MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

10 Hz | 20 HZ | 30 Hz | 40 Hz | 50 Hz | 60 Hz | 70 Hz | 80 Hz | 90 Hz | 100 Hz | 110 Hz | 120 Hz | 130 Hz | 140 Hz | 150 Hz | 160 Hz | 170 Hz | 180 Hz | 190 Hz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ 4 (42) Т. 2 2018

ВГУВТ

ТРУДЫ ВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (42) Т.2 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., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта
Огай С. А. к.т.н., доцент ректор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия
И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия
В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
С.П. Столяров, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Редакционная коллегия
Заместители главного редактора
А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет
Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта РАН
А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет
П.А. Шауб, д.т.н., профессор, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

Члены Редколлегии
А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет
Р.В. Борисов д.т.н. профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Ю.А. Власов, к.ф-м.н. преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США
М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет
В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация
Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
В.В.Родионов, к.т.н, с.н.с., ЗАО «Си Проект»
В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургс-кий 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 ТЕХНОЛО-ГИИ»
Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале
190121 г.Санкт-Петербург, ул Лоцманская д.3
Телефон/факс +7 (812) 513-04-51
e-mail: mit-journal@mail.ru

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.
Перепечатка допускается только с разрешения редакции
Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»
Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.
http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»
Дизайн: А.В. Антонов
Верстка: А.И. Соломонова

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (42) V.2 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, CEO, 51 CCIS
Ogai S.A., PhD, Associate professor, Rector, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway
Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland
V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre
K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University
S.P. Stoljarov, Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Editorial Staff
Deputy Chief Editors
I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science
A. I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

Members of Editorial Staff
A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor St. Petersburg State Marine Technical University
Yu. A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA
Voyloshnikov M.V., Doctor of Engineering, Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation
Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"
V. Yu.Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science
N. A Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Publication frequency — 4 issues per year
The journal is included into the system of Russian Science Citation Index http://vak.ed.gov.ru
The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database.

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: mit-journal@mail.ru)
Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"
Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-3345
Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg
120121, Russian Federation
Phone/fax +7 (812) 513-04-51
e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results http://vak.ed.gov.ru
Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Authors and advertises are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.
Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.
http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/

Design: A.V. Antonov
Page-proofs: A.I. Solomonova

ТРУДЫ

ВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

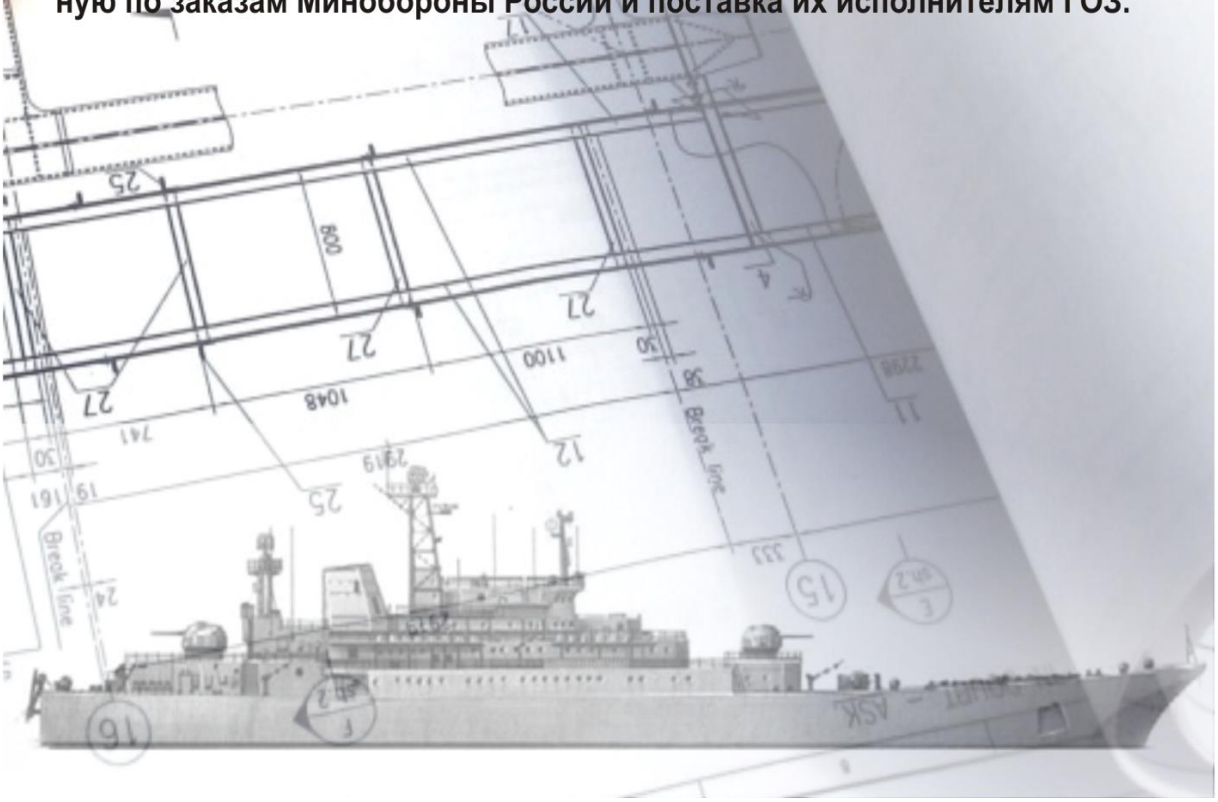
Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1600

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

стр

О журнале…….. 9

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

Чернышов А.В., Чиркова М.М., Гаврилова Т.И. Анализ траектории судов различных проектов в сложных условиях плавания…… 11

Валяев А.В., Лукина Е.А., Любимов В.И., Федосенко Ю. С. Мониторинг остойчивости в системе поддержки принятия решений об использовании средств спасения при угрозе скоротечного затопления речного судна…… 18

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Арефьев Н.Н., Роннов Е.П., Попов Н.Ф., Сухарев И.С. Метод расчета трубопроводного транспорта аэрированных илистых грунтов грунтонасосными установками земснарядов…… 24

Арефьев Н.Н., Курников А.С., Наумов В.С., Попов Н.Ф. Результаты экспериментального исследования установки по созданию искусственного воздушного заряда для судового двигателя…….. 30

Платов А.Ю., Платов Ю.И. Интегральный подход к управлению работой речного флота на основе информационных технологий…….. 36

Платов А.Ю., Платов Ю.И., Малышкин А.Г., Иванов А.В. Моделирование судового дизеля для решения задач рейсового планирования и нормирования выбросов CO2 речных грузовых судов….. 42

Володин Ю.Г., Гречухина О.Н., Матвеев Ю.И., Храмов М.Ю. Математическое моделирование течения рабочего тела в каналах судовых газотурбинных энергетических установок в пусковом режиме…….. 49

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Клементьев А.Н., Липатов И.В., Ситнов А.Н. Методические аспекты исследования гидродинамических полей вокруг корпуса судна при моделировании его движения в стесненных условиях…… 56

Владецкий Д.О., Лисютин В.А., Ярошенко А.А., Савельев В.Г. Моделирование полей потоков мощности в горизонтально-слоистых волноводах мелкого моря…….. 63

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Паутова О.А., Бурмистров Е.Г., Лучков И.Н., Любимов В.И. Алгоритмическая структура системы управления производственными рисками верфи…… 68

Чиркова М.М., Мишин А.А., Поселенов Е.Н. Информационно-измерительная система распознавания психофизиологического состояния вахтенного персонала…… 73

Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах……. 79

Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков В.С., Отделкин Н.С. Моделирование всплытия нефти от подводных источников в ледовых условиях…… 87

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Бурмистров Е.Г., Зяблов О.К., Роннов Е.П. Комплексная автоматизированная система технологической подготовки судоремонтного производства…… 92

Плющаев В.И., Кузьмичев И.К. Пути реализации автоматической швартовки судна в рамках создания технологии безэкипажного судовождения…… 98

Биденко С.И., Зеленков Г.А., Устинов В.В., Хекерт Е.В. Система мониторинга и управления швартовными операциями в составе технологического процесса эксплуатации перегрузочного комплекса на морской составляющей терминала……. 104

Грошева Л.С., Плющаев В.И., Тихонов В.И. Управление судном с колесным движительно-рулевым комплексом при ветровых воздействиях…… 115

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Коршунов Д.А., Ничипорук А.О., Телегин А.И. Методика определения и алгоритм учета потерь навалочных грузов при доставке в смешанном сообщении…… 121

Ничипорук А.О., Телегин А.И., Уртминцев Ю.Н. Методика определения времени и стоимости перемещения пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах «от двери до двери» с использованием автобусов или судов на воздушной подушке…….. 126

Домнина О.Л., Иванов М.В., Митрошин С.Г., Уртминцев Ю.Н. Обоснование транспортного обеспечения комбинированных туристических маршрутов с участием внутреннего водного транспорта…… 131

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Захаров В. Н., Кузьмичев И. К., Резников М. Б., Федосенко Ю. С. Модель кластерной реализации алгоритма синтеза оптимального расписания в канонической задаче диспетчеризации…….. 139

