, Qp_5 - дисциплина;

Vp_j - оценка j – ого показателя по критерию

«воля» на этапе перехода: Vp_1 - постоянство,

Vp_2 - решительность;

Ip_k – оценка k – ого показателя по

критерию „интерес”, на этапе перехода: Ip_1 -

инициативность, Ip_2 - неординарность;

λ^i - весовой коэффициент для ценностного критерия „ответственность”, на этапе перехода;

λ^j - весовой коэффициент оценки по критерию „воля”, на этапе перехода;

λ^k - весовой коэффициент для ценностного критерия „интерес”, на этапе перехода;

6. Определяется средняя величина ценностного критерия по всем профессиональным оценкам судоводителей на этапе перехода, по формуле:

$$P_{p\text{cp}} = \frac{\sum_{n=1}^6 P_{p_n}}{6} \quad (4)$$

где: P_{p_1} - степень подготовки предварительной прокладки для осуществления перехода,

P_{p_2} - степень знания загрузки судна и расчеты его мореходности и остойчивости во время перехода,

P_{p_3} - степень компетентности при маневрировании во время перехода,

P_{p_4} - умений использования средств наблюдения за обстановкой во время перехода,

P_{p_5} - умений использования средств связи на переходе,

P_{p_6} - степень компетентности и организованности при определении места на переходе.

7. В соответствии с величинами ценностных показателей, определяется суммарная величина по каждой профессиональной оценке судоводителя, по всем ценностным показателям 3-х ценностных критериев с учётом весовых коэффициентов каждого ценностного критерия на

этапе „Действия в чрезвычайных ситуациях”, по формуле:

$$Pc_n = \lambda_i \sum_{i=1}^5 Qc_i + \lambda_j \sum_{j=1}^2 Vc_j + \lambda_k \sum_{k=1}^2 Ic_k, \quad (5)$$

где: P_{cn} – суммарная оценка по всем показателям для «n»- той профессиональной оценки, на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях»;

Qc_i – оценка i – ого показателя по ценностному критерию «ответственность» на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях»:

Qc_1 - превентивность, Qc_2 - резерв, Qc_3 - разумный риск, Qc_4 - постоянная готовность, Qc_5 - дисциплина;

Vc_j - оценка j – ого показателя по критерию «воля» для действий в чрезвычайных ситуациях:

Vc_1 - постоянство, Vc_2 - решительность;

Ic_k – оценка k – ого показателя по критерию „интерес” на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях»: Ic_1 - инициативность,

Ic_2 - неординарность;

λ^i - весовой коэффициент для ценностного критерия „ответственность”, на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях»;

λ^j - весовой коэффициент оценки по критерию „воля” на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях»;

λ^k - весовой коэффициент для ценностного критерия „интерес” на этапе «Действия в чрезвычайных ситуациях».

8. Определяется средняя величина ценностного критерия по всем профессиональным оценкам судоводителей на этапе действий в чрезвычайных ситуациях, по формуле:

$$P_{c\text{cp}} = \frac{\sum_{n=1}^8 P_{c_n}}{8} \quad (6)$$

где: P_{c_1} - степень знаний и умений для устранения технических неисправностей в чрезвычайных ситуациях,

P_{c_2} - степень знаний и умений для борьбы с пробоинами в чрезвычайных ситуациях,

таблица 2

P_{c3} - степень знаний и умений для борьбы с пожарами в чрезвычайных ситуациях,

P_{c4} - степень знаний и умений для борьбы с нарушениями устойчивости в чрезвычайных ситуациях,,

P_{c5} - степень знаний и умений для борьба с террористическими нападениями,

P_{c6} - степень знаний и умений для маневрирования в узкостях,

P_{c7} - степень знаний и умений для маневрирования при избежании навигационных опасностей,

P_{c8} - степень знаний и умений для маневрирования при посадке на мель.

9. Определение общей величины ценностной оценки действий судоводителей на тренажере, на всех этапах: «Маневрирование», «Переход в заданный район» и «Действия в чрезвычайных ситуациях», проводится по формуле:

$$P_{общ} = P_{M_n} cp + P_{P_r} cp + P_{C_s} cp \quad (7)$$

В случае, если на определенном этапе ценностные характеристики обучаемого не проверялись, инструктор ставит среднюю величину ценностной оценки судоводителя (для соответствующего этапа), равной «0».

9. Инструктор, в Таблице 2, напротив полученной количественной величины для

$P_{общ}$, определяет соответствующую ей «оценка доверия судоводителю».

Общая величина „ценностной оценки действий судоводителя” $P_{общ}$	Оценка доверия судоводителю
10,0 - 8,0	Судоводителю рекомендуется полностью доверять
7,9 – 6,0	Судоводителю рекомендуется доверять, с дополнительным контролем над некоторыми, более ответственными действиями (определяются инструктором, в зависимости от достигнутых результатов)
5,9 – 3,0	Рекомендуется дополнительный контроль над всеми, действиями судоводителя
2,9 – 0,0	Рекомендуется обратить внимание на морально-волевое состояние и профессиональную пригодность судоводителя

Заключение

В заключении можно сказать, что предложенная методика учета ценностного аспекта действий судоводителей во время обучения на тренажерах, может быть разработана в программном виде и может быть использована для всех специальностей водного транспорта, в удобном для программирования и электронной обработки результатов, виде.

В этом виде, она является только одним из возможных вариантов решения проблемы с математической обработкой большого количество субъективных данных.

Методика отражает наиболее общие принципы и положения, составляющие основу

авторского подхода. В зависимости от профессиональной специфики, она допускает изменение количества и содержания предложенных критериев и показателей и может включать различные методики вычисления по каждому отдельному показателю.

Литература

1. Евсеенко С.М., Скороходов Д.А. О степени интеллектуализации, роботизации и интегрированной оценки управления организационно-технологическими процессами предприятия и корабля // Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии», Россия, Санкт-Петербург, №4(22)2013. – с.53-60.
2. Лукомский Ю.А., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Обеспечение безопасности водных транспортных средств // СПб.: Из-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 244 с.
3. Маринов М.Л. Ситуационное моделирование безопасности человеческого поведения с использованием функционально-психологической модели // Морской вестник. – 2009. - №4. – с.75-78.
4. Маринов М. Л. Концепция подготовки специалистов по усвоению шельфа // Научный журнал „Морские интеллектуальные технологии” №1 (спецвыпуск), г. Санкт-Петербург, 2012 г. С. 85-88;
5. Маринов М.Л., Малыгина Е. А. Роль человеческого фактора в проблеме транспортной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – №2(26). – с.19 – 26.
6. Маринов М.Л. Проблемы и перспективы оценки поведения руководителей и специалистов в профессиональной сфере // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – №4(39). – с.215-224.
7. Скороходов Д. А. Функции и режимы интегрированных систем управления // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ”, 2010. 84 с.
8. Скороходов Д.А. Актуальные проблемы совершенствования систем управления безопасностью железнодорожного транспорта. (Скороходов Д.А., Стариченков А.Л.), «Транспорт Российской Федерации», №1 (20), 2009. С. 38-39. Журнал ВАК РФ.
9. Скороходов Д.А. Интеллектуализация систем управления безопасностью судоходства. (Борисова Л.Ф., Скороходов Д.А.), Морские интеллектуальные технологии. 2008. №1. С. 31-34. Журнал ВАК РФ.
10. Скороходов Д.А. Интеллектуальные технологии для обеспечения безопасности судоходства. (Борисова Л.Ф., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л.), «Транспорт Российской Федерации», №1 (26), 2010. С. 32-35. Журнал ВАК РФ.
11. Скороходов Д.А. Методика оценки эффективности комплексной безопасности транспортной компании. (Стариченков А.Л., Поляков А.С.), Научный электронный журнал «ВЕСТНИК» Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы, выпуск №2 (2015). С. 24-29. Журнал ВАК РФ.

References

1. Evseenko S.M., Skorohodov D.A. O stepeni intellektualizacii, robotizacii i integrirovannoj ocenki upravlenija organizacionno-tehnologicheskimi processami predpriyatija i korablja Nauchnyj zhurnal «Morskije intellektual'nye tehnologii», Rossija, Sankt-Peterburg, №4(22)2013. – s.53-60.
2. Lukomskij Ju.A., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Obespechenie bezopasnosti vodnyh transportnyh sredstv // SPb.: Iz-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2012. 244 s.
3. Marinov M.L. Situacionnoe modelirovanie bezopasnosti chelovecheskogo povedenija s ispol'zovaniem funkcional'no-psihologicheskoy modeli Morskoy vestnik. – 2009. - №4. – s.75-78.
4. Marinov M. L. Konceptija podgotovki specialistov po usvoeniju shel'fa Nauchnyj zhurnal „Morskije intellektual'nye tehnologii” №1 (specvypusk), g. Sankt-Peterburg, 2012 g. S. 85-88;
5. Marinov M.L., Malygina E. A. Rol' chelovecheskogo faktora v probleme transportnoj bezopasnosti Problemy upravlenija riskami v tehnosfere. – 2013. – №2(26). – s.19 – 26.
6. Marinov M.L. Problemy i perspektivy ocenki povedenija rukovoditelej i specialistov v professional'noj sfere // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – №4(39). – s.215-224.
7. Skorohodov D. A. Funkcii i rezhimy integrirovannyh sistem upravlenija // SPb.: Izd-vo SPbGJeTU „LJeTI”, 2010. 84 s.
8. Skorohodov D.A. Aktual'nye problemy sovershenstvovaniya sistem upravlenija bezopasnost'ju zheleznodorozhnogo transporta. (Skorohodov D.A., Starichenkov A.L.), «Transport Rossijskoj Federacii», №1 (20), 2009. S. 38-39. Zhurnal VAK RF.
9. Skorohodov D.A. Intellektualizacija sistem upravlenija bezopasnost'ju sudohodstva. (Borisova L.F., Skorohodov D.A.), Morskije intellektual'nye tehnologii. 2008. №1. S. 31-34. Zhurnal VAK RF.
10. Skorohodov D.A. Intellektual'nye tehnologii dlja obespechenija bezopasnosti sudohodstva. (Borisova L.F., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L.), «Transport Rossijskoj Federacii», №1 (26), 2010. S. 32-35. Zhurnal VAK RF.
11. Skorohodov D.A. Metodika ocenki jeffektivnosti kompleksnoj bezopasnosti transportnoj kompanii. (Starichenkov A.L., Poljakov A.S.), Nauchnyj jelektronnyj zhurnal «VESTNIK» Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby, vypusk №2 (2015). S. 24-29. Zhurnal VAK RF.

УДК 614.87; 623.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Владимир Ильич Комашинский

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе
ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13
тел. (812)328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

Александр Алексеевич Таранцев

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией
ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13
профессор Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149
тел. (812)328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

Михаил Александрович Лосев

адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект 149
тел. (812)328-40-71 e-mail: losev181983@mail.

Аннотация

Рассмотрена возможность применения гиперзвуковой баллистической транспортной системы «разгонный блок – грузовой контейнер» для экстренной доставки необходимых грузов на различные труднодоступные территории и объекты (например, на такие объекты Северного морского пути – как корабли и обслуживающие инфраструктуры) в случае возникновения на этих объектах пожаров, ЧС и т.п.

Разработана компьютерная модель для баллистического расчёта параметров гиперзвуковой транспортной системы, позволяющая рассчитать закон управления разгонным блоком для доставки требуемого тоннажа груза на требуемое расстояние. Приведены расчётные примеры.

Показано, что аналогичная система может быть применена и для экстренной эвакуации персонала из объектов (кораблей, добывающих платформ и др.) в Арктической зоне и северных широтах при возникновении аварийных ситуаций, пожаров, угрозе взрывов. Конструкция транспортной системы защищена патентами.

Отмечено, что в качестве разгонных блоков могут использоваться ступени баллистических ракет, снимаемые с дежурства, что позволяет их эффективно утилизировать.

На базе комплекса баллистических систем доставки грузов может быть создана международная сеть экстренной помощи в Арктической зоне.

Ключевые слова Арктическая зона, баллистическая транспортная система, экстренная доставка, математическое моделирование, аэродинамические характеристики

MODELING SYSTEM FOR EMERGENCY DELIVERY FOR OBJECTS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

Vladimir I. Komashinsky

the assistant professor, Dr.Sci.Tech., the Deputy Director
SOLOMENKO'S INSTITUTE OF TRANSPORT PROBLEMS OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
12-ya Line VO, 13, St. Petersburg 199178, Russian Federation
tel: +7 (812) 328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

Alexander A. Tarantsev

the professor, Dr.Sci.Tech., the Head of Laboratory
SOLOMENKO'S INSTITUTE OF TRANSPORT PROBLEMS
THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
12-ya Line VO, 13, St. Petersburg 199178, Russian Federation
the professor

SAINT PETERSBURG UNIVERSITY OF STATE FIRE SERVICE OF EMERCOME OF RUSSIA
Moskovskiy Avenue, 149, St. Petersburg 196105, Russian Federation
tel: +7 (812) 328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

Michael A. Losev

the Graduate student

SAINT PETERSBURG UNIVERSITY OF STATE FIRE SERVICE OF EMERCOME OF RUSSIA
Moskovskiy Avenue, 149, St. Petersburg 196105, Russian Federation
tel: +7 (812) 328-40-71 e-mail: losev181983@mail.ru

Abstract

Consider the possibility of using hypersonic ballistic transport system "booster – freight container" for the urgent delivery of essential goods to different remote areas and objects (for example, such objects of the Northern sea route as the ships and service infrastructure) in the case of these facilities, fires, emergencies, etc.

A computer model for ballistic calculation of hypersonic transport system parameters has been developed, which allows to calculate the control law of the upper stage for delivery of the required tonnage of cargo to the required distance. Calculation examples are given.

It is shown that a similar system can be used for emergency evacuation of personnel from objects (ships, mining platforms, etc.) in the Arctic zone and Northern latitudes in the event of emergency situations, fires, the threat of explosions. The design of the transport system is protected by patents.

It is noted that ballistic missile stages taken off duty can be used as upper stages, which allows their efficient utilization.

An international emergency network in the Arctic zone can be established on the basis of a complex of ballistic cargo delivery systems.

Key words Arctic zone, ballistic transport system, emergency delivery, mathematical modeling, aerodynamic characteristics

Введение

Одним из основных направлений развития России и ряда других стран является освоение труднодоступных территорий Крайнего севера и Арктической зоны [1-3]. Это обусловлено важностью скорейшего освоения Северного морского пути (рис.1), наличием в этих районах больших запасов природных ресурсов и сложностью их разработки, в частности, на шельфе Ледовитого океана (рис.2). Кроме того, освоение северных районов России связано с необходимостью создания соответствующей инфраструктуры и оперативной доставки грузов, необходимых для обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала

Помимо тяжёлых климатических условий (низкие температуры, ветра, неразвитость инфраструктуры, ограниченный срок летней навигации, сложные метеоусловия и т.п.) большую опасность представляют пожары на кораблях (рис.3), на добывающих платформах (рис.4), на объектах инфраструктуры.



Рис.1 Проводка судов по Северному Морскому пути

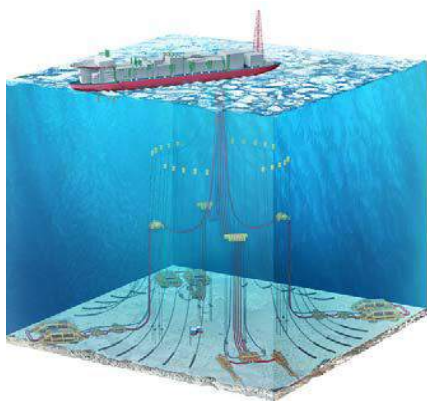


Рис.2 Добыча ресурсов с шельфа в Арктической зоне



Рис.3 Последствия пожара на ледоколе «Вайгач»



Рис.4 Пожар на морской добывающей платформе

Это приводит к необходимости экстренной доставки различных грузов – блоков аппаратуры взамен отказавших, медикаментов, оборудования, продовольствия, аварийно-спасательных средств, огнетушащих веществ и др., что в какой-то период невозможно осуществить ни авиацией, ни кораблями, ни наземным транспортом. В частности, проблема экстренной доставки актуальна для Северного морского пути (СМП) – как судов, так и береговой инфраструктуры. Актуальна и проблема экстренной эвакуации персонала при пожарах на морских добывающих платформах (рис.4) в северных широтах.

1. Баллистическая транспортная система для экстренной доставки грузов

Проблема экстренной доставки грузов с помощью баллистических систем рассмотрена в работе [4], где показана возможность использования снимаемых с вооружения ступеней баллистических ракет в мирных целях - для доставки грузовых контейнеров (рис.5) [5] и спасения персонала [6,7] (рис.6). Известно также, что вопросам гиперзвуковых баллистических систем значительное внимание уделялось и уделяется за рубежом [8-10].