Антонов А.А., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В., Биденко С.И. Кластеризация среды для системы поддержки принятия решений для реализации предварительной прокладки…… 145

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Меркулов В.И., Николаев В.С., Матвеев Ю.И., Тищенко И.В. Решение уравнения газовой смазки на поверхности профилированного лепестка…… 150

Галимов А.Р., Меркулов В.И., Покусаев М.Н., Тищенко И.В. Оценка вероятности отказов воздухо-воздушных теплообменных аппаратов в период эксплуатации авиационных систем кондиционирования воздуха морского базирования…….. 155

Малышкин А.Г, Плющаев В.И., Тихонов В.И. Определение скоростей частиц жидкости в плоском пограничном слое…… 161

Зубкова Е.В., Клементьев А.Н., Лобанов В.А., Хвостов Р.С. Особенности моделирования процесса захода судна в шлюз при большом стеснении потока…… 166

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Липатов И.В., Ситнов А.Н., Чичкин О.И. Аналитический подход к оценке эффективности работы элементов гашения энергии водного потока в транспортных гидротехнических сооружениях……. 170

CONTENTS

стр

About journal …….. 9

SHIP BUILDING

Andrej V. Chernyshov, Margarita M. Chirkova, Tatiana I. Gavrilova Analysis of trajectory of vessels of various projects in rough navigation conditions……... 11

Alexander V. Valyaev, Evgenia A. Lukina, Viktor I. Lyubimov, Yury S. Fedosenko Monitoring of stability in digital intelligent support system system at risk of fleeting accident of a displacement vessel…. 18

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Nikolay N. Arefyev, Evgeny P. Ronnov, Nikolay F. Popov, Ilya S. Sukharev Calculation method for pipeline transport of aerated bottom sediments (as bingham plastics) bysuction dredgers……. 24

Nikolay N. Arefyev, Alexander S. Kurnikov, Viktor S. Naumov, Nikolay F. Popov Results of experimental research made on the artificially prepaired air charge installation for marine engine…… 30

Alexander J. Platov, Juri I. Platov The integral approach in management of the river fleet on the basis of information technologies…….. 36

Alexander J. Platov, Juri I. Platov, Alexander G. Malyshkin, Alexander V. Ivanov Marine diesel modeling for the problems of voyage planning and CO2 emissions regulations for river cargo ships…… 42

Yury G. Volodin, Oksana N. Grechukhina, Yury I. Matveev, Mikhail Y. Khramov Mathematical model the unsteady-state current non-compressible gas with heat transfer in the axle symmetric canals of technological equipment…….. 49

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Alexander N. Klementev, Igor V. Lipatov, Alexander N. Sitnov Methodological aspects of the study of hydrodynamic fields around the ship's hull when modeling its motion in confined conditions……. 56

Dmitriy O. Vladetskiy, Victor A. Lisiutin, Alexander A. Yaroshenko, Vitaliy G. Savelyev Simulating of vector intensity fields in horizontal layer waveguides of the shallow water……. 63

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Oksana A. Pautova, Evgeny G. Burmistrov, Ivan N. Luchkov, Viktor I. Lyubimov The shipyard industrial risk management system algorithmic structure…….. 68

Margarita M. Chirkova, Alexey A. Mishin, Evgeniy N. Poselenov Information-measuring system for recognition of psychophysiological state of watch personnel…… 73

Olga L. Domnina, Vasily N. Zakharov, Nikolai S. Otdelkin, Andrey E. Plastinin Environmental risk assessment of accidents on water objects…… 79

Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Nikolai S. Otdelkin Modeling of oil floating from underwater sources,in ice conditions……. 87

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Evgeny G. Burmistrov, Oleg K. Zyablov, Evgeny P. Ronnov Integrated automated system of technological preparaion of ship repair production……. 92

Valery I. Plyushchaev, Igor K. Kuzmichev Ways of the ship automatic mooring implementation within the framework of free shipping technology creation…… 98

Sergey I. Bidenko, Gennady A. Zelenkov, Viktor V. Ustinov, Evgeny V. Heckert The system for monitoring and managing mooring operations as part of the technological process of operation of the transshipment complex at the marine component of the terminal…… 104

Lyudmila S. Grosheva, Valery I. Plyushchaev, Vadim I. Tikhonov Handling of a ship with propulsion steering unit under wind exposure……... 115

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Dmitry A. Korshunov, Andrey O. Nichiporouk, Anatoly I. Telegin Bulk cargoes losses consideration definition methods and algorithm on delivery in the combined transportation…… 121

Andrey O. Nichiporouk, Anatoly I. Telegin, Yuri N. Urtmintsev The method of definition of time and cost of the passenger travel on intracity and suburban routes "door to door" using buses or hovercrafts… 126

Olga L. Domnina, Mikhail V. Ivanov, Sergey G. Mitroshin, Yuri N. Urtmintsev Transport provision justification of combined tourist routes with participation of inland water transport…….. 131

COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

Vasily N. Zakharov, Igor K. Kuzmichev , Mikhail B. Reznikov, Yury S. Fedosenko Model of cluster implementation of the algorithm of optimal schedule synthesis in the canonical task of dispatching……. 139

Alexander A. Antonov, Dmitriy E. Studenikin, **Evgeniy V. Khekert**, **Sergey I. Bidenko** Clustering of environment in the decision support system for the preliminary plotting……. 145

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Vladislav I. Merculov, Vitaly S. Nikolaev, Yuri I. Matveev, Igor V. Tishchenko Equation solution of the gas lubrication on the profile petal surface…… 150

Almir R. Galimov, Vladislav I. Merculov, Igor V. Tishchenko The air-to-air heat exchangers failures probability estimation during sea-based aircraft air conditioning systems exploitation…….. 155

Alexander G. Malyshkin, Valery I. Plyushchaev, Vadim I. Tikhonov Velosity determination of particles of fluid in a flat border layer……. 161

Evgenia V. Zubkova, Alexander N. Klementev, Vasiliy A. Lobanov, Roman S. Khvostov Features of modeling the process of entering ship into the lock-chamber at great restriction of the flow area section… 166

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Igor V. Lipatov, Alexander N. Sitnov, Oleg I. Chichkin Analytical approach to the evaluation of the efficiency of the flow energy damping elements in transport hydraulic structures……. 170

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.

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

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

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

Basic Magazine Trends

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

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 681.5:004.942

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИИ СУДОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ

Андрей Владимирович Чернышов
кандидат технических наук, директор ООО «Автоматика+»
606016, г. Дзержинск, ул. Студенческая, 32Б
e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com
Маргарита Макаровна Чиркова
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики,
систем управления и телекоммуникаций.
Волжский государственный университет водного транспорта
603650, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5
e-mail: chirkova@vgavt-nn.ru
Татьяна Ивановна Гаврилова
кандидат технических наук, доцент кафедры информатики,
систем управления и телекоммуникаций.
Волжский государственный университет водного транспорта
603650, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5
e-mail: tigavr@gmail.com

Аннотация

При разработке алгоритмов управления движением судна по заданной траектории, а также при ручном управлении движением, не учитываются некоторые динамические особенности водоизмещающих судов. Эти особенности зависят от конструкции корпуса и могут меняться при изменении внешних условий. Незнание этих особенностей может привести к возникновению опасных ситуаций при движении судна в сложной внешней среде.

Цель работы – провести сравнение траектории судов различных проектов в сложных условиях плавания и дать рекомендации по улучшению показателей качества движения.

Показатели процесса управления получены по результатам компьютерного моделирования. Коэффициенты математической модели, используемой при моделировании, получены из результатов обработки данных натурных испытаний Анализ проведенных расчетов позволяет предложить некоторые пути решения проблемы качества процесса управления и улучшения траекторий судов при удержании их на курсе в сложных внешних условиях.

Ключевые слова: Автоматическое управление, динамика объектов управления, математическое моделирование, интеллектуальные алгоритмы управления, показатели качества управления, информационное обеспечение процесса управления.

ANALYSIS OF TRAJECTORY OF SHIPS OF VARIOUS DESIGNS IN SEVERE CONDITIONS OF NAVIGATION

Andrey V. Fevralskikh
PhD in Engineering Science, Director of LLC "Avtomatika +"
606016, Dzerzhinsk, Studencheskaya, 32B
e-mail: andrey.chernyshov5@gmail.com
Margarita M. Chirkova
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Computer Informatics,
Control Systems and Telecommunications Department
Volga State University of Water Transport
603650, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: chirkova@vgavt-nn.ru
Tatyana I. Gavrilova
PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Computer Informatics,
Control Systems and Telecommunications Department
Volga State University of Water Transport
603650, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: tigavr@gmail.com

Abstract

When developing algorithms for controlling motion of a vessel along a predetermined path, as well as with manual motion control, some dynamic features of displacement-type ships are not being taken into account. These features depend on the design of the hull and may change with changing external conditions. Ignoring these features can lead to dangerous situations when a ship is moving in a severe external environment.

The purpose of the work is to compare the trajectories of ships of various design in severe navigation conditions and to make recommendations for improving the quality indicators of the motion.

Parameters of the control process are obtained from the results of computer simulation. The coefficients of the mathematical model used in simulation are obtained from the results of processing full-scale trials data. Analysis of the performed calculations allows us to suggest some ways to solve the problem of quality of the control process and improve the trajectories of ships while course-keeping them in severe external conditions.