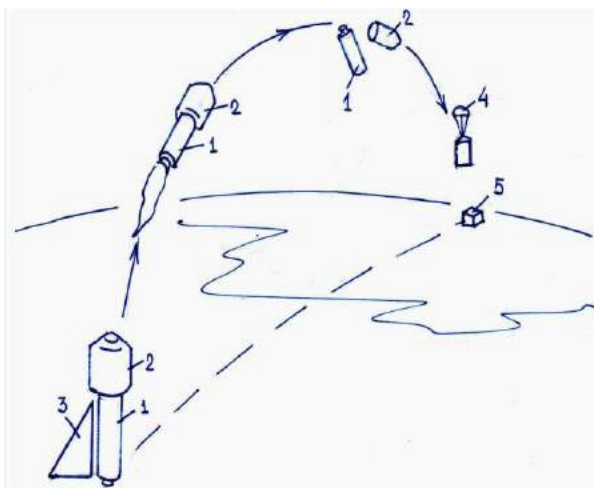


Рис.5 Схема экстренной доставки грузов (1 – разгонный блок, 2 – контейнер с грузом, 3 – стартовая станция, 4 – посадочная система, 5 – пункт назначения)

Стартовые станции для разгонных блоков с контейнерами могут представлять собой лёгкие закрытые сооружения с отражателем выхлопных газов. Перед применением в контейнер загружаются необходимые грузы и производится пуск к пункту назначения. При этом конструкция стартовой станции может разрушаться, а с пункта назначения может подаваться сигнал. Аналогично могут быть устроены баллистические эвакуационные системы (рис.6) для персонала, например, морской добывающей платформы. В спасательном модуле могут также размещаться электронные накопители информации. Мягкая посадка (приводнение) контейнеров может обеспечиваться парашютными системами, например, [7].

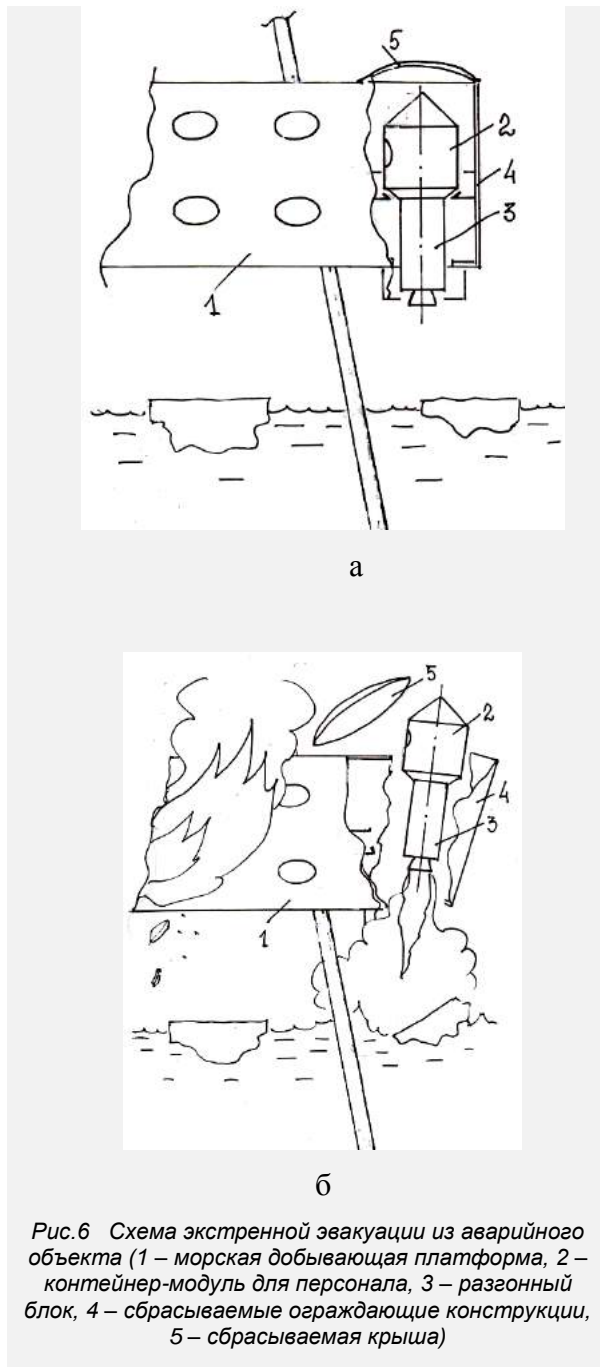


Рис.6 Схема экстренной эвакуации из аварийного объекта (1 – морская добывающая платформа, 2 – контейнер-модуль для персонала, 3 – разгонный блок, 4 – сбрасываемые ограждающие конструкции, 5 – сбрасываемая крыша)

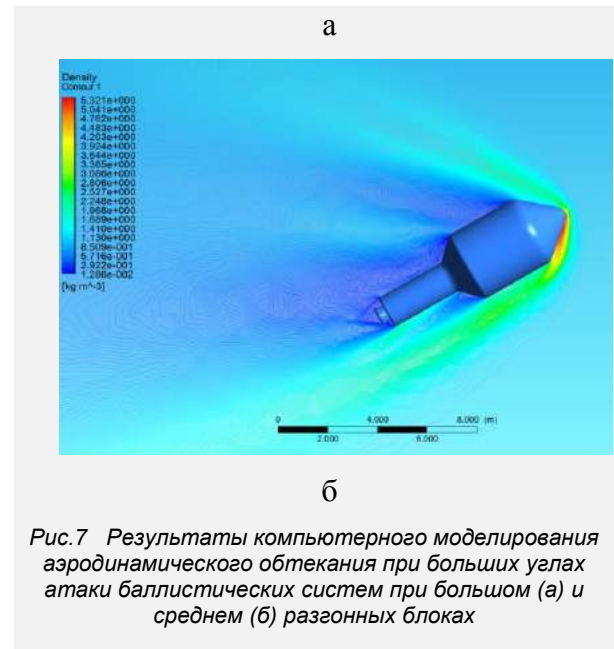
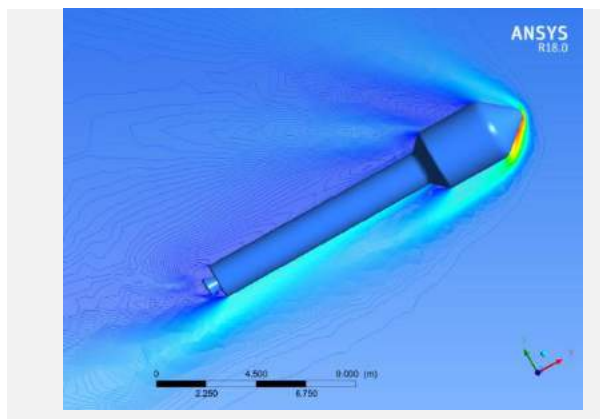


Рис.7 Результаты компьютерного моделирования аэродинамического обтекания при больших углах атаки баллистических систем при большом (а) и среднем (б) разгонных блоках

Особенностью транспортных и эвакуационных баллистических систем для объектов в высоких широтах является их относительно небольшие дальность действия (несколько десятков или сотен км ввиду, например, наличия стартовых станций на побережье вдоль СМП вблизи населённых пунктов) и тяговооружённость. Это позволяет при расчёте траектории пренебречь кривизной Земли, но требует уточнить аэродинамические характеристики из-за больших углов атаки α при полёте.

В частности, в работе [11] приведены данные об особенностях обтекания различных вариантов баллистических систем (рис.7), которые позволили значения коэффициентов аэродинамического сопротивления C_x и C_y при различных углах атаки α и числах Маха M (отношение скорости V объекта к скорости звука в атмосфере) – см.рис.8 и 9. Это позволило построить уточнённую модель движения баллистической системы на активном и пассивном участках траектории.



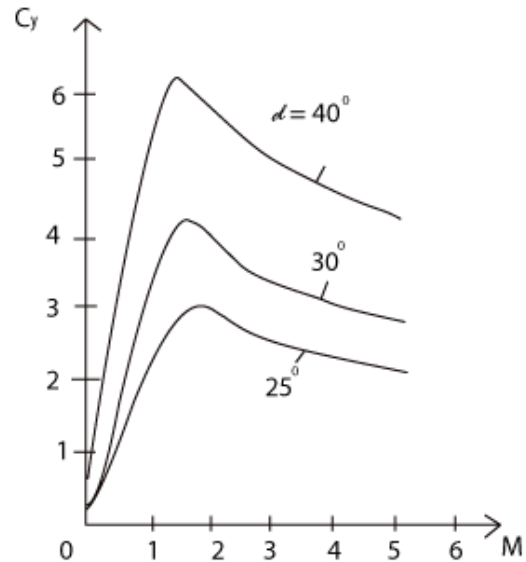
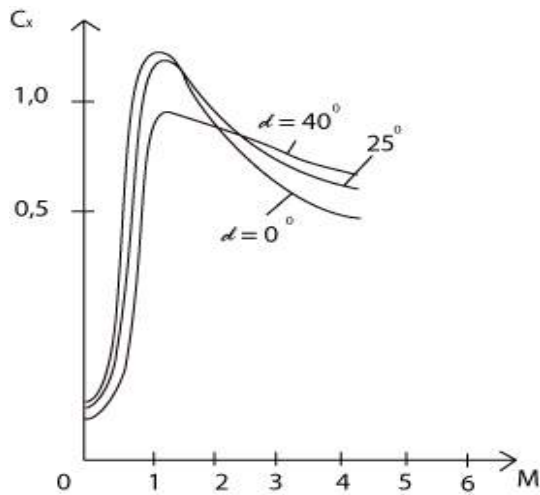


Рис.9 Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления для схемы на рис.7-б

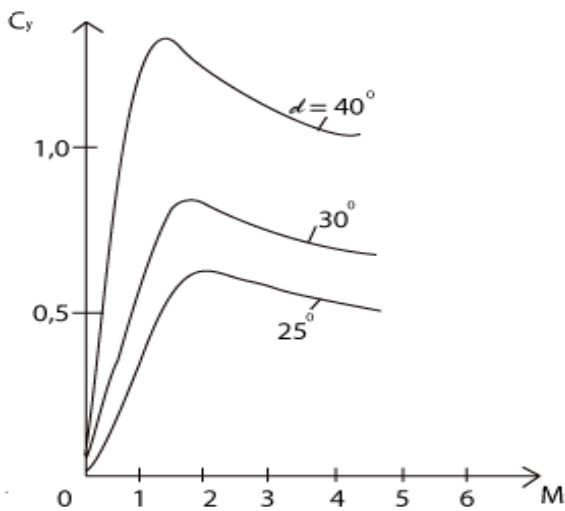
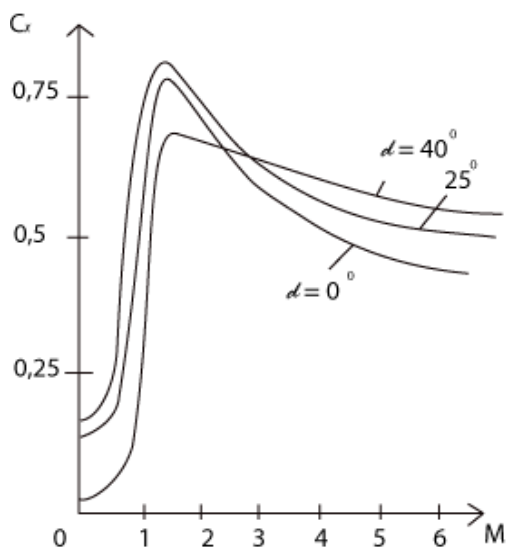


Рис.8 Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления для схемы на рис.7-а



2. Моделирование движения баллистической системы

3.1. На активном участке траектории (АУТ) (рис.10) математическая модель в предположении незначительности кривизны Земли ввиду ограниченной дальности полёта (это идёт «в запас» дальности) может быть описано системой дифференциальных уравнений [12,13]:

$$\left\{ \begin{aligned} m \frac{dV_H}{dt} &= -mg + (P - F_0) \sin \theta + F_n \cos \theta, & (1) \\ m \frac{dV_L}{dt} &= (P - F_0) \cos \theta - F_n \sin \theta, & (2) \\ \frac{dH}{dt} &= V_H, & (3) \\ \frac{dL}{dt} &= V_L, & (4) \end{aligned} \right.$$

где m – текущая масса разгонного блока с контейнером; t – текущее время, отсчитываемое от начала пуска; V_H, V_L – вертикальная и горизонтальная составляющие скорости; H, L – высота и дальность, отсчитываемая от стартовой станции; P – сила тяги разгонного блока; θ – программный угол; F_0, F_n – продольная и поперечная составляющие аэродинамической силы; g – ускорение свободного падения.

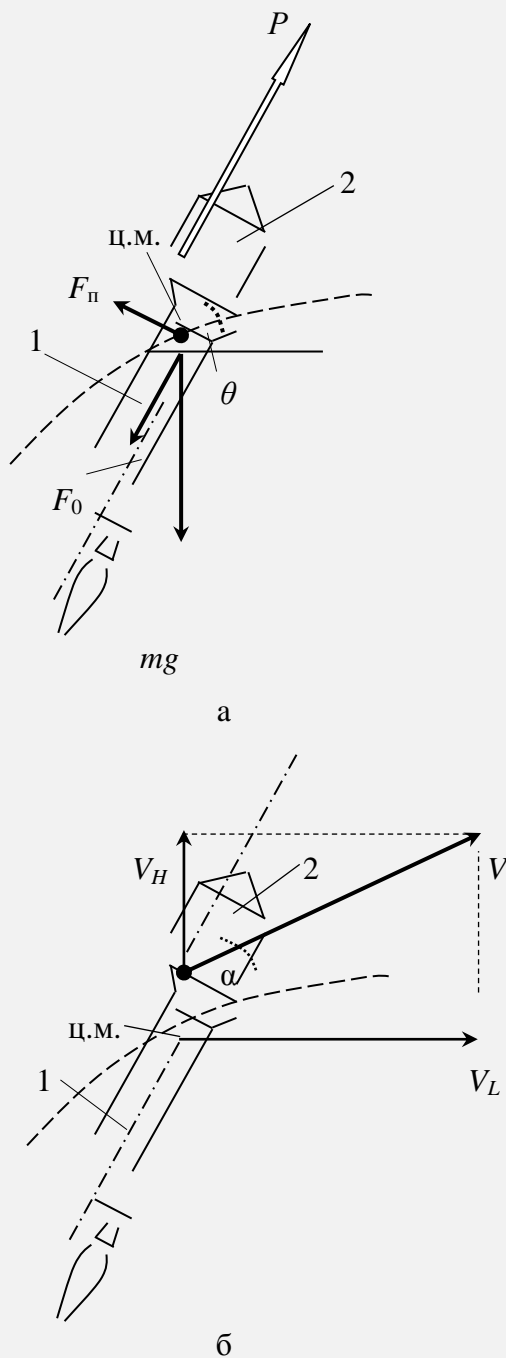


Рис.10 Расклад сил (а) и скоростей (б) при движении разгонного блока 1 с контейнером 2 на АУТ

продуктов сгорания из сопла ракетного двигателя разгонного блока; $p(H)$, $p_{атм}$ – атмосферное давление на высоте H и на уровне земли соответственно; $k_p \approx 0,15 \div 0,18$ – эмпирический коэффициент.

Аэродинамические силы и масса разгонного блока с контейнером определяются из выражений соответственно:

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_{п} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x(\alpha, M) \\ C_y(\alpha, M) \end{bmatrix} S \frac{\rho(H)}{2} (V_H^2 + V_L^2), \quad (6)$$

$$m = m_0 - Gt, \quad (7)$$

где S – площадь мишени баллистической системы; $\rho(H)$ – плотность атмосферы в зависимости от высоты H ; $\alpha = \theta - \arctg(V_H/V_L)$ – угол атаки; m_0 – стартовая масса.