Keywords: Automatic control, dynamics of control objects, mathematical modeling, intelligent control algorithms, control quality indicators, information support of the control process.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения грузовместимости судов речных и смешанного типа плавания без многостороннего анализа безопасности движения, временных и топливных затрат на перевозку груза или пассажиров.

Экономические расчеты проводятся из условия, что траектория движения судна состоит из прямолинейных участков A-B, B-C, на каждом из которых судно идет с заданной скоростью Vc, практически без отклонения от курса – Δy=0, рисунок 1.

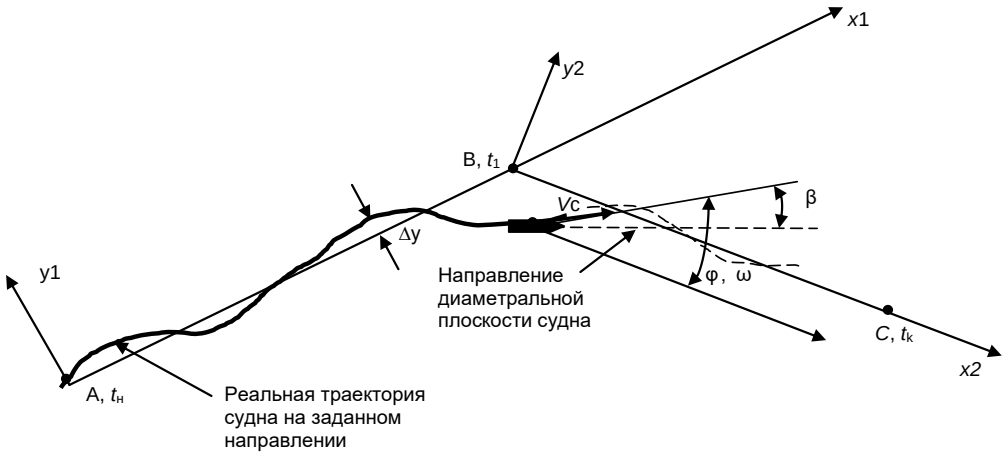


Рис. 1. Траектория движения судна на прямолинейном участке пути A-B.

На рисунке: A-B-C – заданная траектория движения судна, X – направление движения (заданный курс) на заданное время, tн, tк – начальное и конечное время движения, Δy – отклонение центра тяжести судна от заданного направления, Vc – линейная скорость движения судна, φ – текущее отклонение судна от заданного курса с угловой скоростью ω=dφ/dt, β – угол дрейфа (угол между вектором линейной скорости и диаметральной плоскостью судна).

При ручном управлении судоводитель формирует сигнал на управляющие направлением движения привода, величина и длительность которого определяется опытом судоводителя, проектом судна и состоянием внешней среды, рисунок 2. На рисунке: tu – время управления, tp – время паузы (U=0), tc – время цикла.

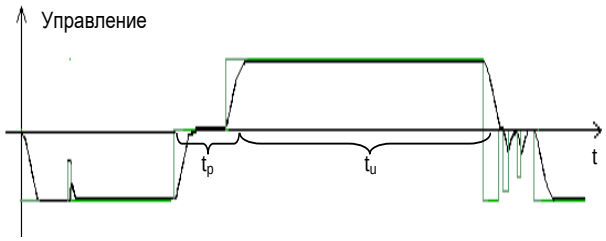


Рис.2. Заданное и фактическое изменение управляющего воздействия

1. Динамические особенности водоизмещающих судов

При оценке движения судна, например, от точки A к точке B не учитывается тот факт, что суда (речные, смешанного типа плавания и, при некоторых условиях, морские) относятся к подвижным объектам, неустойчивым на заданном направлении, то есть при отсутствии управления суда уходят на самопроизвольную циркуляцию. Причина этого в том, что точка равновесия, в которой значения некоторых координат состояния: ω и β при U=0 нулевые, и судно идет по заданному

направлению X с отклонением центра тяжести судна от заданной траектории Δy=0, является неустойчивой типа седла, рисунок 3. Скорость ухода из седла при отсутствии управления, и, соответственно, время выхода судна на самопроизвольную циркуляцию со скоростью ω_0, как и скорость движения в седло, то есть время возврата на курс при подаче управления U, зависят от конструкции корпуса, характеристик рулевого привода и состояния внешней среды – причины выхода изображающей точки из ε-окрестности седла.. Для удержания на курсе такого судна требуется непрерывная перекладка рулевых органов. На рис. 4 представлена траектория речного танкера проекта 558 в режиме удержания его на заданном направлении при спокойной внешней среде и достаточной глубине фарватера (F_0). Алгоритм управления адаптирован под данный тип судна. Для сравнения на рис. 5 представлена аналогичная характеристика при боковом ветре (F_1), на рисунке 6 – мелководье (F_2). В такой ситуации большое значение имеет свойство поворотливости судна (послушливости рулю). Это свойство определяется величиной ω в районе точки с координатами самопроизвльной циркуляции β_0, ω_0, U=0, рис. 3, и ω_0, U=0, рис. 7.

Показатели движения меняются не только при изменении условий плавания, но и плохом информационном обеспечении судоводителя или авторулевого. Последнее не позволяет правильно сформировать соотношение между tp и tu.

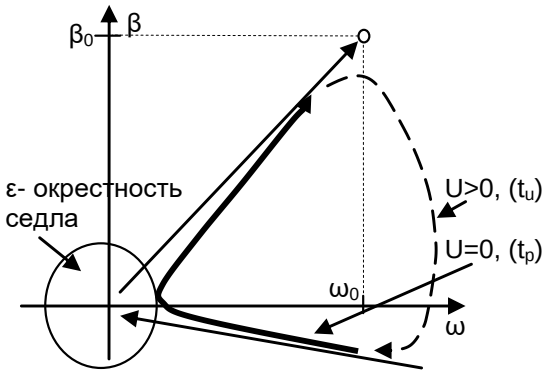


Рис. 3. Траектории изображающей точки в окрестности седла.

Формирование управления с однотипным алгоритмом для всех судов (характеристики траектории представлены ниже, показатели сведены в таблицу 1) усложняется тем, что суда меняют свои гидродинамические характеристики, соответственно, и характеристики управляемости ω(U), β(U), не только при изменении внешней среды (F), но каждый проект судна имет свои оригинальные характеристики и свою чувствительность к изменению внешней среды. На рис. 7 представлены характеристики управляемости судов двух проектов 558 (нефтеналивное, A – глубокая вода, B – мелководье) и 588 (пассажирское, C – глубокая вода, D – мелководье), постронные по результатам натурных экспериментов.

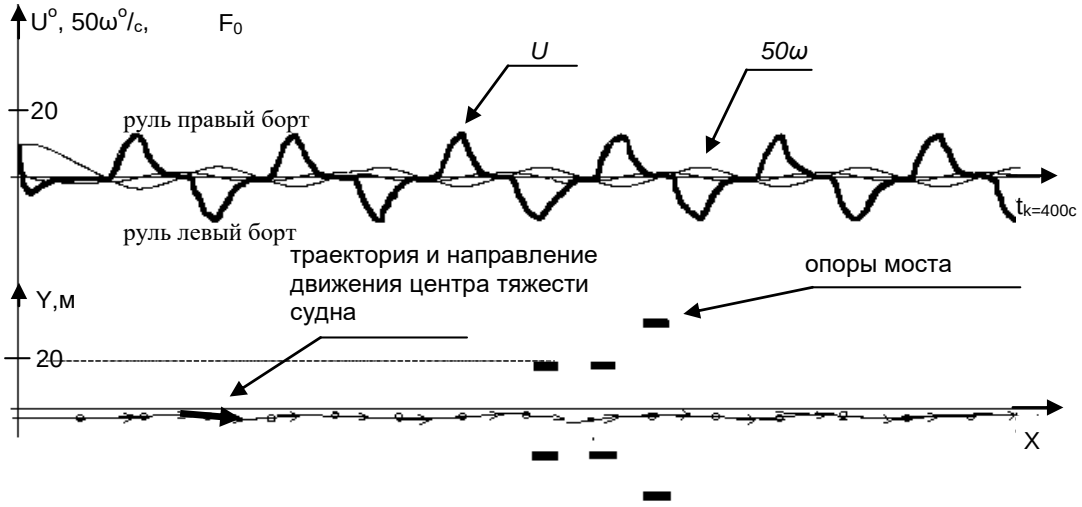


Рис.4. Траектория центра тяжести судна при спокойных внешних условиях.

Параметры траектории: Δy_{max}~6м, максимальное значение ширины судового хода в момент прохода моста H_{cx}~25м, U_{max}~8°, пройденный путь S_n=788 м при максимально возможном S_0=800 м.

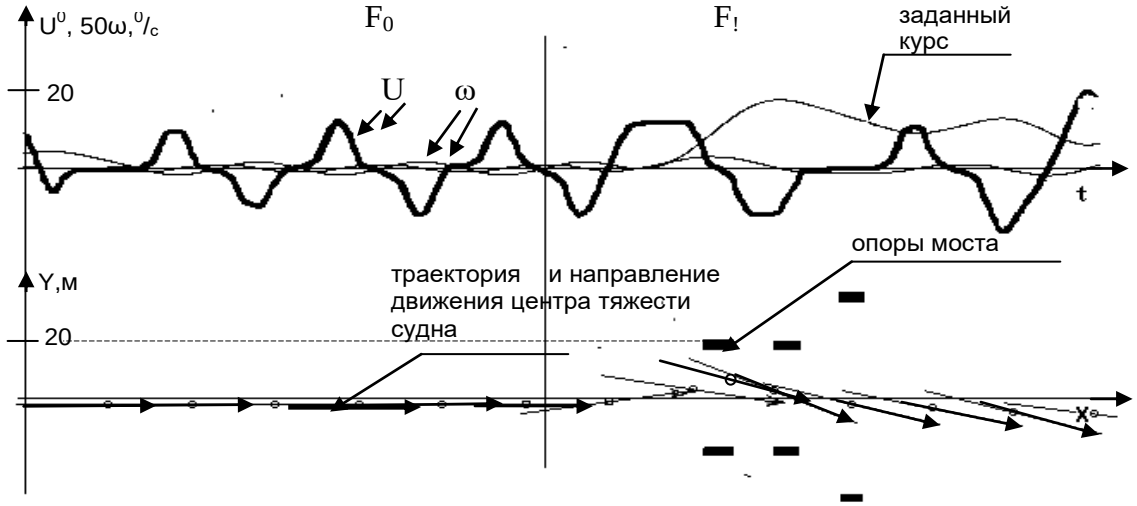


Рис.5. Траектория судна при ветре (течении)

Параметры траектории: Δy_{max}~20м, H_{cx}~50м, U_{max}~15^0, $S_п$=781 м.

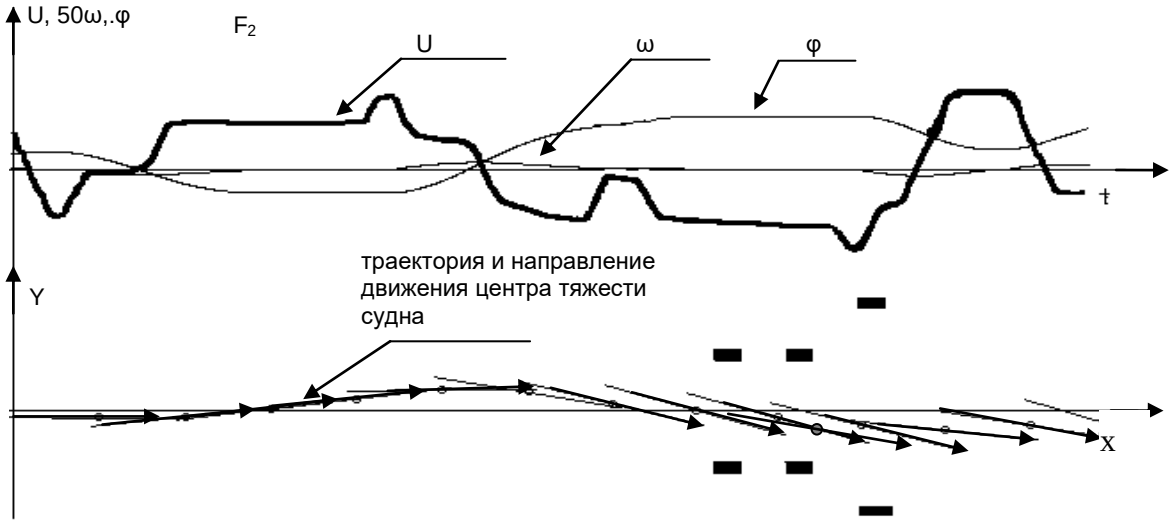


Рис.6. Траектория судна на мелководье

Параметры траектории: Δy_{max}~20м, H_{cx}~40м, U_{max}~16^0.

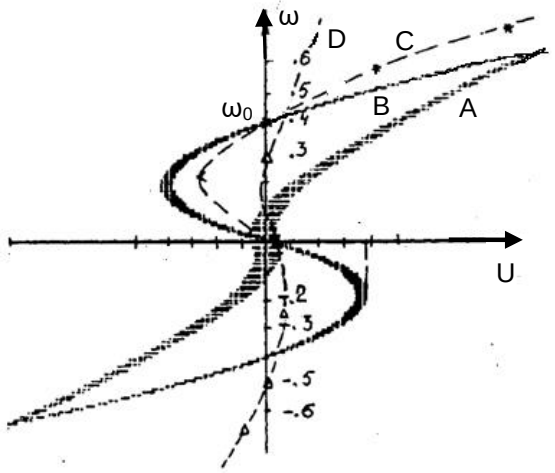


Рис. 7. Характеристики управляемости судов разных проектов

Как показали натурные эксперименты [2], опытный судоводитель, при внимательном наблюдении за движением судна (оценивая φ, ω, dω/dt), может удерживать его на заданном направлении с достаточно высокой степенью точности (φ<0,5°, ω в пределах 0.02–0.03°/с, Δy<1м) и, в некоторых ситуациях, делает до 20 и более перекладок руля в минуту в зависимости от проекта судна и внешней обстановки.

При небрежном управлении неустойчивым судном и недостаточной информации увеличиваются амплитуда рыскания, диапазон изменения угла дрейфа, падает точность удержания судна на заданном направлении и, как следствие этого, увеличиваются пройденный путь (S_n) и вероятность аварий, растут экономические затраты.

2. Обзор аварийных ситуаций

Классификация, причины и статистика аварий достаточно подробно изложены в [3–6], где указывается, что «Основными штурманскими ошибками и недоработками являются следующие: неучет течения; переоценка точности знания скорости и направления течения; неучет ветрового влияния; отсутствие контроля за точностью удержания заданных курса и скорости; несопоставление пройденного расстояния, рассчитанного различными способами, а также курсов, измеренных по различным курсоуказателям;...; отсутствие непрерывного наблюдения за показаниями эхолота при подходе к берегу и при плавании в узкости,...». «Многие аварии происходят из-за промахов и ошибок при проектировании и строительстве судов ...» [5].

Анализ опубликованных в литературе аварийных ситуаций показывает, что аварии возникают по ряду причин, в том числе: ошибки при проектировании и несоблюдение проектных характеристик корпуса при строительстве судов; отсутствие должного контроля за точностью удержания заданного курса; отсутствие достаточной информации для ориентирования положения судна относительно фарватера, неучет того факта, что при внезапной смене гидрометеорологических условий меняются характеристики управляемости судна.

3. Траектории прохода опор моста судами разных проектов

В данной работе по результатам моделирования проводится сравнительный анализ траекторий судов различных проектов в сложных условиях плавания. Оценивается вероятность аварий при внезапном порыве ветра при прохождении опор трёх мостов в районе Нижнего Новгорода (р. Волга). Этот район характерен тем, что по данным [6]: «В условиях маловодности на этом участке критически низкие уровни в районе Городца привели практически к полной остановке движения транзитного флота в навигации 2014 и 2015 годов. Так, гарантированная глубина для прохождения судов с осадкой 3,1 м выдерживалась всего 3% времени от периода навигации. Беспрепятственно смогли проходить суда с осадкой не более 1,7 м. В условиях ограниченных водных ресурсов Рыбинского водохранилища в особом режиме проходили суда с осадкой 2,6 м. Такие условия пропуска судов ограничивают пропускную способность ЕГС в целом, на других участках которой судоходство осуществляется круглосуточно при гарантированных габаритах судовых ходов в течение всей навигации». В такой ситуации вероятность навала на опоры мостов при внезапном порыве ветра повышается.

Для оценки траектории судов при проходе опор моста введены следующие показатели качества: максимальные значения управления (U_{max}); отклонения центра тяжести судна от заданной траектории (Δ_{ymax}); необходимая ширина судового хода при постоянном боковом ветре (H_{cx}); максимальное значение угла дрейфа (β_{max}); отношение времени управления к времени паузы (t_u/t_p); время перехода судна на новый курс (t_{nn}) для компенсации смещения от ветра; отношение пройденного пути (S_n), к возможному (S_0) при заданном времени движения 800с и скорости V_c = 2м/с.

Перечисленные выше частные показатели зависят от деловых качеств судоводителя, состояния внешней среды (F) и, в значительной мере, от корпусных характеристик судна, в частности, от соотношений L/B, B/T, V, α, β^*, σ , где L – длина, B – ширина, T – осадка судна, V – водоизмещение, α, β^*, σ – коэффициенты полноты ватерлинии, мидель-шпангоута, общей полноты корпуса судна. Если влияние первого фактора можно уменьшить за счет более тщательного подбора кадров, второго - получения более точных прогнозов состояния внешней среды, то корпусные параметры судна при его проектировании необходимо оптимизировать для улучшения маневренности в сложных условиях плавания.

В качестве примера зависимости перечисленных показателей движения от корпусных характеристик (типа судна) рассмотривалась ситуация прохождения пролетов мостов при боковом ветре судами разных проектов. (различных габаритов и назначений). Рассматривалась ситуация внезапного порыва бортового ветра скорости $V_в$, задающего снос судна со скоростью V_y.