Величины $p(H)$ и $\rho(H)$ могут быть определены по стандартной атмосфере [14]. Решение системы уравнений (1)-(4) с учётом (5)-(7) численными методами [15] при нулевых начальных условиях позволяет получить динамику величин $H(t)$, $L(t)$, $V_H(t)$ и $V_L(t)$. Длительность АУТ t_k может определяться массой топлива m_T в разгонном блоке и секундным массовым расходом:

$$t_k = \frac{m_T}{G}. \quad (8)$$

Величина перегрузки n на АУТ может быть найдена из выражения

$$n = 1 + \sqrt{1 + \frac{(P - F_0)^2 + F_{п}^2}{(mg)^2} - \frac{2P \sin \theta + \rho(V_H + V_L)^2 S(C_y \cos \theta - C_x \sin \theta)}{mg}} \quad (9)$$

3.2. На пассивном участке траектории (ПУТ) после выработки всей массы топлива m_T в разгонном блоке контейнер с грузом (эвакуируемым персоналом) может двигаться как отдельно (рис.11), так совместно с разгонным блоком. В конце ПУТ для мягкого приземления/приводнения контейнера может использоваться парашютная система или реактивная тормозная система.

Величина тяги P разгонного блока, используемая в (1) и (2), определяется из выражения [12,13]:

$$P = W_{п} G \left[1 - k_p \left(1 - \frac{p(H)}{p_{атм}} \right) \right], \quad (5)$$

где G , $W_{п}$ – секундный массовый расход и характеристическая скорость истечения в пустоте

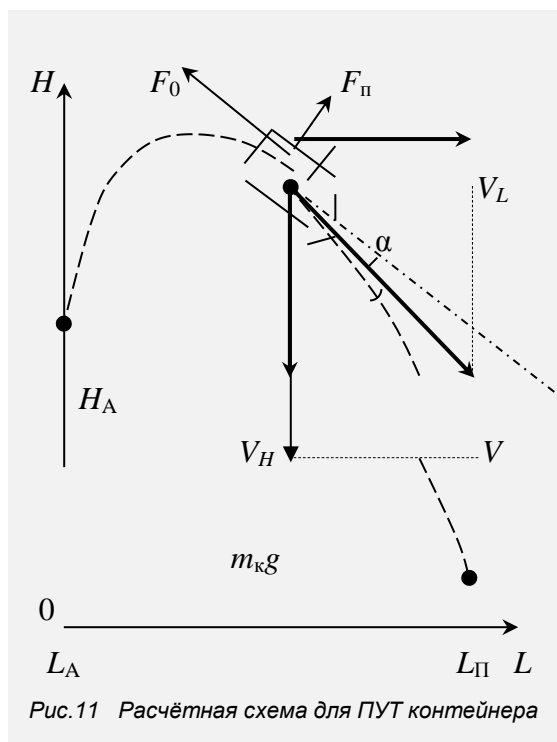


Рис.11 Расчётная схема для ПУТ контейнера

описано системой дифференциальных уравнений [12,13]:

$$m_k \frac{dV_H}{dt} = -m_k g - F_0 \sin(\alpha + \beta) + F_{\Pi} \cos |\mp\beta - \alpha|, \quad (10)$$

$$m_k \frac{dV_L}{dt} = -F_0 \cos |\mp\beta - \alpha| - F_{\Pi} \sin(\alpha + \beta) \quad (11)$$

(m_k – масса контейнера; $\beta = \arctg(V_H/V_L)$), причём выражения (3), (4) и (6) остаются в силе. Угол атаки α может быть нулевым (неуправляемый полёт), либо изменяемым или постоянным при управлении движением контейнера на ПУТ с использованием, например, небольших аэродинамических поверхностей.

Решение системы уравнений (10), (11), (3), (4), (6) при начальных условиях $H_A = H(t_k)$, $L_A = L(t_k)$, $V_H(t_k)$ и $V_L(t_k)$ позволяет найти траекторию движения контейнера на ПУТ.

Величина перегрузки n на ПУТ может быть найдена из выражения:

Математическая модель движения контейнера на ПУТ (также в предположении незначительности кривизны Земли) может быть

$$n = 1 - \sqrt{1 + \frac{F_0^2 + F_{\Pi}^2}{(m_k g)^2} + \frac{\rho(V_H + V_L)^2 S [C_y \cos |\mp\beta - \alpha| + C_x \sin(\alpha + \beta)]}{m_k g}} \quad (12)$$

3. Результаты моделирования

Для обоснования возможности экстренной доставки грузов и эвакуации персонала баллистическими системами разгонный блок-контейнер была разработана компьютерная программа для решения систем дифференциальных уравнений (1)-(4), (10) и (11) с учётом (5)-(8) методом Рунге-Кутты [15].

Точность получаемых решений оценивались двумя способами – изменением шага интегрирования и сравнением с известными аналитическими выражениями [12] при $F_0 = F_{\Pi} = 0$.

В программе на каждом шаге интегрирования решалась задача двумерной интерполяции коэффициентов $C_x(\alpha, M)$ и $C_y(\alpha, M)$ (см.рис.8,9) с использованием выражений:

$$C_{x,y}(\alpha, M) = f_{i,j} + (f_{i+1,j} - f_{i,j})x + (f_{i,j+1} - f_{i,j})y + (f_{i,j} - f_{i+1,j} - f_{i,j+1} + f_{i+1,j+1})xy, \quad (13)$$

где
$$x = \frac{\alpha - \alpha_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i}, y = \frac{M - M_j}{M_{j+1} - M_j}, \alpha \in [\alpha_i, \alpha_{i+1}], M \in [M_j, M_{j+1}], f_{k,l} = C_{x,y}(\alpha_k, M_l)$$

На рис.12 приведены варианты АУТ и ПУТ для двух вариантов – для большого разгонного блока (рис.7-а, $P_0 = 758,3$ кН, $m_r = 19,7$ т)¹ при $m_k = 16$ т и для малого разгонного блока (рис.7-б, $P_0 = 354,1$ кН, $m_r = 6,9$ т)² при $m_k = 5$ как при нулевом угле атаки α на ПУТ, так и при $\alpha = 10^\circ$. При этом

установлено, что положительный угол атаки на ПУТ позволяет несколько увеличить дальность полёта контейнера.

¹ Аналог 1-й ступени Minuteman-I

² Аналог 1-й ступени Polaris A-1

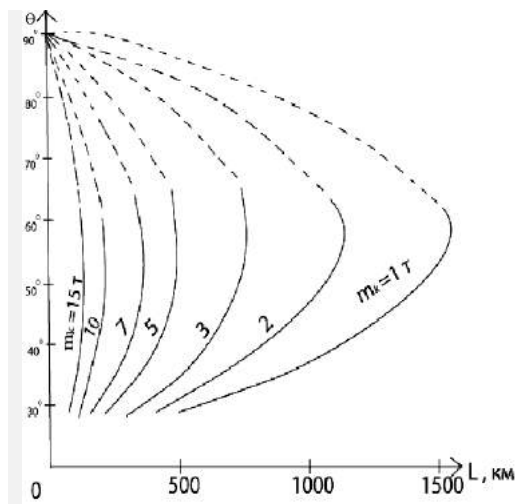


Рис.13 Влияние программного угла θ и массы контейнера m_k на дальность L доставки баллистической системой (рис.7-а)

На рис.13 приведены результаты моделирования дальности доставки контейнера большим разгонным блоком (рис.7-а) в зависимости от массы контейнера m_k и программного угла θ .

Выводы

1.Таким образом, показана возможность использования снимаемых с вооружения ступеней ракет в качестве разгонных блоков для экстренной доставки контейнера с остро необходимым грузом в труднодоступные районы – Арктическую зону, горную местность и т.п., в частности, к аварийным судам на Северном морском пути и объектам его инфраструктуры.

2.Также показана возможность применения разгонных блоков для экстренной эвакуации персонала и носителей информации из аварийных объектов, например, морских добывающих платформ в высоких широтах.

3.В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть возможности обеспечения мягкой посадки и многоразового применения разгонных блоков для регулярных гиперзвуковых баллистических транспортных трасс и сделать оценку аэродинамического нагрева контейнера с разгонным блоком.

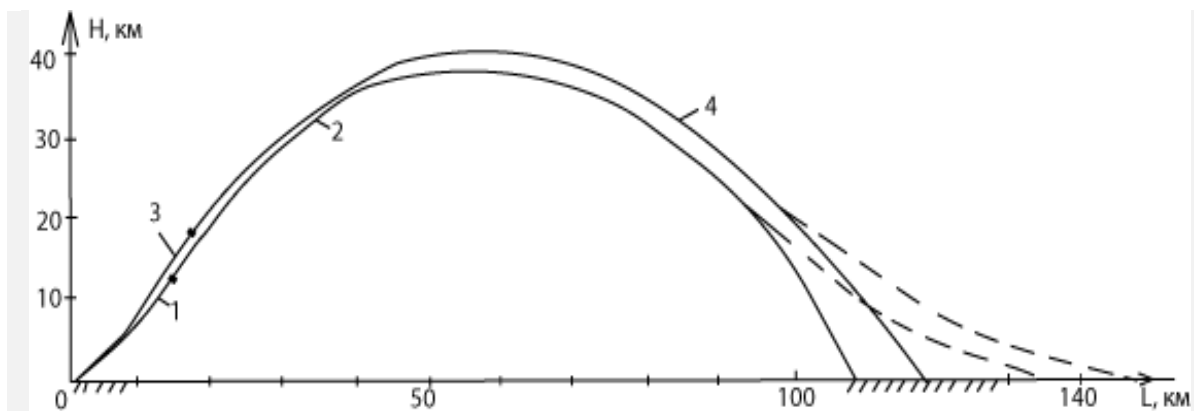


Рис.12 Траектории баллистической системы при $\theta=50^\circ$, пунктиром показано увеличение дальности ПУТ при $\alpha=10^\circ$ (1, 2 – АУТ и ПУТ при малом разгонном блоке; 3, 4 – АУТ и ПУТ при большом разгонном блоке)

Литература

1. Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. – Утверждены Президентом РФ 18.09.2008, № Пр-1069.
2. Указ Президента РФ «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» от 02.05.2014 № 296.
3. Указ Президента РФ «О государственной комиссии по вопросам развития Арктики» от 03.02.2015 № 50.
4. М.А.Лосев, А.А.Таранцев, А.А.Таранцев. Моделирование движения разгонного блока с контейнером для экстренной доставки грузов // Проблемы безопасности и ЧС, №2, 2017, с.55-62.
5. Устройство для локализации последствий аварии. Патент РФ № 2007204, МКИ⁵ А62С31/00, F42В15/00. 1990 г., автор А.А.Таранцев.
6. Устройство для эвакуации персонала с аварийного объекта. Патент РФ № 2068285 МКИ А62В37/00, В64С1/52, 1992 г., автор А.А.Таранцев.
7. Посадочная система. Патент РФ № 2001002, МКИ⁵ В64G1/00, 1990 г., авторы А.А.Таранцев и А.А.Таранцев.
8. Michael J.Kelly, A.C.Charania, John R.Olds. Simulating Global Hypersonic Point-To-Point Transportation Networks. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-2009-6403.

9. 9. John W. Hicks. Flight Testing of Airbreathing Hypersonic Vehicles. NASA Technical Memorandum 4524. NASA, 1993.
10. 10. S. Chiesa, G. Russo, M. Fioriti, S. Corpino. Status and Perspectives of Hypersonic Systems and Technologies with Emphasis on the Role of Sub-Orbital Flight. *Aerotecnica* Vol.88, No1/2, January-June 2009.
11. 11. Лосев М.А., Шевченко А.В. Ю Полежаева Е.А. Особенности моделирования движения разгонного блока с контейнером для экстренной доставки грузов // Проблемы управления рисками в техносфере, №3, 2017, с.107-115.
12. 12. Проектирование и испытание баллистических ракет / Под ред. В.И. Варфоломеева и М.И. Копытова. М.: Воениздат, 1970.
13. 13. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб и доп / Под ред. А.В. Солодова. М.: Воениздат, 1977.
14. 14. ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры.
15. 15. Р.В. Хемминг. Численные методы. Изд. 2-е, исправленное. М.: Наука, 1972.

References

1. Osnovy gosudarstvennoy politiki RF v Arktike na period do 2020 goda i dal'neyshuyu perspektivu. – Utverzhdeny Prezidentom RF 18.09.2008, № Pr-1069
2. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii «O sukhoputnykh territoriyakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii» of 02.05.2014 № 296.
3. Ukaz Prezidenta RF «O gosudarstvennoy komissii po voprosam razvitiya Arktiki» of 03.02.2015 № 50.
4. Losev M.A, Tarantsev A.A., Tarantsev A.A. Modeling of the movement of the accelerating unit with the container for emergency delivery of cargoes. *Problems of safety and emergency situations*, 2, (2017) 55-62.
5. Ustroystvo dlya lokalizatsii posledstviy avarii. Patent RF № 2007204, MKI5 A62S31/00, F42V15/00. 1990 g., avtor A.A. Tarantsev.
6. Ustroystvo dlya evakuatsii personala s avariynogo ob'yekta. Patent RF № 2068285 MKI A62V37/00, V64S1/52, 1992 g., avtor A.A. Tarantsev.
7. Posadochnaya sistema. Patent RF № 2001002, MKI5 V64G1/00, 1990 g., avtory A.A. Tarantsev i A.A. Tarantsev.
8. Michael J. Kelly, A.C. Charania, John R. Olds. Simulating Global Hypersonic Point-To-Point Transportation Networks. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-2009-6403.
9. John W. Hicks. Flight Testing of Airbreathing Hypersonic Vehicles. NASA Technical Memorandum 4524. NASA, 1993.
10. G. Russo, M. Fioriti, S. Corpino. Status and Perspectives of Hypersonic Systems and Technologies with Emphasis on the Role of Sub-Orbital Flight. *Aerotecnica* Vol.88, No1/2, January-June 2009.
11. Losev M.A., Shevchenko A.V., Polezhaeva E.A. Features of modeling of movement of the accelerating block with the container for emergency delivery of cargoes. *The problems of risk management in the technosphere*, 3(43), 107-115.
12. Proyektirovaniye i ispytaniye ballisticheskikh raket / Pod red. V.I. Varfolomeyeva i M.I. Kopytova. M.: Voenizdat, 1970.
13. S. Chiesa, Inzhenernyy spravochnik po kosmicheskoy tekhnike. Izd. 2-ye, pererab i dop Pod red. A.V. Solodova. M.: Voenizdat, 1977.
14. GOST 4401-81 Atmosfera standartnaya. Parametry.
15. R.V. Khemming. Chislennyye metody. Izd. 2-ye, ispravlennoye. M.: Nauka, 1972.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 629.12.001.2

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ СТЕПЕНИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ****Сергей Владимирович Головки**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика судов»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: elmech@astu.org

Николай Геннадиевич Романенко

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика судов»
Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: elmech@astu.org

Аннотация

Значительный физический износ любого судового оборудования может привести к уменьшению надежности функционирования и возрастанию аварийности, а также в некоторых случаях к потерям электрической энергии. Кроме того, работа судового оборудования во многом зависит не только от уровня качества его изготовления, но и от обоснованной эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. В статье представлены диагностические модели судового дизель-генератора как объекта управления с подсистемой диагностики и распределения мощности между дизель-генераторами по фактическому состоянию оборудования. В качестве объекта моделирования был выбран дизель 6ЧН 15/18(3Д6Н). Система диагностирования основана на сравнительном анализе текущих диагностических параметров и соответствующих эталонных с применением нейро-нечеткой логики. Это позволяет определить техническое состояние объекта диагностирования и создавать оптимальный алгоритм управления данными объектами.

Ключевые слова: диагностика, степень работоспособности, дизель-генератор, имитационная модель, нейронные сети.

**DEVELOPMENT OF MODELS OF OPERATION OF THE SHIP ENGINES OF
COMBUSTION ON THE BASIS OF THEIR DEGREE OF WORKING CAPACITY
WITH USE OF FUZZY LOGIC****Sergey V. Golovko**

Cand. Sci. Tech., the associate professor of department "Electric equipment and automatic equipment of vessels"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: elmech@astu.org

Nikolay G. Romanenko

Cand. Sci. Tech., the associate professor,
head of the department "Electric equipment and automatic equipment of vessels"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: elmech@astu.org

Abstract

The considerable physical wear of any ship equipment can lead to reduction of reliability of functioning and increase of accident rate and also in certain cases to losses of electric energy. Besides, operation of the ship equipment in many respects depends not only on level of quality of his production, but also on reasonable operation, maintenance and repair. Diagnostic models of the ship diesel generator as object of management with a subsystem of diagnostics and distribution of power between diesel generators on the actual condition of the equipment are presented in article. As subject to modeling the diesel 6ChN 15/18(3D6N) has been chosen. The system of diagnosing is based on the sravnitelkny analysis of the current diagnostic parameters and the sootvetkstvuyushchikh reference

with use of neurofuzzy logic. It allows to define technical condition of a subject to diagnosing and to create an optimum control algorithm of these objects.

Key words: diagnostics, working capacity degree, diesel generator, imitating model, neural networks.