Ширина судового хода (H_{cx}) рассчитывалась по формуле $H_{cx} = \max(L*\sin(\beta(t))+\Delta y(t) +T/2)$

Ниже (рисунки 8 – 10) приведены результаты моделирования процесса прохождения судами опор 3-х мостов. Ширина между опорами 80 м, расстояние до опор следующего моста 100 м, время движения судна 400с со скоростью 2м/с. Моделирование проводилось для различных ситуаций: при спокойной внешней среде (F_0) и при ветре (F_1). Данные оценки движения сведены в таблицу 1.

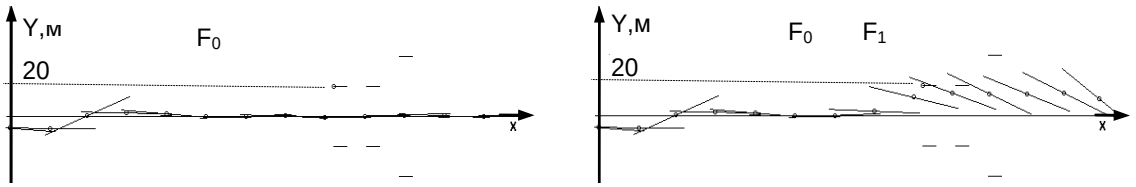


Рис. 8. Траектория сухогрузного судна проекта 1565

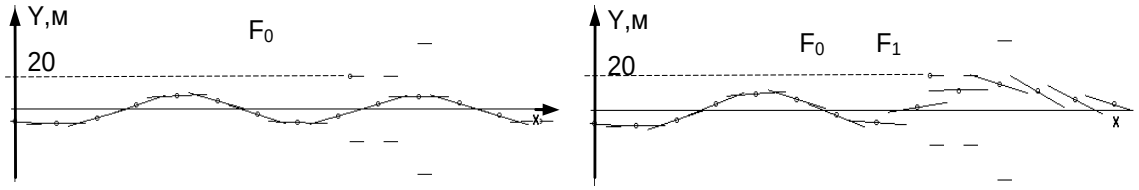


Рис. 9. Траектория сухогрузного судна проекта 19620

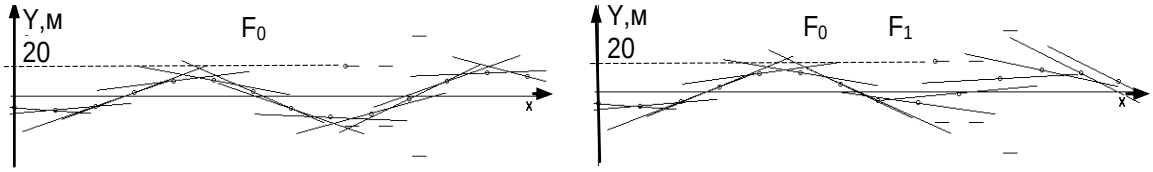


Рис. 10. Траектория контейнеровоз проекта 16090

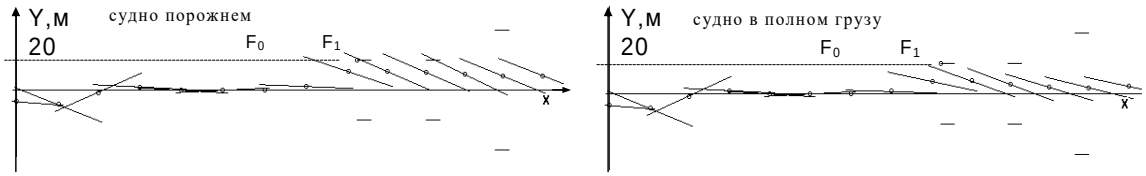


Рис. 11 Траектория нефтеналивного судна проекта 1551

показателей качества движения при проходе пролетов моста грузовыми судами различных проектов при разных внешних условиях: в верхней строке – при спокойной внешней среде и достаточной глубине судового хода, в нижней – при боковом ветре, возникшем при подходе к опорам моста

Надо отметить, что показатели движения при ветре зависят от начальных значений координат состояний φ, ω, $d\omega/dt$ в момент возникновения ветра. Они могут быть как благоприятными на данный момент, когда ветер способствует развитию угловой скорости желательного направления (рис.9,10, переход F_0 – F_1), так и неблагоприятными, что может создать ситуацию, приводящую к катастрофе, несмотря на правильные действия судоводителя

Оценочные параметры прохода пролетов моста *Таблица 1*

Типы судов (проекты)	U_{max}	Δy_{max}	H_{cx} без учета Δy	β_{max}	t_U/t_p	S_n/S_o	Вероятность аварии при ветре
Сухогрузное судно проекта 1565	2-3	10	35	5			
	5	**27**	**70**	**30**	2/33	773/800	Вероятность высокая
Сухогрузное судно проекта 19620	15	18	25	20			
	15	31	49	25	30/36	780/800	
Нефтеналивного судно проекта 558	6	6	25	17			
	24	**13**	**59**	**20**	**206/11**	784/800	Вероятность высокая
Нефтеналивного судно проекта 1551 порожнем	5	**26**	**80**	**28**	1/6	773/800	Вероятность высокая
Нефтеналивного судно проекта 1551 в грузу	3	**18**	**62**	20	1/11	785/800	
Контейнеровоз проекта 16090	30	**23**	**115**	22		776 800	Вероятность высокая, требуется алгоритм управления. настроенный под данный тип проекта.
	30	**30**	**145**	**31**	**54/16**	773 800	

Заключение

Проведенный в работе анализ характеристик движения судна позволяет предложить некоторые пути решения проблемы повышения надежности прохождения узостей в условиях неблагоприятной внешней среды:

- расширить информационное обеспечение рулевого/авторулевого – использовать радиобуи, РЛС, эхолоты, датчики курса, угловой скорости и ускорения, угла дрейфа, скорости ветра и течения для более точной оценки координат судна и отклонения его центра тяжести от генерального направления;
- по возможности дублировать информацию датчиками другой физической природы;
- совершенствовать алгоритм управления – разрабатывать интеллектуальный алгоритм, использующий расширенную информацию о состояни судна, внешней среды, изменяющий свои параметры при изменении среды и настраивающийся под суда разных проектов, имеющих разные конструктивные особенности; расчеты показали, что незнание угла дрейфа и величины смещения центра тяжести судна от заданной траектории, а также неумение предсказывать возможное ихменение траектории судна при внезапном порыве ветра может создать иллюзию благополучного состояния и приведет к принятию непраильного решения;
- включить в требования Речного Регистра проведение испытаний новых образцов судов для оценки их реакции на изменения внешней среды;
- включить в методику испытаний проверку на дрейф на мелководье при максимально допустимом ветре.

Литература

1. Войткунский Я.И. Управляемость водоизмещающих судов: Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский - Л.: Судостроение, 1985. Т. 3. С. 544.
2. Чиркова М.М. Разработка методов идентификации и управления движением неустойчивого на курсе объекта со скрытыми динамическими особенностями / Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. - Нижегородский государственный институт водного транспорта, Н.Новгород, 1998.
3. Авария на морских (речных) судах - Revolution - Allbest. [Электронный ресурс] /Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: https://revolution.allbest.ru/life/00306009_0.html, свободный.
4. Зайков В.И. Повышение безопасности при движении судов под мостами (текст) / В.И. Зайков, М.А. Колосов. - Транспорт Российской Федерации, 2006,. №
5. Груздев Н.М. Классификация, статистика и основные причины морских происшествий / Н.М. Груздев. Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: https://podlodka.info/.../259-classification-of-statistics-and-main-causes-of-marine-acc., свободный.
6. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан. Н-Новгород, 2014. – Режим доступа: https://mintrans.government-nnov.ru/?id=96650, свободный.

References

1. Vojtkunskij YA.I. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchih sudov: Spravochnik po teorii korablya/ YA.I. Vojtkunskij - L.: Sudostroenie, 1985. T. 3. S. 544.
2. Chirkova M.M. Razrabotka metodov identifikacii i upravleniya dvizheniem neustojchivogo na kurse ob"ekta so skrytymi dinamicheskimi osobennostyami / Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskih nauk. - Nizhegorodskij gosudarstvennyj institut vodnogo transporta, N.Novgorod, 1998.
3. Avariya na morskih (rechnyh) sudah - Revolution - Allbest. [Elektronnyj resurs] /Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: https://revolution.allbest.ru/life/00306009_0.html, svobodnyj.
4. Zajkov V.I. Povyshenie bezopasnosti pri dvizhenii sudov pod mostami (tekst) / V.I. Zajkov, M.A. Kolosov. - Transport Rossijskoj Federacii, 2006,. № ,. № 5. C. 39-40.
5. Gruzdev N.M. Klassifikaciya, statistika i osnovnye prichiny morskih proisshestvij / N.M. Gruzdev. Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: https://podlodka.info/.../259-classification-of-statistics-and-main-causes-of-marine-acc., svobodnyj.
6. Stroitel'stvo Nizhegorodskogo nizkonapornogo gidrouzla [Elektronnyj resurs] / Elektron. tekstovye dan. N-Novgorod, 2014. – Rezhim dostupa: https://mintrans.government-nnov.ru/?id=96650, svobodnyj.