Введение

Как известно, в процессе технического использования судового оборудования, его состояние непрерывно изменяется. На данный момент существует множество технических средств, методов и систем для получения диагностической информации о состоянии судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС) путём контроля и диагностики. Но вместе с тем необходимо усовершенствование и разработка новых технологий и способов эффективного технического обслуживания и ремонта по текущему состоянию СДВС.

В большинстве случаев, для осуществления процесса управления и диагностирования СДВС используются одни и те же модели, методы и технологии. Но их реализация выражается в различных аппаратных средствах. Объединение аппаратной среды управления и диагностирования позволит сделать еще один шаг вперед в сфере оптимизации и совершенствования эксплуатации СДВС [1].

В предыдущей работе [2] был смоделирован СДВС как объект управления. В данной статье представлена модель СДВС как объект управления с подсистемой диагностики, а также модель распределения мощности между дизель-генераторами с учетом их степени работоспособности. Модульная структура модели делает возможным изменение алгоритмов управления объектом, что позволит оценить их эффективность и перспективы дальнейшего развития. По разработанной методике были получены экспериментальные данные системы

управления двигателем. Также были проведены испытания и получены нагрузочные характеристики дизеля.

Разработка диагностической модели управления СДВС

Для моделирования процессов был выбран пакет MATLAB Simulink [4]. В качестве объекта управления в модели используется СДВС. Модели состоят из двух систем: система управления и система диагностики, каждая из которых в свою очередь делится на подсистемы (рис.1). Структура модели без подсистемы диагностики рассмотрена в работе [2].

Рассмотрим работу модели судового двигателя внутреннего сгорания с подсистемой диагностики [5]. На входе системы используем три управляющих сигнала и пять диагностических, на выходе имеет два. Для удобства восприятия условные обозначения сигналов с расшифровками сведены в таблицу 1.

Для реализации процесса создания нечетких правил в среде MATLAB использован специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox. Рассмотрим процесс разработки модели для степени работоспособности СДВС по двум блокам диагностических данных с применением обобщенного критерия Харрингтона [3]. Чтобы получить шкалу желательности, удобно пользоваться готовыми разработанными таблицами соответствий между отношениями предпочтения в эмпирической и числовой (психологической) системах (табл. 2).

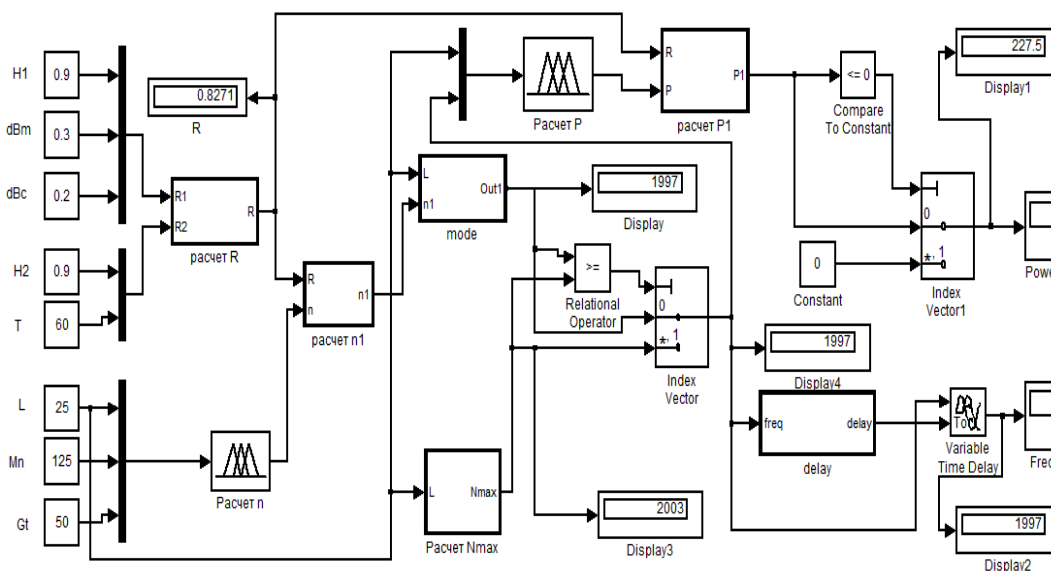


Рис. 1. Структура модели СДВС как объекта управления с подсистемой диагностики

Таблица 1

Параметры модели СДВС

№	Тип сигнала	Категория	Наименование сигнала	Переменная модели
1	вход	диагност.	комплексный критерий качества подшипника	H1
2	вход	диагност.	максимальный шум подшипника	dBm
3	вход	диагност.	собственный шум подшипника	dBc
4	вход	диагност.	комплексный критерий качества двигателя	H2
5	вход	диагност.	температура объекта диагностирования	T
6	вход	управ.	Положение рейки ТНВД	L
7	вход	управ.	Крутящий момент двигателя	Mn
8	вход	управ.	Расход топлива	Gt
9	выход	-	Развиваемая мощность двигателя	Power
10	выход	-	Измеренная частота вращения коленчатого вала	Freq

Значение частного отклика, переведённое в безразмерную шкалу желательности, обозначается через d_i ($i=1, 2, \dots, n$) и называется частной желательностью. Шкала желательности имеет интервал от нуля до единицы. Значение $d_i=0$ соответствует абсолютно неприемлемому

уровню данного свойства, а значение $d_i=1$ – самому лучшему значению свойства. Выбор отметок на шкале желательности 0,63 и 0,37 объясняется удобством вычислений: $0,63 \approx 1 - (1/e)$, $0,37 \approx 1/e$.

Таблица 2

Таблица соответствия

Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень хорошо	1,00 – 0,80
Хорошо	0,80 – 0,63
Удовлетворительно	0,63 – 0,37
Плохо	0,37 – 0,20
Очень плохо	0,20 – 0,00

Значение $d_i=0,37$ обычно соответствует границе допустимых значений.

В качестве выходной переменной используем степень работоспособности оборудования (R1, R2).

Далее следует определить функции принадлежности термов для каждой из переменных системы нечеткого вывода. Для этой

цели воспользуемся редактором функций принадлежности системы MATLAB (рис.2).

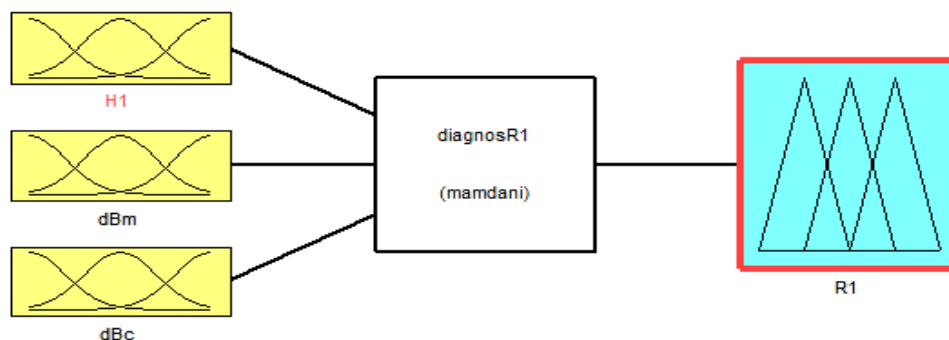


Рис. 2. Графический интерфейс редактора функций принадлежности после задания входной переменной H1

Следующим этапом служит задание правил нечеткого вывода с помощью редактора правил

системы MATLAB (рис. 3). Тоже сделаем со вторым блоком данных.

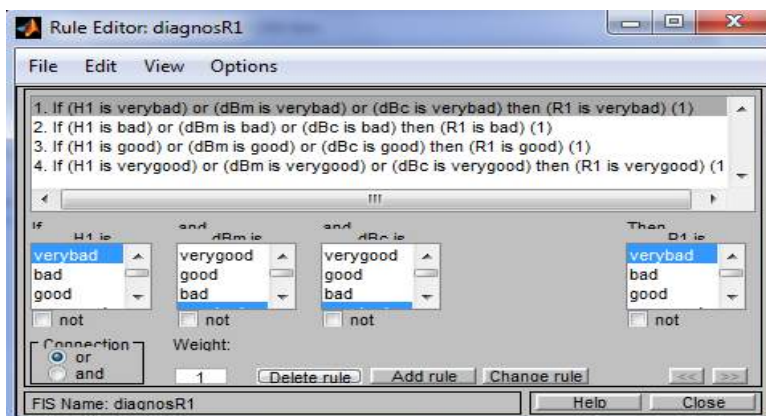


Рис. 3. Графический интерфейс редактора правил после задания базы правил для системы нечеткого вывода

Для получения степени работоспособности объекта исследования в целом применим обобщенную степень работоспособности, которая задается как среднее геометрическое степеней работоспособности объекта $R = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n R_u}$ [3].

Fuzzy Logic Toolbox также позволяет внедрять разработанные системы нечеткого логического вывода в динамические модели пакета Matlab Simulink. Для этой цели служат Simulink-блоки «Fuzzy Logic Controller»- нечеткие контроллеры. На рисунке 4 представлена модель вычисления общей работоспособности СДВС.

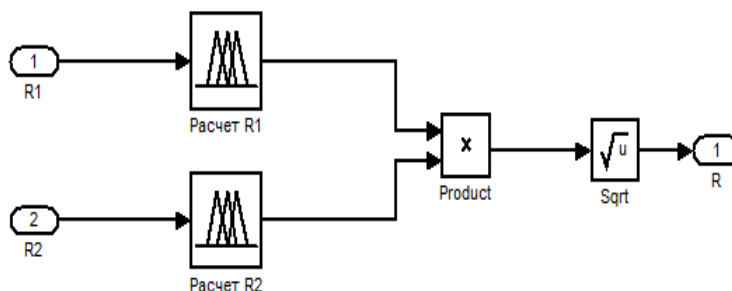


Рис. 4. Вычисление общей степени работоспособности СДВС в Matlab Simulink

В свою очередь управляющие сигналы поступают на мультиплексор, где формируется единый вектор входных значений, который далее подается на блок «Расчет n», задачей которого является расчет частоты вращения в соответствии с полученными входными данными (рис. 1) с применением нечетких алгоритмов типа Сугено (Sugeno) [2]. Этот тип называют еще гибридным сетями ввиду того, что они сочетают в себе достоинства нечетких алгоритмов и

способность к обучению, которая является свойством нейронных сетей. Далее в работу вступает блок «Расчет n1», который рассчитывает частоту вращения СДВС с коррекцией по текущему ресурсу двигателя, используя нечеткие правила (рис. 5). Аналогично для расчета мощности.

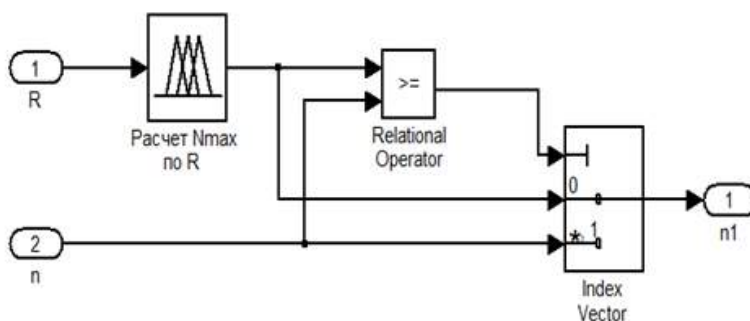


Рис. 5. Расчет частоты вращения с учетом степени работоспособности

Далее следует определить функции принадлежности термов для каждой из переменных системы нечеткого вывода расчета максимальной частоты вращения по степени работоспособности (Расчет N_{max} по R). Для каждого значения степени работоспособности объекта соответствует ограниченное значение частоты вращения. С этой целью воспользуемся редактором функций принадлежности системы MATLAB. Для задачи правил разрабатываемой системы нечеткого вывода воспользуемся редактором правил системы MATLAB.

Теперь можно выполнить оценку построенной системы нечеткого вывода N_{max} по R для задачи автоматического управления. С этой целью воспользуемся программой просмотра правил системы MATLAB и введем значения входных переменных для частного случая. Процедура нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели выдает в результате значение выходной переменной " N_{max} ".

Сравнение результатов нечеткого вывода для этих значений входных переменных, полученные на основе численных расчетов и с помощью разработанной нечеткой модели MATLAB, показывает хорошую согласованность модели и подтверждает ее адекватность в рамках рассматриваемой модели.

Для наглядности ниже приведен упрощенный алгоритм управления СД с учетом диагностики состояния СДВС и его описание (рис. 6). Где n – частота вращения СДВС при максимальном ресурсе; R - степень работоспособности; n_1 – частота вращения с учетом степени работоспособности. Мы заключили функцию управления в один блок «Блок управления», так как хотим выделить именно систему диагностики и ее работу совместно с блоком управления, подробное описание системы управления дано в статье.

Алгоритм системы управления СД с функцией диагностики заключается в следующем. После задания управляющих параметров и поступления диагностических данных от двигателя происходит расчет оптимальной частоты вращения коленчатого вала и расчет степени работоспособности двигателя в целом. Микропроцессорный блок определяет остаточный ресурс СДВС и, если он достигает критического значения, то подается команда на аварийный останов судового двигателя, если же двигатель сохраняет некоторый запас работоспособности, то система определяет развивающуюся неисправность и корректирует управление по частоте. На начальной стадии эксплуатации и отсутствии недопустимых перегрузок сигнал поступает в блок управления, который обеспечивает нормальную работу двигателя согласно заданным параметрам и текущему режиму эксплуатации. Затем цикл возобновляется. Подсистема диагностики позволит:

- своевременно отслеживать и предотвращать аварийный останов оборудования;
- снизить информационную нагрузку на оператора, за счет уменьшения количества обращений к состоянию и параметрам подсистемы диагностики;
- снизить возможные ложные аварийные ситуации;
- пополнять базу знаний достоверными данными;
- снизить нагрузку на оператора за счет введения кратковременных периодов отдыха.

В среде MATLAB Simulink также была разработана модель распределения мощности между двумя дизель-генераторами в зависимости от их степени работоспособности с описанными входными и выходными лингвистическими переменными.



Рис. 6. Упрощенный алгоритм управления СДВС с учетом функции диагностики технического состояния

Система работает следующим образом. На вход нечетких контроллеров 1 - 4 подаются диагностические параметры дизель-генераторов. На основе алгоритма нечеткого вывода Сугено формируется выходной сигнал. По выходным сигналам с нечетких контроллеров 1 и 2 вычисляется степень работоспособности первого дизель-генератора, а по выходным сигналам с нечетких контроллеров 3 и 4 – второго дизель-генератора, которые затем поступают на вход контроллеров 5 и 6. В зависимости от степени работоспособности дизель-генераторов и загрузки станции на выходе нечетких

контроллеров 5 и 6, на основе алгоритма нечеткого вывода Мамдани, формируется сигнал загрузки генераторов. Таким образом, рассматриваемая система автоматического управления генераторами состоит из 6 нечетких контроллеров. Структура автоматической системы управления дизель-генераторами приведена на рисунке 7.

В последнее время аппарат нейронных сетей признаётся специалистами как один из наиболее перспективных для решения слабо или плохо структурированных задач прикладного системного анализа.

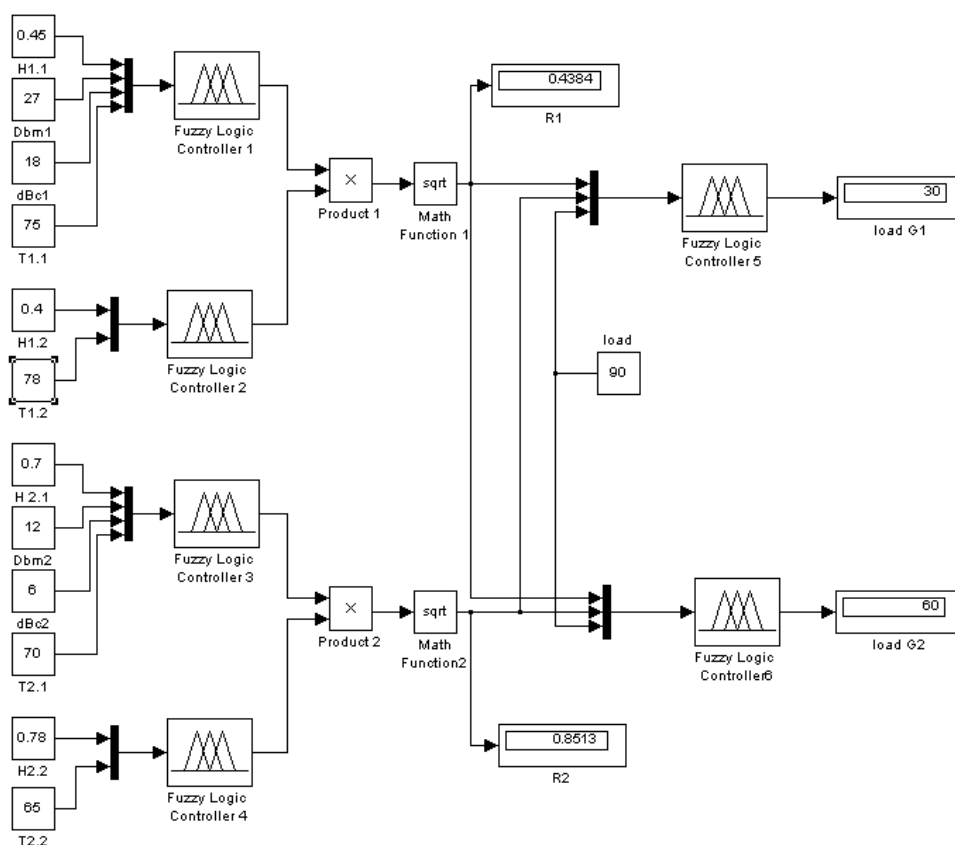


Рис.7. Модель распределения мощности между дизель-генераторами по фактическому состоянию оборудования

Заключение

Авторы своей целью ставили создание адекватной модели судового двигателя (СД), которая должна учитывать технические и технологические параметры конкретного двигателя.

Для разработки модели были проведены серии экспериментов, в процессе которых параллельно снимались и записывались массивы данных, характеризующие поведение системы управления и ответные реакции объекта управления. Также был собран массив данных, характеризующий изменение расхода топлива и

мощности, выдаваемой двигателем в процессе работы

Данная структура модели является наиболее гибкой и применима для различных конструкций судовых двигателей при сохранении прежнего уровня эффективности. Моделирование таких сложных объектов позволяет отказаться от дорогостоящих стендовых испытаний и создания для этих целей специальных программно-аппаратных комплексов. Применение функции диагностики в системах управления позволяет увеличить срок службы двигателей, а также повысить их экономичность, прогнозировать возможные неисправности, что снижает затраты на средние и капитальные ремонты и обслуживание.

Литература

1. Буй Нгок Хай., Надеев А.И., Свирепов Ф.В. Интеллектуальное управление судовым двигателем внутреннего сгорания с учетом диагностики состояния оборудования. Вестник. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология – 2011. – № 1. – С. 45–50.
2. Буй Нгок Хай., Надеев А.И., Головки С.В., Свирепов Ф.В. Моделирование судового дизеля как объекта управления на базе нечеткой логики. Вестник. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология – 2012. – № 1. – С. 109–116.
3. Головки С.В. Управление судовыми системами автоматизации на основе интеллектуального анализа диагностических данных. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.13.06. Астрахань – 2009.
4. Головки С.В. Моделирование автоматической системы управления судовой электростанции с учетом состояния оборудования. Вестник. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология – 2014. – № 3. – С. 58–63.
5. Буй Нгок Хай, Головки С.В., Свирепов Ф.В., Надеев А.И. Разработка модели судового двигателя внутреннего сгорания с подсистемой диагностики технического состояния на базе нечеткой логики. Морские интеллектуальные технологии, - Санкт –Петербург. - 2012, №2. с. 45-49.

References

1. Buj Ngok Haj., Nadeev A.I., Svirepov F.V. Intellektual'noe upravlenie sudovym dvigatelem vnut-rennego sgoraniya s uchetom diagnostiki sostoyaniya oborudovaniya. Vestnik. Astrahan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiy. 2011. № 1. S. 45–50.
2. Buj Ngok Haj., Nadeev A.I., Golovko S.V., Svirepov F.V. Modelirovanie sudovogo dizelya kak ob"ekta upravleniya na baze nechetkoj logiki. Vestnik. Astrahan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2012. № 1. S. 109–116.
3. Golovko S.V. Upravlenie sudovymi sistemami avtomatizacii na osnove intellektual'nogo analiza diagnosticheskikh dannyh. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Special'nost' 05.13.06. Astrahan', 2009.
4. Golovko S.V. Modelirovanie avtomaticheskoy sistemy upravleniya sudovoj ehlektrostantsii s uchetom sostoyaniya oborudovaniya. Vestnik. Astrahan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014. № 3. S. 58–63.
5. Buj Ngok Haj, Golovko S.V., Svirepov F.V., Nadeev A.I. Razrabotka modeli sudovogo dvigatelya vnut-rennego sgoraniya s podsystemoj diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya na baze nechetkoj logiki. Morskie intellektual'nye tekhnologii, Sankt –Peterburg. 2012, №2. s. 45-49.

УДК 531/534.001.24:[004.43:004.94]

ПРОФОРИЕНТИРОВАННАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПО МЕХАНИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ «МОРСКОГО» ПРОФИЛЯ

Елена Владимировна Пономарёва

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»
Астраханский государственный технический университет
414056, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: acmpax@rambler.ru

Алексей Владимирович Синельщиков

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
Астраханский государственный архитектурно-строительный университет
414056, Астрахань, ул. Татищева, 18
e-mail: laex@bk.ru

Ольга Александровна Хохлова

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»
Астраханский государственный технический университет
414056, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: zaphy@yandex.ru

Ксения Владимировна Кулёмина

кандидат филологических наук, доцент кафедры «Иностранные языки»
Астраханский государственный технический университет
414056, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: ksenia_v_k@mail.ru

Аннотация

Подготовка инженеров осуществляется в процессе изучения естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин, в том числе теоретической механики, преподавание которой в современном ВУЗе сопряжено с определенными трудностями. Возникает потребность в создании эффективных интерактивных средств дистанционного обучения (ИСДО), направленных на организацию самостоятельной работы студентов. В большинстве существующих ИСДО по теоретической механике частично или полностью отсутствуют возможности: 1) адаптации материала по заданным критериям для обеспечения требуемого уровня сложности и объема изучения; 2) разработки и внедрения принципиально новых расчетных заданий. Отличительными особенностями разработанного авторами ИСДО стали использование при изучении теоретической механики средств специализированных математических пакетов, а также ориентация излагаемого материала на будущую профессиональную деятельность студентов. Разработана методология проведения расчетов статических и прочностных параметров механических систем в системах Maple и MathCAD. Сформирован комплекс программ, используемый как генератор уникальных многовариантных расчетных профориентированных заданий, ранжируемых по степени сложности.

Ключевые слова: теоретическая механика, интерактивные средства обучения, компьютерное моделирование, генератор профориентированных многовариантных заданий.

PROF-ORIENTED LEARNING SYSTEM ON MECHANICS FOR STUDENTS OF THE "SEA" PROFILE

Elena V. Ponomareva

the associate professor, Cand. Sci. Phys.-Math.,
the associate professor of department "Mechanics and engineering graphics"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: acmpax@rambler.ru

Aleksey V. Sinelshchikov

the associate professor, Cand. Sci. Tech.,
the associate professor of department "Industrial and civil engineering"
Astrakhan state architectural and construction university
Tatishcheva, 18, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: laex@bk.ru

Olga A. Khokhlova

the associate professor, Cand. Sci. Tech.,
the associate professor of department "Mechanics and engineering graphics"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: zaphy@yandex.ru

Kseniya V. Kulemina

Cand. Sci. Phil., the associate professor of department "Foreign languages"
Astrakhan state technical university
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: ksenia_v_k@mail.ru

Abstract

The training of engineers is carried out in the process of studying natural-science and general professional disciplines, including theoretical mechanics, and the teaching of this discipline is fraught with certain difficulties in modern universities. There is a need to create effective interactive distance teaching tools (IDTT) aimed at organizing independent work of students. Most of the existing IDTT's on theoretical mechanics are partially or completely lacking the possibilities: 1) adaptation of the material to specified criteria to ensure the required level of complexity and scope of study; 2) development and implementation of fundamentally new accounting tasks. Distinctive features of the ISDO developed by the authors were the use in the study of theoretical mechanics of specialized mathematical packages, as well as the orientation of the material presented on the future professional activity of students. The methodology of calculation of static and strength parameters of mechanical systems in Maple and MathCAD systems is developed. A set of programs has been created, which is used as a generator for unique multivariable computed pro-oriented tasks, ranked according to the degree of complexity.

Key words: theoretical mechanics, interactive distance teaching tools, computer modeling, generator of prof-oriented multi-choice problems.

Введение

В настоящее время Российская экономика нуждается в кардинальной модернизации. В значительной мере это связано с критической зависимостью отдельных отраслей национального хозяйства от зарубежных поставщиков и технологий. Для решения таких приоритетных задач, как импортозамещение, повышение энергоэффективности и ресурсосбережения, развитие ядерных, космических, медицинских и информационных технологий, необходимы высококвалифицированные инженерные кадры, способные обеспечить конкурентоспособность российской продукции и технологий на внутреннем и международном рынках.

Современные реалии ставят перед системой высшего профессионального образования проблему обеспечения регионов квалифицированными инженерными кадрами, умеющими самостоятельно учиться и овладевать профессиональными видами деятельности, понимать фундаментальные инженерные науки, обладать мультидисциплинарным системным мышлением, иметь высокие коммуникативные качества, способность к творческому, критическому, самостоятельному мышлению.

Подготовка будущих инженеров осуществляется в процессе изучения естественнонаучных дисциплин и дисциплин общепрофессионального цикла, в том числе теоретической механики, которая является базой для изучения других родственных технических дисциплин (технической механики, прикладной механики, сопротивления материалов, теории

механизмов и машин, деталей машин, строительной механики, основ конструирования машин и др.). Знания законов и принципов теоретической механики необходимы для решения многих профессиональных задач (расчёт, сооружение и эксплуатация высотных зданий, мостов, тоннелей, плотин, гидромелиоративных сооружений, трубопроводного транспорта нефти и газа и др.). Изучение теоретической механики помогает обучаемым самостоятельно строить и использовать математические и физические модели объектов и явлений реального мира, связывать мир абстрактных понятий математики с миром реальных объектов – машин, конструкций, приборов, расширяет их научный кругозор, развивает способности к аналитическому и логическому мышлению. В рамках данной дисциплины практическое применение общих понятий математики и физики к исследованию реальных систем и их моделей формирует фундаментальные знания, необходимые для самостоятельного решения задач, возникающих в ходе обучения студентов и их будущей профессиональной деятельности.

Тем самым, теоретическая механика как наука является научной основой большинства областей современной техники, а как учебная дисциплина теоретическая механика, наряду с математикой и физикой, имеет большое общеобразовательное значение, её основы необходимо знать инженеру любой квалификации, направления, специальности.

Вместе с тем, преподавание теоретической механики в современном ВУЗе сопряжено с

определенными трудностями. Первая связана с тем, что дисциплина является достаточно сложной для восприятия студентами начальных курсов и её правильное понимание возможно при наличии хорошей физико-математической подготовки студентов. Преподаватели технических ВУЗов отмечают у студентов начальных курсов низкий уровень необходимой физико-математической базы, недостаточную мотивацию и заинтересованность к изучению механики, слабую осведомленность о её роли в будущей профессии. Это свидетельствует об отсутствии преемственности между курсами математики, физики, механики и дальнейшими профилирующими дисциплинами и недостаточной профессиональной направленности в их преподавании. Вторая сложность связана с резким сокращением аудиторных часов на изучение дисциплин механического профиля. Негативные тенденции последних двух-трех десятков лет привели к снижению числа аудиторных часов на курс теоретической механики. С переходом на Федеральные Государственные образовательные стандарты (ФГОС) прежние двух-, трёхсеместровые курсы теоретической механики в технических вузах сократились до одного семестра. Число аудиторных часов в целом за последние годы снизилось в два-три раза - типовой курс теоретической механики составляет теперь 54 аудиторных часа (18 часов лекций и 36 часов практических занятий) в течение одного семестра, что недопустимо мало для качественного освоения данной дисциплины. В условиях резкого сокращения числа аудиторных часов ведущие лекторы вынуждены искать пути оптимизации процесса обучения теоретической механике, поскольку, даже при очном обучении, студент существенную часть времени занят самостоятельной работой. Такое положение вещей обуславливает потребность в поиске и создании эффективных интерактивных средств дистанционного обучения (ИСДО), направленных на организацию самостоятельной работы студентов, усвоение знаний изучаемых дисциплин и формирование способностей применить эти знания в будущей профессиональной деятельности.

1. Использование компьютерных технологий в учебном процессе

ИСДО являются одним из перспективных направлений, используемых для постановки и решения образовательных, научно-исследовательских и инженерных задач в области механики. Подобные системы с успехом используются для создания и развития электронных форм обучения в сфере высшего профессионального и послевузовского образования.

Эффективность использования ИСДО подтверждена более чем 20-летним опытом их применения. Еще в 90-х годах прошлого века

предпринимались попытки создания мультимедийных систем, направленных на изучение технических наук, в частности, теоретической механики (работы Ю.Ф. Голубева, В.Е. Павловского, А.В. Корецкого, Н.В. Осадченко и др.). Дальнейшее развитие было связано с использованием интерактивных возможностей персональных компьютеров и сети интернет (работы Г.И. Мельникова, А.Г. Кривошеева, В.В. Глаголева, В.И. Латышева и др.). Преимущественной формой представления материалов был гипертекст, www-технологии, сетевые электронные учебники (работы А.И. Кобрин, В.Г. Кузьменко; В.Е. Павловского, Т.О. Невенчанной, Е.В. Пономаревой [1-9]). В последнее время все чаще стали появляться работы, основанные на совмещении традиционных подходов создания информационно-обучающих систем и возможностей специализированных математических пакетов – Maple и MathCAD (работы М.Н. Кирсанова [10], А.В. Матросова [11], Е.Г. Макарова, В.Д. Бертяева, В.П. Дьяконова), что не только повысило научно-практический уровень, но и открыло новые пути для повышения интерактивности подобных систем.

Несмотря на множество существующих ИСДО по теоретической механике, в большинстве из них частично или полностью отсутствуют возможности: 1) адаптации по заданным критериям теоретического и информационного материала, упражнений и заданий для обеспечения требуемого уровня сложности и объема изучения; 2) повышения интерактивности ИСДО и их представления в виде виртуальных стендов (2D и 3D-лабораторий) для изучения механических систем; 3) использования при создании ИСДО однородных инструментальных средств, обеспечивающих единообразие облика и стиля системы; 4) разработки и внедрения принципиально новых расчетных заданий, ориентированных не только на формирование базовых теоретических знаний по теоретической механике, но и на приобретение навыков и умений решения задач, тесно связанных с будущей профессиональной деятельностью, на укрепление междисциплинарных связей дисциплин механического профиля, развитие склонности и способности к творческому мышлению, позволяющему самостоятельно строить и использовать математические и физические модели объектов и явлений реального мира.

2. Ориентация материала на профессиональную деятельность студентов

Авторами в настоящее время ведется развитие ИСДО в форме электронного учебника по теоретической механике [1], разработанного в 2003 году на базе кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Астраханского государственного технического университета. В состав электронного учебника добавлен раздел

«Колебания», расширен лекционный материал и существенно пополнена база тестовых заданий.

Отличительными особенностями данного ИСДО стали использование при изучении механики средств специализированных математических пакетов, а также ориентация излагаемого в нём материала на будущую профессиональную деятельность студентов - авторы постарались сопроводить изложение курса достаточным количеством примеров практического применения из области будущей профессиональной деятельности, составленных в доступной для студентов форме. Так, в разделе «Статика» рассмотрены примеры определения силы давления мостового крана на рельсы, задачи расчёта усилий в стержнях ферм мостов и перекрытий реальных зданий, определения грузоподъёмности строп по заданному типу нагружения, представлены задачи определения максимального значения веса противовеса и полезного груза, поднимаемого краном с противовесом. Показаны примеры дальнейшего использования полученных знаний в профессиональной деятельности - подвергнут расчётному анализу на волнении Каспийского моря плавучий кран «Волгарь» грузоподъёмностью 1400/1600 т (рис. 1), дооборудованный для выполнения грузовых операций с увеличенной до 1600 т грузоподъёмностью при волнении до 2-х баллов и ветре не более 10 м/с, а также на волнении моря 3 балла и силе ветра до 5 баллов при грузоподъёмности до 1400 т. Район плавания – смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3%-ной обеспеченности 4,0 м, с удалением от места убежища не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль. Построена расчётно-динамическая модель крана, разработанная в среде CSI SAP 2000, нагруженная полезным грузом 1200 т на вылете 27 (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид плавучего крана «Волгарь» грузоподъёмностью 1400/1600 т (без вантовой стрелы)

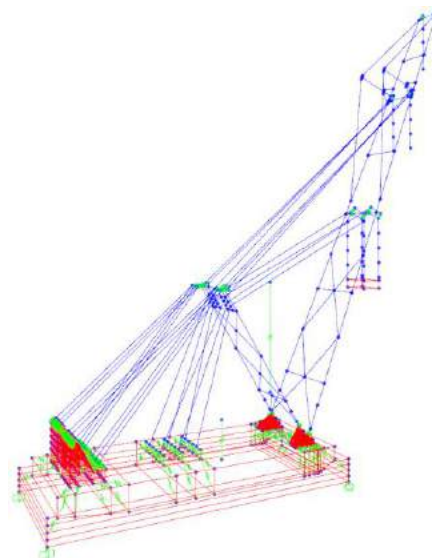


Рис. 2. Конечно-элементная РДМ несамоходного морского плавучего крана «Волгарь» г/п 1400/1600 т с вантовой стрелой: 1045 узлов, 1873 конечных элементов, степеней свободы $n = 6270$

В каждой решаемой задаче главный акцент поставлен на понимании физического смысла применяемого закона, после чего производится математическое оформление решения. Некоторые задачи решены несколькими способами, проведён анализ используемых при решении законов механики и анализ полученных результатов с проверкой правильности решения, сделаны выводы.