УДК 681.518

МОНИТОРИНГ ОСТОЙЧИВОСТИ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ СПАСЕНИЯ ПРИ УГРОЗЕ СКОРОТЕЧНОГО ЗАТОПЛЕНИЯ РЕЧНОГО СУДНА

Александр Владимирович Валяев
аспирант кафедры Информатики, систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: wav-dk@mail.ru
Евгения Александровна Лукина
кандидат технических наук, доцент кафедры Гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: evair@yandex.ru
Виктор Иванович Любимов
доктор технических наук, профессор кафедры Проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru
Юрий Семёнович Федосенко
профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой Информатики, систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: fds@vgavt-nn.ru

Аннотация

Статья посвящена выявлению характеристик, изменения которых во времени (или их отсутствие), позволяет спрогнозировать стадии развития аварийной ситуации речного водоизмещающего судна, приводящей к его скоротечному затоплению.

Для аварийных ситуаций, связанных со статическим креном (или динамическими наклонениями судна), установлена целесообразность прогнозирования их возникновения и развития путем анализа диаграммы статической остойчивости (ДСО). Определены характерные точки ДСО, соответствующие различным стадиям развития аварии. Предлагается осуществлять отслеживание тенденции изменения характеристик остойчивости судна путем оценки значений производных функции плеч ДСО. Сделан вывод о том, что таким образом в режиме реального времени можно прогнозировать продолжительность нахождения судна в безаварийном состоянии, а также определять интенсивность приближения к опасной стадии развития аварийной ситуации. Данная информация, оперативно представляемая на мониторе, будет способствовать своевременному принятию капитаном судна решения об использования спасательных средств.

Ключевые слова: речное водоизмещающее судно, диаграмма статической остойчивости, динамические наклонения, классификация аварий, затопление судна, опрокидывание судна.

MONITORING OF STABILITY IN DIGITAL INTELLIGENT SUPPORT SYSTEM SYSTEM AT RISK OF FLEETING ACCIDENT OF A DISPLACEMENT VESSEL

Alexander V. Valyaev
Postgraduate of the Department of Computer Science, Control Systems and Telecommunications
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5
e-mail: wav-dk@mail.ru
Evgenia A. Lukina
PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Shipping
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5
e-mail: evair@yandex.ru
Viktor I. Lyubimov
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Shipbuilding
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Yury S. Fedosenko
Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Science,
Control Systems and Telecommunications
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5
e-mail: fds@vgavt-nn.ru

Abstract

The article is devoted to identifying the characteristics, which change over time (or lack thereof) allows to predict the development stages of an emergency situation of the river displacement vessel, leading to its rapid sinking.

For emergencies associated with static roll (or dynamic inclinations of the vessel), the expediency of predicting their occurrence and development has been established by analyzing the static stability diagram (SSD). The characteristic points of SSD corresponding to different stages of the accident development are determined. It is proposed to monitor the tendency of changes in the characteristics of stability of the vessel by estimating the values of derivatives of the function of the arms of the SSD. It was concluded that in this way in real time it is possible to predict the duration of the vessel in an accident-free state, as well as to determine the intensity of approach to dangerous stages of the accident. This information, promptly presented on the monitor, will facilitate the timely decision of the captain of the vessel to use rescue equipment.

Key words: river displacement vessel, static stability diagram, dynamic inclinations, accident classification, vessel sinking, vessel tipping.

Введение

Обеспечение безопасности судоходства на внутренних водных путях является непреходящей актуальной задачей и приобретает все большую значимость в связи с развитием внутреннего туризма и оптимизацией расходов на перевозки.

Известно, что значительная часть аварий речных водоизмещающий судов, приводящих к серьезным повреждениям судна (или к его гибели) и человеческим жертвам, происходит по причине скоротечного затопления судна. По данным статьи [1] доля таких аварий составляет 95,2%. В качестве примеров приведем следующие:

а) крушение теплохода «Булгария», 10.07.2011, куйбышевское водохранилище, р. Волга (Россия), жертвы − 122 человека, пострадавших − 79 человек [2];

б) крушение теплохода «Дунфанчжисин», 01.06.2015, р. Янцзы (Китай), человеческие жертвы − 442 человека, пострадавших − 12 человек [3];

в) крушение судна «H/B Espoir» 27.09.2018, р. Монгала (ДР Конго), жертвы − 27 человек, пропавших без вести − 54 человека [4].

В целях сокращения времени принятия решений капитаном судна при аварийном происшествии, снижения уровня влияния субъективного фактора, повышения эффективности реализации спасательных операций в статье рассматривается модель мониторинга остойчивости для системы поддержки принятия решений об использовании средств спасения при угрозе скоротечного затопления речного судна (СППР).

Осуществляя в режиме реального времени сбор информации о событиях в судовых системах, а также контроль значений ключевых параметров, СППР позволит своевременно выявлять закономерности и корреляции в событиях и, таким образом, предоставлять вахтенному начальнику обобщенную картину актуального состояния судна, выявлять тенденции нежелательных изменений и отображать их средствами визуализации.

Известные на водном транспорте системы поддержки принятия решения [5-8] предназначены для расчета остойчивости, конструктивной прочности, мореходности, параметров посадки, распределения груза. Однако, из открытых источников не известны системы, функционально аналогичные СППР.

1. Классификация аварий, повлекших за собой гибель судов

Анализ отчётов ИМО [1] показывает, что все аварии, повлекшие за собой гибель судов (кроме пожаров), делятся на аварии, связанные с потерей плавучести, и аварии, в которых гибель судна произошла вследствие потери остойчивости.

Затопление судна, вызванное потерей плавучести, происходит при его посадке на мель, навалах и столкновении с другим судном. Продолжительность затопления судна зависит от размеров и расположения пробоины и поэтому в большинстве случаев может быть оценена командой.

Аварии судна, связанные с потерей остойчивости, согласно классификации ИМО [9], можно разделить на следующие группы:

— внезапное опрокидывание вследствие шквала ветра, волн и/или другого внезапного кренящего воздействия;

— медленное нарастание крена с последующим опрокидыванием;

— затопление судна с одновременным нарастанием крена и потерей остойчивости.

В развитии любой аварийной ситуации можно выделить три этапа (фазы). На первом этапе обнаруживается нарушение в нормальном функционировании судна. При неудачных попытках устранения обнаруженных нарушений возникает необходимость принять решение об оставлении судна экипажем и пассажирами, спуске на воду всех имеющихся спасательных средств до перехода аварии в третью фазу — скоротечную аварию. На этом этапе гибель судна становится неизбежной и происходит его затопление, либо

опрокидывание.

Для оценки этапов аварийной ситуации и их длительностей должны быть выявлены такие характеристики судна, изменение которых во времени (или отсутствие изменений) свидетельствуют о развитии аварии с приближением к третьей, критической фазе.

Для выявления этих характеристик в форме, удобной для использования в алгоритме функционирования СППР, статический и динамический случай развития аварийной ситуации ниже рассматриваются раздельно.

2. Определение критерия для отслеживания тенденции изменения характеристик остойчивости

2.1. Статический случай развития аварии

При медленном нарастании крена судна параметры его остойчивости определяются путём расчёта диаграммы статической остойчивости (ДСО). В СППР расчёт диаграмм статической и динамической остойчивости производится непрерывно в процессе эксплуатации судна. Это целесообразно для определения предельно допустимого момента с более широким учётом всех внешних условий, влияющих в том числе и на кренящий момент.

В исследовательских целях и ряде практических задач ДСО строят в значениях плеч статической остойчивости l, которые по физическому смыслу являются удельным восстанавливающим моментом $l = \frac{M}{D}$. По аналогии с l кренящий момент для работы с ДСО представляется в виде $l_{кр} = \frac{M_{кр}}{D}$.

При постоянно действующем кренящем моменте условие устойчивого равновесия соответствует восходящей ветви ДСО и записывается в виде неравенства $\frac{dl}{d\theta} > 0$. Однако характер изменения плеча статической остойчивости может меняться и в пределах зоны устойчивого равновесия. Так, резкое увеличение угла крена судна в случае незначительного увеличения кренящего момента при статическом приложении свидетельствует о скорой внезапной потере остойчивости (рис. 1). Теоретически это выражается уменьшением интенсивности возрастания плеча статической остойчивости на восходящей ветви ДСО с приближением к точке её максимума.

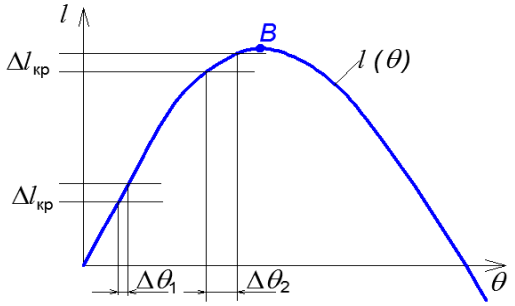


Рис. 1. Увеличение угла наклонения судна с приближением к максимуму ДСО.

Увеличение угла наклонения судна $\Delta\theta$ при постоянном значении плеча кренящего момента $l_{кр} = const$ свидетельствует о приближении судна к точке безразличного равновесия – точке максимума ДСО, которая при статическом приложении максимально допустимого кренящего момента соответствует точке неустойчивого равновесия – точке «*B*».