Применение подобных профессионально-ориентированных задач является основным средством реализации прикладной направленности обучения теоретической механике в технических и строительных ВУЗах.

3. Постановка и решение задачи: разработка генератора многовариантных заданий разного уровня сложности

Авторами разработана методология проведения статических расчетов в системах MathCAD и Maple, сформирован комплекс mws-программ, написанных на математически ориентированном языке программирования Maple. Комплекс программ предназначен для компьютерного моделирования и автоматизации расчета статических параметров механических систем (твердых тел, составных конструкций, ферм) с визуализацией результатов (отображением двух- и трехмерных расчетных схем с нанесением всех размеров, приложенных нагрузок, а также при необходимости с построением графических зависимостей расчетных параметров от размеров конструкции). Разработанные программы позволяют не только решать поставленные задачи, но и используются как генераторы уникальных многовариантных профориентированных расчетных заданий, ранжируемых по степени сложности. Каждая

программа связана с решением конкретной типовой задачи и структурно входит в раздел (тему) ИСДО по теоретической механике [1]. Работу с программой предваряет изучение теоретического материала по соответствующей теме, анализ общей постановки задачи, включая план ее решения с необходимыми

теоретическими пояснениями и примерами, а также описание принципа работы самой программы.

Примеры схем многовариантных заданий различного уровня сложности приведены на рис. 3.

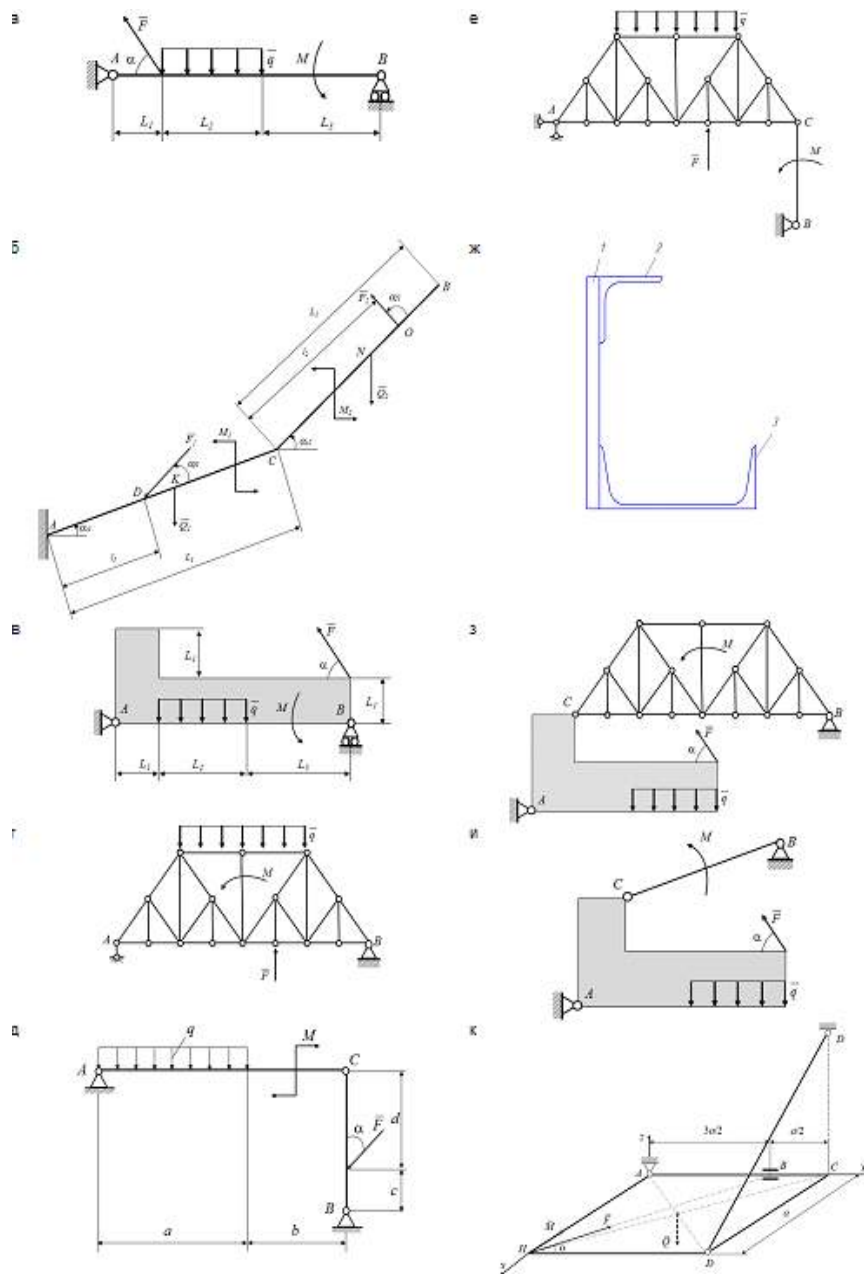


Рис. 3. Примеры реализации методологии: многовариантные задания различного уровня сложности: а - плоская система сил, приложенных к твердому телу; б - плоская система сил, приложенных к твердому телу, состоящему из нескольких наклонных стержней, жестко связанных между собой; в - плоская система сил, приложенных к твердому телу, выполненному в форме плоской пластины; г - плоская система сил, приложенных к плоской ферме; д - плоская составная конструкция, состоящая из прямолинейных стержней; е - плоская составная конструкция, состоящая из прямолинейного стержня и фермы; ж - плоская составная конструкция, состоящая из прямолинейного стержня и плоской пластины; з - плоская составная конструкция, состоящая из плоской фермы и плоской пластины; и - центр тяжести: стержневая фигура, пластина, объем, плоское сечение; к - пространственная статика

Задачи типа (рис. 3,а) являются частным случаем заданий типа (рис. 3,б), если количество стержней принято равным единице, а угол наклона к горизонту составляет ноль градусов. В задачах первых четырех типов твердое тело может быть закреплено при помощи следующих сочетаний связей: 1) жесткая заделка; 2) шарнирно-подвижная и шарнирно-неподвижная опоры; 3) стержень и шарнирно-неподвижная опора; 4) сочетание трех стержневых опор; 5) сочетание трех шарнирно-подвижных опор; 6) сочетание стержней и шарнирно-подвижных опор. Помимо прямолинейного расположения оси твердого тела (см. рис. 3,а), предусмотрена возможность построения расчетных схем, состоящих из множества стержней, расположенных под углом друг к другу (количество стержней задается пользователем программы) (см. рис. 3,б), а также схем составных конструкций, включающих в себя сочетания элементов «стержень – ферма – плоская пластина» (см. рис. 3, д-з). Во всех заданиях на составную конструкцию, помимо определения реакций в опорах, обучаемому предлагается дополнительно рассчитать положение центра тяжести. В заданиях (см. рис. 3, д-з) предусмотрена проверка правильности решения с использованием принципа возможных перемещений (раздел «Аналитическая механика»).

Отдельные положения предложенной методики встречаются в работах [1, 4 - 6, 7, 10], однако в настоящее время аналога, реализующего в полном объеме ИСДО, способную решать образовательные и научно-практические задачи, генерировать задания заданной сложности с автоматической проверкой получаемых результатов, формировать банк многовариантных профиориентированных заданий различной сложности, не существует. Авторами ведется работа над расширением количества многовариантных заданий, реализуются алгоритмы расчетов не только статических, но и кинематических, динамических и прочностных характеристик механических систем.

Заключение

Использование ИСДО при решении образовательных и научно-практических задач в области механики существенно повышает интерес обучаемых к дисциплине за счет лучшей наглядности излагаемого материала. Предметная область «теоретическая механика» является подходящей основой для использования таких средств информационных технологий, как компьютерное моделирование и визуализация, что позволяет существенно обогатить и активизировать учебный и исследовательский процесс. Совместное применение ИСДО и специализированных математических пакетов (Maple, MathCAD) выводит подобные работы на новый качественный уровень, делая их

адекватными современным требованиям и возможностям информационных технологий. Формирование единой базы вычислительных алгоритмов и прикладных универсальных программ в среде математических пакетов Maple и MathCAD позволяет автоматизировать вычисления, графически отобразить полученные результаты, построить двух- или трехмерные анимированные модели и «почувствовать» решение задач в «динамике». Варьируя исходные данные, можно решать новые учебные задачи и генерировать разные по сложности варианты заданий для студентов. Применением для изучения статики не абстрактных моделей, а реальных конструкций (ферм мостов, кранов, перекрытий и т.п.) достигается лучше понимание излагаемого материала и его роли в будущей профессиональной деятельности.

Литература

1. Невенчанная Т.О., Павловский В.Е., Пономарева Е.В. Электронный Интернет-учебник по теоретической механике. Свидетельство об официальной регистрации № 2004612620. Зарегистр. в реестре 3.12.2004.
2. Ponomaryova E.V., Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E. The Concept of the Internet Textbook on Theoretical Mechanics. Innovations in E-learning, Instruction Technology, Assessment and Engineering Education, Springer Netherlands, 2007. s. 468. S.373 - 377.
3. Ponomareva E.V., Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E. Concept, structure and program realization of the Internet textbook on classical mechanics. Proceedings of twelfth world congress in mechanism and machine science IFToMM 2007, June 17-21, 2007, Besancon, France. Volume 2. 510 с. С. 38-43.
4. Павловский В.Е., Невенчанная Т.О., Пономарева Е.В. Дистанционный информационно-справочно-обучающий (ИСО) программный комплекс для научных исследований и образовательной деятельности. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН № 99. М., 2008. - 32 с.
5. Пономарева Е.В., Хохлова О.А., Хохлов А.В. Программа для расчета основных кинематических параметров движения материальной точки. Свидетельство об официальной регистрации № 2010614882. Зарегистр. в реестре 27.07.2010.
6. Синельщиков А.В., Пономарева Е.В. Разработка комплекса универсальных mws-программ (maple) для компьютерного моделирования и автоматизации расчетов в области механики. Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. № 1. (Научный журнал). Астрахань: Изд-во АГТУ. 2014. - 164 с. С. 69-80.
7. Пономарева Е.В., Хохлова О.А., Хохлов А.В. Применение комплекса электронных проблемно ориентированных обучающих систем по теоретической механике. Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. № 1 (63). (Научный журнал). Астрахань: Изд-во АГТУ. 2017. С. 69-76.
8. Невенчанная Т.О., Пономарева Е.В., Хохлова О.А., Хохлов А.В. Использование средств визуализации при дистанционном обучении. Вестник Московского государственного университета печати. Москва, 2010. №11. 302 с. с. 124-133.
9. Невенчанная Т.О., Павловский В.Е., Пономарева Е.В. Дистанционный информационно-справочно-обучающий (ИСО) комплекс для научных исследований и образовательной деятельности. Вестник Московского государственного университета печати. Москва, 2009. №1, 2009. 166 с. С.47-64.
10. Кирсанов М.Н. Учебник. Теоретическая механика. М.: Физматлит, 2008. - 384 с.
11. Матросов А.В. Maple 6. Решение задач высшей математики и механики. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. -528 с.

References

1. Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E., Ponomareva E.V. Elektronnyy Internet-uchebnik po teoreticheskoy mekhanike [Electronic Internet Textbook on Theoretical Mechanics]. Certificate of official registration № 2004612620. Registered in the Registry of Computer Programs 3.12.2004.
2. Ponomaryova E.V., Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E. The Concept of the Internet Textbook on Theoretical Mechanics. Innovations in E-learning, Instruction Technology, Assessment and Engineering Education, Springer Netherlands, 2007. s. 468. S.373 - 377.
3. Ponomareva E.V., Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E. Concept, structure and program realization of the Internet textbook on classical mechanics. Proceedings of twelfth world congress in mechanism and machine science IFToMM 2007, June 17-21, 2007, Besancon, France. Volume 2. 510 с. С. 38-43.
4. Pavlovsky V.E., Nevenchannaya T.O., Ponomareva E.V. Distsionnyy informatsionno-spravochno-obuchayushchiy (ISO) programmnyy kompleks dlya nauchnykh issledovaniy i obrazovatelnoy deyatel'nosti [Distance information – reference – training (IRT) software complex for scientific research and educational]. Preprint of Institute of applied mathematics named after M.V. Keldysh RAS № 99. M., 2008. - 32 p.]
5. Ponomareva E.V., Khokhlova O.A., Khokhlov A.V. Programma dlya rascheta osnovnykh kinemacheskikh parametrov dvizheniya materialnoy tochki [The Program for Calculating the Basic Kinematic Parameters of the Motion of a Material Point]. Certificate of official registration № 2010614882. Registered in the Registry 27.07.2010.
6. Sinelshchikov A.V., Ponomareva E.V. Razrabotka kompleksa universalnykh mws-programm (maple) dlya kompyuternogo modelirovaniya i avtomatizatsii raschetov v oblasti mekhaniki [The Development of a Universal Mws-Programs (maple) Complex for Computer Modeling and Automation of Calculations in the Field of Mechanics]. Vestnik of Astrakhan State Technical University № 1. (Scientific journal). Astrakhan: Publishing office ASTU. 2014. - 164 p. p. 69-80.
7. Ponomareva E.V., Khokhlova O.A., Khokhlov A.V. Primeneniye kompleksa elektronnykh problemno oriyeirovannykh obuchayushchikh sistem po teoreticheskoy mekhanike [The Application of a Complex of Electronic Problem-Oriented Learning Systems in Theoretical Mechanics]. Vestnik of Astrakhan State Technical University № 1. (Scientific journal). Astrakhan: Publishing office ASTU. 2017. p. 69-76.
8. Nevenchannaya T.O., Ponomareva E.V., Khokhlova O.A., Khokhlov A.V. Ispol'zovaniye sredstv vizualizatsii pri distantsionnom obuchenii [Using Visualized Tools for Distance Learning]. Vestnik of Moscow State University of Printing Arts / Science-technical journal, Moscow, 2010. №11. 302 p. p. 124-133.
9. Nevenchannaya T.O., Pavlovsky V.E., Ponomareva E.V. Distsionnyy informatsionno-spravochno-obuchayushchiy (ISO) kompleks dlya nauchnykh issledovaniy i obrazovatelnoy deyatel'nosti [Distance information – reference – training (IRT) complex for scientific research and educational. Vestnik of Moscow State University of Printing Arts]. Science-technical journal, Moscow, 2009. №1, 2009. 166 p. p.47-64.
10. Kirsanov M.N. Reshebnik. Teoreticheskaya mekhanika [Theoretical Mechanics]. M.: Fizmatlit, 2008. - 384 p.
11. Matrosov A. V. Maple 6. Resheniye zadach vysshey matematiki i mekhaniki [Solving Problems in Higher Mathematics and Mechanics]. SPb.: BHV-Petersburg, 2001. - 528 p.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 629.12

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ПАРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТИ И ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В ТАНКЕ НЕФТЕНАЛИВНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ ПАКЕТА ASPEN HYSYS 2006**Владимир Петрович Бушланов**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: bvp@ngs.ru

Виталий Геннадьевич Новиков

аспирант
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Краснодарский край, город Новороссийск, Проспект Ленина, 93
e-mail: vetal88@bk.ru

Аннотация

В процессе погрузки нефтеналивных судов, значительное количество лёгких компонентов сырой нефти испаряется. Эти пары, называемые летучими органическими соединениями, состоят из: метана, этана, пропана, бутана, пентана и небольшой доли более тяжёлых углеводородов. Для обеспечения пожаробезопасности в газовое пространство грузовых танков вводят смесь инертных газов (ИГ), представляющие собой очищенные выхлопные газы судовой котельной установки. Возможность оценить объём испарившейся нефти, плотность паров, компонентный состав выделившейся части углеводородов и состав смеси в танке является актуальной задачей.