Для типовой диаграммы речного водоизмещающего пассажирского судна (ДСО с прямолинейным начальным участком) граница зоны приближения к неустойчивому равновесию судна, т.е. к возможности его опрокидывания, может находиться в точке отклонения графика $l(\theta)$ от касательной к начальному участку – точке «*A*» (рис. 2).

Также прямолинейный участок ДСО, начинающийся в точке «*C*», можно выделить и на нисходящей ветви ДСО, соответствующей зоне неустойчивого равновесия судна. В этом случае переход к прямолинейному участку соответствует возрастающей интенсивности уменьшения плеча статической остойчивости, а, значит, и к неизбежному опрокидыванию судна.

Поскольку речь идёт об изменении интенсивности возрастания (скорости изменения) плеча статической остойчивости в зависимости от угла наклонения судна, то целесообразно построить график зависимости этой скорости от углов крена $l'(\theta)$.

Проводя анализ ДСО первого типа и графика функции $l'(\theta)$ можно выделить ряд характерных точек. Так, при дифференцировании этой функции можно построить график второй производной плеча статической остойчивости по углу крена и, при необходимости, графики производных более высокого порядка $l^n(\theta)$ (рис. 2).

В общем случае для того чтобы определить необходимый порядок дифференцирования функции $l^n(\theta)$ надо исследовать ДСО речных водоизмещающих судов с целью определения степени полинома, аппроксимирущего участок «*AC*» диаграммы с удовлетворительной точностью. Степень полинома определит порядок производной, при которой график функции $l^n(\theta)$ линеаризуется на участках «A^nB^n» *и* «B^nC^n» (рис. 2). Это позволит количественно определить интенсивность уменьшения плеча статической остойчивости, как значения коэффициента k функции $l^n(\theta) = k \cdot \theta$ на каждом характерном участке наклонений. При этом $k = 0$ на участке «OA^n» будет соответствовать начальному участку восходящей ветви ДСО; $k < 0$ — участку «A^nB^n» приближения судна к зоне возможности опрокидывания, а минимум функции $l^n(\theta)$, определённый как $l^{n+1}(\theta) = 0$, — точке неустойчивого равновесия судна, после прохождения которой возможно его опрокидывание. В алгоритме СППР для получения графика в линейном виде следует продифференцировать несколько раз функцию

$l(\theta)$, пока значение производной при всех значениях аргумента не станет равным нулю. Такое представление графика удобно для встраивания в алгоритм определения характеристик изменения остойчивости судна посредством логических операций. Линеаризованный график является характеристикой изменений остойчивости судна, свидетельствующей о приближении к третьей фазе аварийной ситуации — скоротечной аварии. Если ускорение изменения плеча статической остойчивости становится отрицательным (точка «A^n'»), то это свидетельствует о приближении к точке неустойчивого равновесия судна и возможности его опрокидывания в точке «B^n'».

Качественное определение возможных состояний остойчивости судна в зависимости от численных значений углов крена, характеризующих непосредственно типовые ДСО для пассажирских судов, выполнено А.А. Ершовым [10].

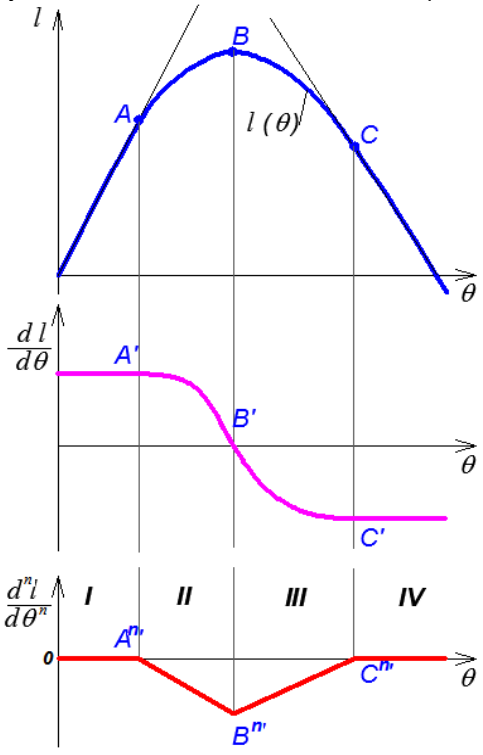


Рис. 2. Соответствие характерных точек на графиках $l(\theta)$, $l'(\theta)$, $l^n(\theta)$ состояниям остойчивости судна.

Если эти определения применить к безразмерным характерным точкам на графике $l^n(\theta)$, то получим следующее соответствие (см. рис.2):

I – опрокидывание судна невозможно, следует принять меры по его спрямлению;

II – опрокидывание судна невозможно, средства спасения следует привести в состояние готовности;

III – опрокидывание судна возможно;

IV – опрокидывание судна гарантировано.

Анализ функции $l^n(\theta)$ позволит получить алгоритм оценки стадии аварии судна при статическом нарастании крена.

Если нарастание статического крена связано с затоплением судна, то его ДСО в различные моменты времени (рис. 3) можно рассматривать как полученные при последовательно изменяющемся водоизмещении D. Расчёт ДСО аварийного судна при затоплении отсеков, так же как и ДСО неповреждённого судна, хорошо изучен в теории корабля и алгоритмизирован [11]. Построение последовательно полученных во времени ДСО судна в одних координатных осях, а также построение семейства графиков $l^n(\theta)$ для каждого момента времени позволит заметить тенденцию к снижению углов крена, соответствующих характерным точкам наступления второй стадии аварии, и при сравнении их значений с показаниями датчиков угла крена своевременно принять решение об использовании средств спасения.

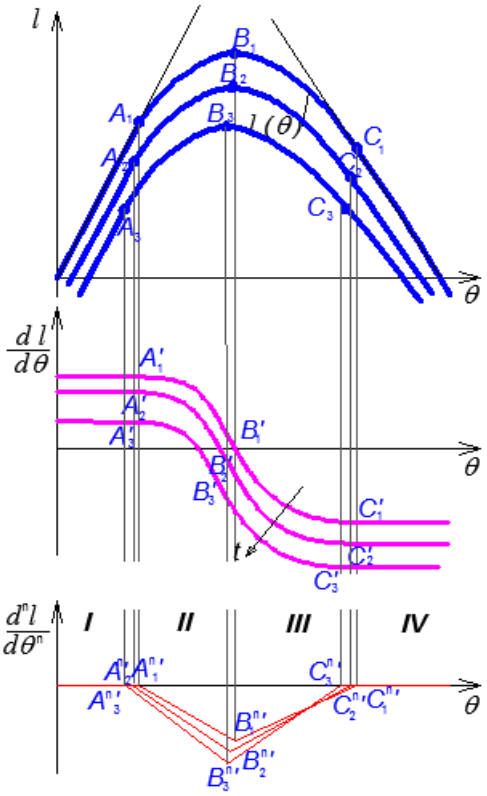


Рис. 3. Изменение положения характерных точек на графиках $l(\theta)$, $l'(\theta)$, $l^n(\theta)$ при затоплении судна.

2.2. Динамический случай развития аварии

Аналогичные рассуждения могут иметь место и при динамическом приложении кренящего момента от резкого усиления ветра.

При динамическом приложении кренящий момент меньшего значения, чем равный максимальному плечу ДСО, может опрокинуть судно, т.е. быть причиной такого угла крена, который окажется равен статическому углу крена неустойчивого равновесия. В этом случае надо рассматривать (рис. 4) интенсивность изменения площадей S_1 и S_2, представляющих собой работу кренящего и восстанавливающего моментов, и связанную с изменением этой интенсивности

скорость возрастания динамического угла θ_d крена судна. Пока на линейном участке диаграммы площади S_1 и S_2 имеют треугольную форму, интенсивность возрастания динамического угла крена при увеличении значения кренящего момента является величиной постоянной $\frac{\Delta l_{кр}}{\Delta \theta_d} = const$.

С приближением к углам крена, соответствующим точке «*B*», площадь S_2 становится равной S_1 при большем увеличении θ_d. При незначительном изменении кренящего момента динамический угол крена растёт интенсивнее, а при некотором значении и вовсе становится углом опрокидывания.

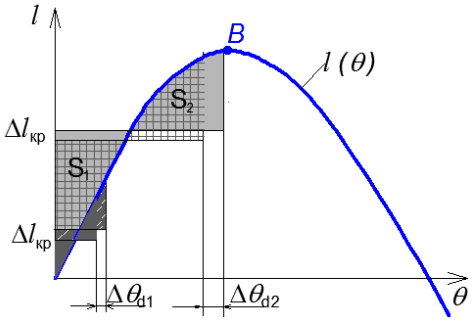


Рис. 4. Увеличение динамического угла крена судна с приближением к максимуму ДСО

Для судна с уменьшенной метацентрической высотой (*S*-образный начальный участок диаграммы) или вовсе отрицательной начальной остойчивостью (петля ДСО под осью абсцисс), которая может иметь место для аварийного судна, нельзя говорить о треугольной форме площадей. В этом случае целесообразнее прийти к сравнению интенсивности приращения площадей S_1 и S_2 относительно интенсивности увеличения динамического крена $\Delta\theta_d$ в зависимости от $l_{кр}$.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Установлена целесообразность использования характеристик ДСО для прогнозирования всех групп аварий, связанных с потерей остойчивости.
2. Для отслеживания тенденции изменения характеристик остойчивости судна предложено ввести дополнительный критерии — производные функций ДСО.
3. Установлены характерные точки ДСО, соответствующие различным стадиям развития аварии.