В работе представлена вычислительная технология, и результаты расчетов по определению термодинамического равновесия смеси нефти и инертных газов в танке нефтеналивного судна пригодная для любого момента времени выгрузки либо погрузки судна, с учётом интенсивности погрузки, окружающей температуры и давления в танке. Описано применение технологии для управления процессом выгрузки с целью минимизации выбросов в атмосферу паров нефти. Вычисления проведены на основе пакета ASPEN HYSYS 2006 расчета термодинамического равновесия.

Ключевые слова: термодинамическое равновесие, пары нефти, инертные газы.

COMPUTATIONAL TECHNOLOGY FOR CALCULATION THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM OF OIL VAPORS AND INERT GASES IN THE TANK OF OIL TANKER ON THE BASIS OF THE ASPEN HYSYS 2006 PACKAGE**Vladimir P. Bushlanov**

Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher
Admiral Ushakov Maritime University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: bvp@ngs.ru

Vitaly G. Novikov

Post-graduate student
Admiral Ushakov Maritime University
Lenin Avenue, 93, Novorossiysk 353918, Krasnodar region, Russian Federation
e-mail: vetal88@bk.ru

Abstract

During the loading of oil tankers, a significant quantity of light components of crude oil evaporates. These vapors, called volatile organic compounds, consist of: methane, ethane, propane, butane, pentane and a small fraction of heavier hydrocarbons. To ensure fire safety, a mixture of inert gases (IG) which are the purified exhaust gases from the ship's boiler plant, goes into the gas space of the cargo tanks. The ability to estimate the volume of evaporated

oil, the vapor density, the component composition of the separated part of hydrocarbons and the composition of the mixture in the tank is an important task.

In this paper, computational technology is presented, and the results of calculations for determining the thermodynamic equilibrium of a mixture of oil and inert gases in an oil tank vessel are suitable for any time of discharging or loading the vessel, taking into account the loading rate, ambient temperature and pressure inside the tank. The application of technology for controlling the discharge process is described with the aim of minimizing emissions of oil vapors into the atmosphere. The calculations were carried out on the basis of the ASPEN HYSYS 2006 package for calculation the thermodynamic equilibrium.

Keywords: thermodynamic equilibrium, vapors of oil, inert gases.

Introduction

The world’s first Mitsui-MAN B&W ME-GIE engine was designed to operate on ethane and liquefied natural gas, but no less important fact was that volatile organic compounds (VOCs) released during the loading and storage of crude oil can be used as a fuel. By the beginning of the year 2015, already 8 vessels were equipped with an engine of

this model and the total number of two-fuel main engines reached 153 units [1]. Gases released during loading of oil vessels can be condensed, and this condensate contains heavier and lighter hydrocarbon fractions, the ratio of which in condensate depends on the tank retention time, temperature, pressure and how often the crude oil tank is vented. See Table 1.

Table 1

VOC composition and classification of hydrocarbons [2]

Component	Weight %	Mol %	Molar mass g/mol	Density g/cm ³
Nitrogen	0,02	0,04	28,01	0,808
Methane	0,15	0,50	16,04	0,3
Ethane	5,83	10,68	30,07	0,358
Propane	28,66	35,81	44,1	0,508
i-Butane	9,43	8,95	58,12	0,563
n-Butane	22,11	20,97	58,12	0,585
i-Pentane	7,37	5,63	72,15	0,625
n-Pentane	7,83	5,98	72,15	0,631
Hexane	7,19	4,71	84,2	0,6675
Heptane	6,43	3,65	97	0,7378
Octane	3,23	1,65	107,7	0,7654
Nonane	0,68	0,32	117,9	0,0781
Decane	0,26	0,1	-	-

In the thesis of S.P. Baskakov [3], the volume of VOC emission due to evaporation during transshipment estimated on the basis of literary experimental data is 0.28% of the total volume of oil transported by sea. To reduce the evaporation of oil and air pollution by hydrocarbons, as well as to ensure explosion and fire safety in the oil tanker fleet, oil products are stored under a layer of IG pumped into the tank gas space. The following is a computational technique for determining the vapor density of gaseous hydrocarbons in a tank based on calculation of thermodynamic equilibrium in a mixture of oil vapors, oil and IG, which can be used to determine the volume of emissions of oil vapors during unloading an oil tanker.

1. Calculation of the thermodynamic equilibrium of hydrocarbon vapors and inert gases above the oil surface in the oil tank of oil tanker in the ASPEN HYSYS 2006 program

Thermodynamic calculations of petroleum mixtures are widely used in modeling petroleum technology processes, see for example [6].

The thermodynamic equilibrium in the tank contains mixture of oil vapor and IG over the surface of crude oil will be calculated with ASPEN HYSYS 2006 package. The ratios of these gases in the mixture will be calculated by setting the mass flows of pumped oil and injected IG. For calculations it is required to set physico-chemical constants for

individual substances in the mixture: pressure and temperature at the critical point; acentric factor; molecular weight; boiling point at atmospheric pressure, etc.

The specification of the initial oil composition is carried out with the help of hydrocarbon hypothetical components, because experimentally it is possible to determine the composition only up to pentane inclusive. These hypothetical components by the ratio of the basic physicochemical constants are hydrocarbons, but they do not have an exact analogue among individual substances. The minimum amount of information required to specify the initial composition of oil: a laboratory distillation curve consisting of not less than 5 points; two of the three properties of the sample oil as a whole: molecular weight, density, Watson factor. The content of hydrocarbons in a unit of mass of oil will be determined from the experimental data of the laboratory report on distillation in accordance with GOST 11011-85[5] The decomposition curve is divided into 36 hypothetical components, and in the range 71-394 ° C fractions will be 12 ° C, in the interval 394-530 ° C - 17 ° C. The gas part of the oil and IG specified as individual components. From [4], the IG composition after the gas scrubber is adopted as follows:

Table 2

IG composition

Component	Formula	Mol %
Nitrogen	N_2	0,83
Carbon dioxide	CO_2	0,15
Oxygen	O_2	0,02

For calculation, it is necessary to specify the gas and oil mass flows, pressure, and temperature. The ASPEN HYSYS 2006 package does not provide a calculation of the thermodynamic equilibrium in the tank, when the IG is injected into it, and the liquid oil is pumped out. But it is obvious that in this program the flows are set by the mass ratio of oil and IG in the reservoir, therefore, taking this into account, we modify the way of specifying flows by presenting this process as a mixture of two flows with the flows numerically equal to the relative fractions of oil and IG for the selected time t . The mass of oil pumped

Table 3 shows the relative shares of oil and IG at the time points corresponding to 1%; 25%; 50%; 75%; 99% and 99.9% of the discharged tanker. Therefore, in the ASPEN HYSYS 2006 package, the oil and IG flows will be chosen accordingly, as well $\varepsilon_{OIL}(t)$ и $\varepsilon_G(t)$.

out at the time t is equal $G_{OIL} \cdot t$, and the mass of incoming IG is equal $G_G \cdot t$, here G_{OIL}, G_G - the mass expenditure of oil and IG. The total mass of substances in a tank at a time t equals:

$M(t) = M_0 + G_G \cdot t - G_{OIL} \cdot t$, where M_0 - is the mass of oil in a full tank. The mass of the mixture per unit volume (bulk density of the mixture) is equal $m(t) = \frac{M(t)}{V} = \frac{M_0}{V} + \frac{G_G \cdot t}{V} - \frac{G_{OIL} \cdot t}{V}$, where V - the volume of the tank. Determine the share of oil in the tank at the time t :

$$\varepsilon_{OIL}(t) = \frac{\frac{M_0 - G_{OIL} \cdot t}{V}}{\frac{M_0 + G_G \cdot t - G_{OIL} \cdot t}{V}} = \frac{M_0 - G_{OIL} \cdot t}{M_0 - G_{OIL} \cdot t + G_G \cdot t} \quad (1)$$

In this case, the share of IG is calculated using the formula: $\varepsilon_G(t) = 1 - \varepsilon_{OIL}(t)$.

Here time t , is in range $0 < t < \frac{M_0}{G_{OIL}}$. The fraction of the discharged oil for an arbitrary moment of time is denoted by $\delta = \frac{G_{OIL} \cdot t}{M_0}$, the fraction of IG in

the tank relative to the mass of oil $\gamma = \frac{G_G \cdot t}{M_0}$,

substituting in (1) we obtain:

$$\varepsilon = \frac{1 - \delta}{1 - \delta + \gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{1 - \delta}} \quad (2)$$

Let the volume of IG equal to the volume of the discharged oil be pumped into the tank at each moment of time, then :

$$V = \frac{G_{OIL}}{\rho_{OIL}} = \frac{G_G}{\rho_{IG}} \quad (3)$$

From formula (3) it follows:

$$\gamma = \frac{\rho_{IG}}{\rho_{OIL}} \cdot \delta \quad (4)$$

Substituting (4) into (2) we obtain :

$$\varepsilon_{OIL}(t) = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{IG}}{\rho_{OIL}} \cdot \frac{\delta}{1 - \delta}} \quad (5)$$

Calculations of thermodynamic equilibrium in ASPEN HYSYS 2006 with mass shares of oil and IG from table 3 at a temperature 35°C and pressure 111,3 kPa are given in table 4.

Table 3

Mass shares of oil and IG

Discharged oil , δ	Relative share of oil , $\varepsilon_{OIL}(t)$	Relative share of IG, $\varepsilon_G(t)$
0,01	0,9999	0,0001
0,25	0,9994	0,0006
0,50	0,9982	0,0018
0,75	0,9947	0,0053
0,99	0,8510	0,1490
0,999	0,3612	0,6388

Table 4

Mol shares and density of gas phase in tank of oil tanker at different unloading moments

	Discharged oil , %					
	1	25	50	75	99	99,9
Component	Mol shares of components, %					
Methane	26,47	20,47	13,94	7,79	0,48	0,05
Ethane	17,07	14,55	11,15	7,06	0,51	0,06
Propane	21,51	19,93	17,27	12,97	1,34	0,15
i-Butane	6,02	5,80	5,39	4,60	0,74	0,09
n-Butane	15,56	15,11	14,27	12,52	2,37	0,29
i-Pentane	4,77	4,71	4,59	4,31	1,41	0,20
n-Pentane	4,54	4,49	4,40	4,18	1,56	0,24
C6+	1,00	0,99	0,97	0,97	0,8	0,45
Nitrogen	2,69	12,13	24,05	38,62	75,45	81,74
Carbon dioxide	0,31	1,54	3,41	6,07	13,52	14,76
Oxygen	0,06	0,28	0,56	0,91	1,82	1,97
Mass share of hydrocarbon gases , %	97,72	89,65	79,14	65,33	16,43	3,28
Density ρ_y , kg/m ³	1,755	1,770	1,773	1,746	1,463	1,374

At figure 1 presented results of equilibrium calculation of mix of hydrocarbon gases for different pressures and temperatures. It is obvious that the

surface in space of variables density ρ_h , pressure P and temperature T is plane. From figure 1 it's easy to determine what equation of the indicated plane is:

$$\rho_h = 4.85T + 8.75P + 253 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (6)$$

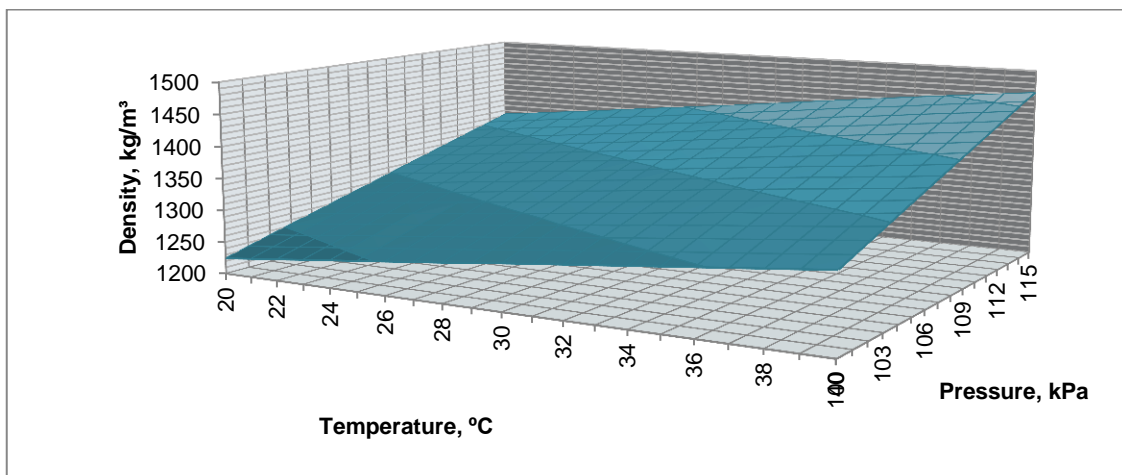


Figure 1. Change in the volumetric density of oil vapors in a vessel unloaded by 50%, depending on pressure and temperature.

Conclusions

Computational technology is presented, and the results of calculations for determining the thermodynamic equilibrium of a mixture of oil and inert gases (IG) in a tank of an oil tank vessel are suitable for any quantity of unloaded oil. The application of technology for controlling the unloading process is described with the aim of minimizing emissions of oil vapors to the atmosphere on the basis of Fig. 1 and approximation (6). Calculations were carried out on the basis of the ASPEN HYSYS 2006 package for calculating the thermodynamic equilibrium of a mixture of oil, oil vapors and injected inert IG contained in the tank of the oil tanker vessel. An essential dependence of the equilibrium composition of this mixture on the amount of unloaded oil is shown in Table 5. The bulk density of oil hydrocarbons in the form of the approximation dependence (6) for the composition of the mixture, as in the calculations in Table 5, can be used to calculate the amount of hydrocarbon vapors displaced from the reservoir during filling. It also follows from (6) and Fig. 1 that in order to reduce emissions of hydrocarbon vapors during tanker loading, it is necessary that the pressure in the tank be as close as possible to external atmospheric pressure.

Литература

1. MAN Diesel & Turbo «2-Stroke Technical & market Seminar», University of Piraeus, November 2015.
2. MAN Diesel & Turbo «LVOC Combusting ME-GIE Engine», May 2017.
3. Баскаков С.П. Повышение экологической безопасности морской транспортировки нефти путём снижения эмиссии летучих органических соединений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.0036. – Санкт-Петербург, 2005. – 165 с.
4. Studying Patterns of Synthesis of Low Freezing Distillates from Atmospheric Gasoil by Means of Mathematic Modelling [Electronic resource]/N.S. Belinskaya [et al.]/Current Organic Synthesis.- 2017.- Vol.14, iss.3.- [P.365-371]. – Title screen.
5. Хорошко С.И. Нефти северных регионов: Справочник. Новополюцк, 2004 г.- 125 с.
6. Хайдуков О.П., Трусов А.С., Кузнецов Е.В. Системы инертных газов на танкерах и их эксплуатация: Учебное пособие,- Новороссийск: НГМА, 2000.-116 с.

References

8. MAN Diesel & Turbo «2-Stroke Technical & market Seminar», University of Piraeus, November 2015.
9. MAN Diesel & Turbo «LVOC Combusting ME-GIE Engine», May 2017.
10. Baskakov S.P. Increase of ecological safety of sea transportation of oil by reduction of emission of volatile organic compounds. Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences: 25.0036. St. Petersburg, 2005, 165 p.
11. Studying Patterns of Synthesis of Low Freezing Distillates from Atmospheric Gasoil by Means of Mathematic Modelling [Electronic resource] N.S. Belinskaya [et al.] Current Organic Synthesis, 2017. Vol.14, iss.3. [P.365-371]. Title screen.
12. Horoshko S.I. Oil of northern regions: Reference book. Novopolotsk, 2004, 125 p.
13. Khaidukov O. P., Trusov A. S., Kuznetsov E. V. Systems of inert gases on tankers and their operation: Textbook, Novorossiysk: NGMA, 2000, 116 p.

УДК 629.584.001.57

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ 3-D МОДЕЛИРОВАНИЯ

Леонид Георгиевич Бакуменко

главный конструктор,
АО «Концерн «НПО «Аврора»
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15
e-mail: leonbak953 @yandex.ru

Александр Николаевич Дядик

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Теплофизических основ судовой энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: dyadik @rambler.ru

Андрей Сергеевич Кармазин

студент магистр
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: andrew.karmazin @mail.ru

Арсений Юрьевич Крятов

инженер 2 категории,
АО «Концерн «НПО «Аврора»
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15
e-mail: mail@avrorasystems.com

Сергей Николаевич Сурин

кандидат технических наук,
зам. генерального директора - директор по спецтеematике и автоматизации ЯЭУ,
АО «Концерн «НПО «Аврора»
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15
e-mail: mail@avrorasystems.com

Аннотация

В настоящее время в АО «Концерн «НПО «Аврора» разработан, изготовлен и проходит испытания автономный необитаемый подводный аппарат. Создание автономных необитаемых подводных аппаратов обусловлено требованием проведения научных исследований и поиска полезных ископаемых, в том числе подводных месторождений на Арктическом шельфе [1].

Для обслуживания платформ, комплекса роботизированных подводных добычных средств требуется создание новых технических устройств, способных автономно работать продолжительное время, будучи в подводном положении. Оптимальным решением данной проблемы является использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

В статье освещены назначение и основные характеристики АНПА, выполнен сравнительный анализ габаритов АНПА на базе щелочного ЭХГ с хранением реагентов в баллонах высокого давления и АНПА с аккумуляторной батареей.

Созданная 3-D модель АНПА позволила оптимизировать процесс размещения оборудования, и позволила обеспечить требуемую положительную плавучесть. По результатам обдувки АНПА был произведен расчет автономности аппарата. Сформулированы основные выводы.

Ключевые слова: Автономный необитаемый подводный аппарат, энергетический отсек, аккумуляторная батарея, ЭХГ-генератор, автономный ход, балластировка, кислород, водород.

DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF AN AUTONOMOUS UNINHABITED VEHICLE ON THE BASIS OF TRIDIMENSIONAL MODELING

Leonid G. Bakumenko

main constructor,
Concern Aurora Scientific and Production Association
Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation

e-mail: leonbak953 @yandex.ru

Alexander N. Dyadik

doctor of technical Sciences, the professor,
head of the Department of thermophysical basics of marine engineering
St. Petersburg State Marine Technical University
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: andrew.karmazin @mail.ru

Andrey S. Karmazin

Master's degree student,
St. Petersburg State Marine Technical University
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: andrew.karmazin @mail.ru

Arsenij Ju. Krjatov

engineer of the 2nd category,
Concern Avrora Scientific and Production Association
Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation
e-mail: mail@avrorasystems.com

Sergej N. Surin

doctor of philosophy,
deputy general director, director of special subjects and automation of nuclear power plants,
Concern Avrora Scientific and Production Association
Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation
e-mail: mail@avrorasystems.com

Abstract

At present, an autonomous uninhabited underwater vehicle is designed, manufactured and tested in JSC Concern Avrora Scientific and Production Association. The creation of autonomous uninhabited underwater vehicles is due to the requirement to conduct scientific research and search for minerals, including underwater deposits on the Arctic shelf.

A model describing the basic thermodynamic processes in typical blocks and details of the air-independent propulsion in the steady-state operating modes is developed. The basic assumptions used in the structural identification. To determine the coefficients of the simplified mathematical models, the results of processing graphs in the form of oscillograms. A system of equations has been developed to make it possible to simulate the main elements of a fuel processor using an electrochemical generator.

The methods in the annotation are only specified. The results of the work are described extremely accurately and informatively. The main theoretical and experimental results, actual data, discovered relationships and regularities are presented. Preference is given to the new results and conclusions, which, in the author's opinion, are of practical importance. The limits of accuracy and reliability of data as well as the measure of their reliability should be indicated. Conclusions can come with recommendations, estimates, and suggestions described in this paper.

Key words: autonomous uninhabited underwater vehicle, energy compartment, accumulator battery, electrochemical generator, autonomous move, ballasting, oxygen, hydrogen.

1. Сравнительные результаты 3-D моделирования АНПА с ЭХГ-генератором и аккумуляторной батареей

В АО «Концерн «НПО «Аврора» разработан, изготовлен и проходит испытания автономный необитаемый подводный аппарат с Li-ионной аккумуляторной батареей, энергоёмкость которой обеспечивает 4 – 6 часов автономной работы аппарата на экономическом ходе.

Основные технические характеристики аппарата и габаритные размеры:

- диаметр – 200 мм;
- длина – 2150 мм.
- масса – 63 кг (включая твердый балласт);
- глубина погружения – 1000 м;
- максимальная скорость – 2,5 м/с.

Образец этого АНПА был показан в 2017 г. на выставке «Нева-2017», и во время этих демонстраций от Заказчиков были высказаны пожелания о приобретении таких аппаратов для выполнения задач различного назначения.

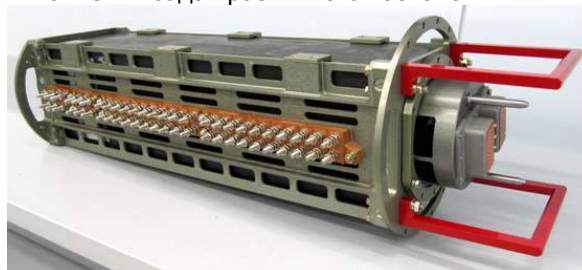


Рис. 1. Отсек аккумуляторной батареи

На этапе разработки конструкции АНПА с использованием программы Solid works были созданы 3-D модели оборудования и аппаратуры, 3-D модели блоков, например, блока отсека аккумуляторной батареи, изображенного на рисунке 1.

САПР Solid Works использовался на всем протяжении цикла проектирования и изготовления аппарата. Помимо создания объемной модели будущего АНПА, прорабатывалась компоновка оборудования, конечный вид и число отсеков.

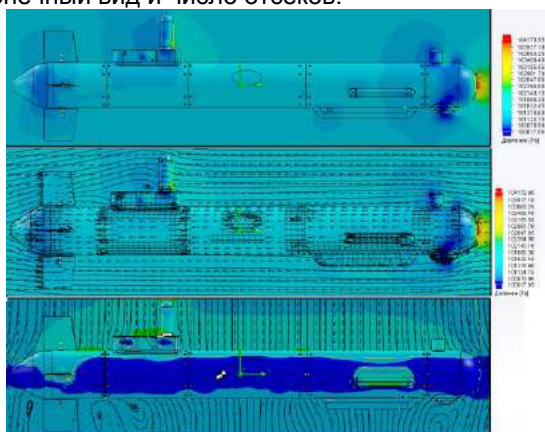


Рис. 2. Обдув 3-D модели АНПА

С помощью встроенного пакета Simulation произведён расчет прочности отсеков и подобран материал для заданных нагрузок. На следующем этапе в приложении Flow Simulation были получены гидродинамические характеристики аппарата и управляющие силы от рулей (рисунок 2).

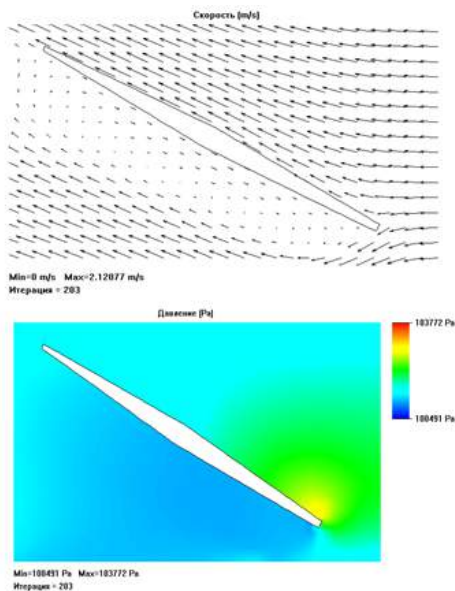


Рис. 3. Обдув пера руля под углом 30°

Благодаря полученному гидродинамическому сопротивлению была рассчитана требуемая тяга и вращательный момент от маршевого двигателя. Подобран двигатель и спроектирован винт под следующие заданные требования (рисунок 3):

- максимальная скорость хода АНПА 5 узлов;
- минимальное энергопотребление при движении.

В дальнейшем, перед этапом балластировки аппарата, были рассчитаны и определены места установки балласта, повышающего остойчивость аппарата и создающих требуемую положительную плавучесть. Для ускорения решения возникающих задач при размещении оборудования и проведении наладочных испытаний применялся 3-D принтер.

Созданная 3-D модель позволила оптимизировать процесс размещения оборудования, и позволила обеспечить требуемую положительную плавучесть.

По результатам обдувки АНПА был произведен расчет автономности аппарата. Для расчета была выбрана аккумуляторная батарея (ЛИАБ) энергоемкостью 1200 Вт ч, которая обеспечивает 4 – 6 часов автономного хода. При заданных характеристиках длина аккумуляторного отсека составила 580 мм, при общей длине аппарата 2,15м.

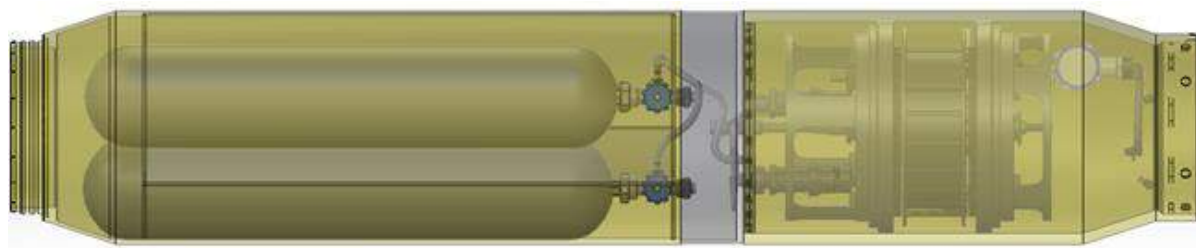


Рис. 4. Размещение оборудования в энергетическом отсеке с ЭХГ-генератором на 3-D модели

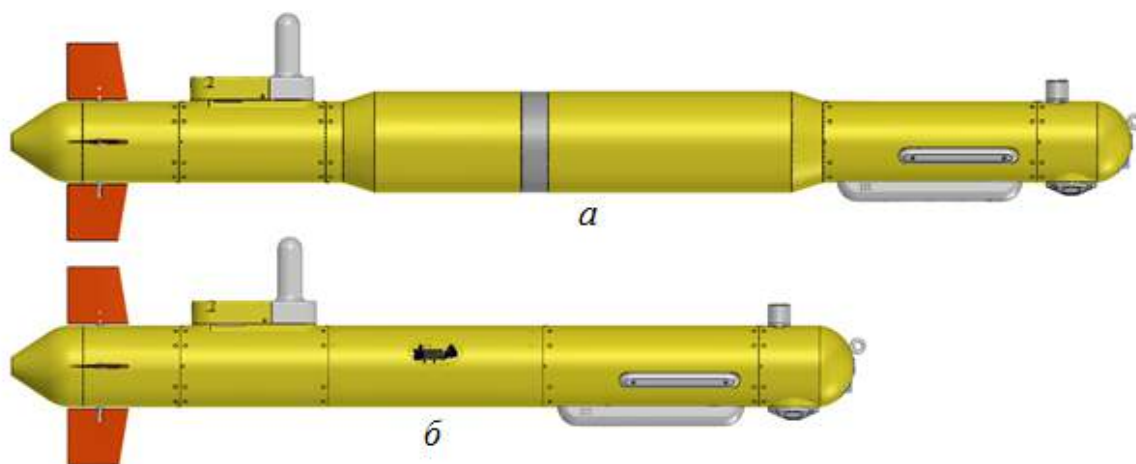


Рис.5. Сравнение габаритов АНПА с ЭХГ-генератором (а) и ЛИАБ (б), с применением 3-D моделирования

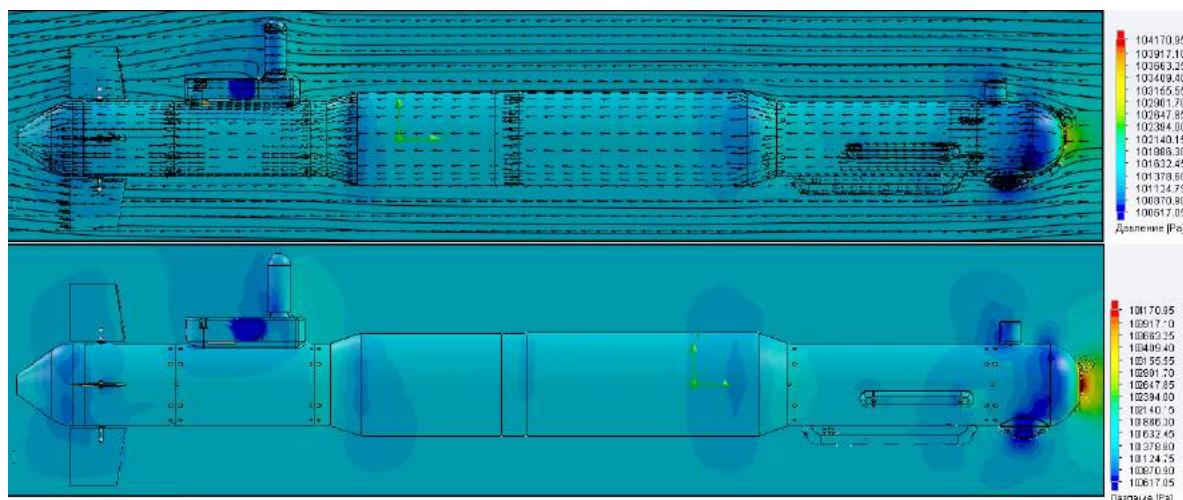


Рис. 6. Варианты обдува АНПА с отсеком ЭХГ-генератора

Важной технической характеристикой, которая востребована заказчиками, является энергоёмкость, а одним из решений, направленных на совершенствование энергетики АНПА, является использование в качестве источника энергии электрохимического генератора водородно-кислородного типа [2]. В настоящее время в АО «Концерн «НПО «Аврора» выполняется проработка, направленная на увеличение энергоёмкости ЭУ АНПА заменой ЛИАБ на ЭХГ-генератор.

Проведенный анализ развития отечественных технологий создания энергетических установок с ЭХГ-генераторами, определил выбор варианта щелочного ЭХГ с хранением реагентов в баллонах высокого давления, позволяющий увеличить время автономной работы АНПА в 4 раза. Однако при этом длина аппарата возросла до 2,9 м, что не является критичным для его технических характеристик.

Созданная 3-D модель энергетического отсека с ЭХГ, позволяет проанализировать несколько компоновочных вариантов АНПА: с увеличенным

диаметром аппарата, с размещением баллонов с реагентами как внутри, так и снаружи прочного корпуса. На рисунке 4 изображена 3-D модель энергетического отсека с ЭХГ-генератором и размещением баллонов с реагентами (газообразным водородом и кислородом) внутри прочного корпуса вместе с отсечной и регулирующей арматурой.

Размещение баллонов с реагентами вне прочного корпуса является перспективным, так как при этом высвобождается объем внутри АНПА для размещения дополнительного оборудования. Такое размещение баллонов практически не повлияет на ходовые характеристики АНПА, ввиду того, что аппарат предназначен для использования при невысокой подводной скорости хода.

На рисунке 5 представлены два варианта АНПА с различной энергетикой, а именно ЭХГ-генератором а и литий-ионной аккумуляторной батареей б. Как следует из рассмотрения этого рисунка АНПА с ЭХГ-генератором несколько длиннее.

На рисунке 6 представлены картины обдува АНПА с ЭХГ-генератором. При этом наблюдается

незначительное увеличение гидравлического сопротивления аппарата с $C_x = 0,3$ до $C_x = 0,32$.

В настоящее время ведутся работы по созданию полномасштабного макета энергетического отсека с баллонами, редукторами и блоком ЭХГ.

На начальной стадии предусмотрено создание макетного образца энергетического отсека с воспроизведением части оборудования с помощью 3-D принтера. После детальной проработки комплектности, и размещения оборудования и аппаратуры будет создаваться действующий макетный образец АНПА с ЭХГ.

Заключение

Наличие 3-D модели АНПА позволяет:

- оценить и уточнить размещение оборудования и аппаратуры;
- анализировать компоновочные варианты для выбора оптимального соотношения размеров аппарата и длительности автономного хода;
- проводить балластировку для обеспечения заданной устойчивости и плавучести;
- по полученному в результате обдува аппарата гидравлическому сопротивлению определить требуемые значения тяги, и вращательного момента на винте;

Литература

1. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки. – СПб: Судостроение, 2006. – 424 с.
2. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 400 с.

References

1. Dyadik A.N., Zamukov V.V., Dyadik V.A. Korabel'nye vozduhonezavisimye jenergeticheskie ustanovki. SPb. Sudostroenie, 2006. 424 p.
2. Ageev M.D. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tehnologii. – M. Nauka, 2005. 400 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
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).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 9000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов. Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**