Дополнительная информация

Работа выполнена при поддержке гранта «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 13574 ГУ/2018)

Литература

1. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Исследование надёжности и риска эксплуатации отечественных речных пассажирских судов. Вестник Одесского национального морского университета. 2015. № (1)37. С. 22-35.
2. Аргументы и факты [Электронный ресурс]: Крушение теплохода «Булгария». Хроника и расследование дела. URL: http://www.aif.ru/dontknows/file/krushenie_teplohoda_bulgariya_hronika_i_rassledovanie_dela (дата обращения: 20.09.2018).
3. РИА Новости [Электронный ресурс] : Крупные аварии на пассажирских судах и паромах в мире (2008-2013). URL: http://ria.ru/spravka/20130816/956847167.html (дата обращения: 20.09.2018).
4. РИА Новости [Электронный ресурс]: В Конго 27 человек погибли при крушении речного судна. URL: https://ria.ru/world/20180919/1528911565.html (дата обращения: 20.09.2018).
5. Новости Морского Инженерного Бюро [Электронный ресурс]: Общая информация о ERS. URL: http://www.meb.com.ua/ers.html (дата обращения 20.09.2018).
6. Мурманский государственный технический университет [Электронный ресурс]: Автоматизированная система контроля остойчивости морских судов. МГТУ. URL: http://www.mstu.edu.ru/science/results/ntp/Prohor2.shtml (дата обращения 11.05.2017)
7. ЦНИИМФ [Электронный ресурс]: Прибор контроля остойчивости судна: URL: http://cniimf.ru/proekty/339/ (дата обращения 20.09.2018).
8. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. Одесса. ФЕНИКС. 2005. 272 с.
9. Александров М.Н. Безопасность человека на море. Л. Судостроение. 1983. 209 с.
10. Ершов А.А. Способы выживания людей при морских и речных авариях. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 4 (38). С. 15–22.
11. Семенов-Тян-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969. 400 с.

References

1. Egorov G.V., Egorov A.G. Issledovanie nadjozhnosti i riska jekspluatacii otechestvennyh rechnyh passazhirskih sudov. Vestnik Odesskogo nacional'nogo morskogo universiteta. 2015. № (1)37. S. 22-35.
2. Argumenty i fakty [Jelektronnyj resurs]: Krushenie teplohoda «Bulgarija». Hro-nika i rassledovanie dela. URL: http://www.aif.ru/dontknows/file/krushenie_teplohoda_bulgariya_hronika_i_rassledovanie_dela (data obrashhenija: 20.09.2018).
3. RIA Novosti [Jelektronnyj resurs]: Krupnye avarii na passazhirskih sudah i paromah v mire (2008-2013). URL: http://ria.ru/spravka/20130816/956847167.html (data obrashhenija: 20.09.2018).

4. RIA Novosti [Jelektronnyj resurs]: V Kongo 27 chelovek pogibli pri krushenii rechnogo sudna. URL: https://ria.ru/world/20180919/1528911565.html (data obrashhenija: 20.09.2018).
5. Novosti Morskogo Inzhenernogo Bjuro [Jelektronnyj resurs]: Obshhaja informacija o ERS. URL: http://www.meb.com.ua/ers.html (data obrashhenija 20.09.2018).
6. Murmanskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet [Jelektronnyj resurs]: Avtomatizirovannaja sistema kontrolja ostojchivosti morskih sudov MGTU. URL: http://www.mstu.edu.ru/science/results/ntp/Prohor2.shtml (data obrashhenija 11.05.2017).
7. CNIIMF [Jelektronnyj resurs]: Pribor kontrolja ostojchivosti sudna: URL: http://cniimf.ru/proekty/339/ (data obrashhenija 20.09.2018).
8. Vagushhenko L.L., Vagushhenko A.L., Zaichko S.I. Bortovye avtomatizirovannye sistemy kontrolja morehodnosti. Odessa, FENIKS. 2005. 272 s.
9. Aleksandrov M.N. Bezopasnost' cheloveka na more. L. Sudostroenie. 1983. 209 s.
10 .Ershov A.A. Sposoby vyzhivanija ljudej pri morskih i rechnyh avarijah. Vestnik Gosudar-stvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2016. № 4 (38). S. 15–22.
11. Semenov-Tjan-Shanskij V.V., Blagoveshhenskij S.N., Holodilin A.N. Kachka korablja. L. Sudostroenie. 1969. 400 s.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 627.748:621.879.45

МЕТОД РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА АЭРИРОВАННЫХ ИЛИСТЫХ ГРУНТОВ ГРУНТОНАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ ЗЕМСНАРЯДОВ

Николай Николаевич Арефьев
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ЭСЭУ
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: arefyev1987@mail.ru
Евгений Павлович Роннов
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Николай Фролович Попов
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ЭСЭУ
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Илья Сергеевич Сухарев
соискатель кафедры ЭСЭУ
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: is.sukharev@gmail.com

Аннотация

Повышение энергетической эффективности процесса гидротранспорта илистых донных отложений как вязкопластичных жидкостей является важнейшей проблемой при разработке грунтов землесосными земснарядами. Наиболее перспективным способом повышения текучести вязкопластичных жидкостей является формирование пузырьковой газожидкостной смеси, позволяющей снизить предельное напряжение сдвига до 2 раз, по сравнению с исходной жидкостью.

В настоящее время отсутствуют методы инженерного расчета систем аэрации илистых грунтов в составе грунтонасосных установок. Возникает необходимость в формализации методики расчета, которая учитывает оптимальные параметры формирования газожидкостной смеси и приводит к минимизации гидравлического уклона, как меры энергетической эффективности установок землесосных земснарядов. Использование и программная реализация подобной методики расчета позволит упростить проектирование и расчет систем гидротранспорта земснарядов, отличающихся минимальными удельными энергозатратами.

На основании уравнений реологических параметров газожидкостных смесей илистых донных отложений и воздуха выполнен численный эксперимент, получено уравнение регрессии гидравлического уклона относительно типовых исходных данных при расчете грунтонасосных установок: предельного напряжения сдвига отложений, подачи грунтового насоса, относительного диаметра пузырьков воздуха и их объемной концентрации.

Ключевые слова: Земснаряд, аэратор, двухфазные смеси, вязко-пластичная жидкость, воздух, предельное напряжение сдвига, пластическая вязкость.

METHOD FOR CALCULATING THE PIPELINE TRANSPORTATION OF AERATED SILTY SOILS BY SUCTION DREDGERS

Nikolay N. Arefyev
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plant
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: arefyev1987@mail.ru
Evgeny P. Ronnov
Dr.Sci.Tech, Professor , Head of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru

Nikolay F. Popov
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plant
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Ilya S. Sukharev
Applicant for a degree of the Department of of Operation of Ship Power Plant
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: is.sukharev@gmail.com

Abstract

Improving energy efficiency of the process of hydraulic transportation of silty bottom sediments as viscoplastic fluids is a major problem while dredging soils using suction dredgers. The most promising way to increase the viscosity of viscoplastic fluids is to generate a bubbly gas-liquid mixture, which makes it possible to reduce the yield value by up to 2 times compared with the initial fluid.

At present, there are no engineering calculation methods for aeration systems for silt soils in arrangement of suction dredgers. There is a need to formalize the calculation method, which takes into account the optimal parameters for generation of a gas-liquid mixture and leads to minimization of the hydraulic gradient, as a measure of energy efficiency of suction dredgers. The use and software implementation of such a method of calculation will simplify the design and calculation of hydraulic transportation systems of dredgers distinguished with minimum specific energy consumption.

Based on the equations of rheological parameters of gas-liquid mixtures of sludge bottom sediments and air, a numerical experiment was performed, a hydraulic gradient regression equation was obtained for typical input data when calculating the following for suction dredgers: yield value of the sediments, suction dredging pump flow rate, relative diameter of air bubbles and their volumetric concentration.

Keywords: Dredger, aerator, two-phase mixtures, viscous-plastic fluid, air, yield value, plastic viscosity.

Введение

Системы гидротранспорта вязкопластичных жидкостей отличаются низкой энергетической эффективностью. Это связано со сложными реологическими свойствами данных жидкостей и наличием предельного напряжения сдвига. Известны различные способы повышения текучести вязкопластичных жидкостей, целесообразность применения которых зависит от технологических особенностей процесса трубопроводного транспорта [2,5,6,7]. К вязкполастичным жидкостям относятся: илистые донные отложения естественной влажности, озерные сапропели, мазуты, гудроны, высокопарафинистые сорта нефти, сточные воды, пищевые материалы и продукты, полимеры и расплавы.

Наиболее перспективным способом снижения реологических свойств грунта в составе грунтонасосной установки землесосных земснарядов является аэрация. Авторами разработана система аэрации илистых донных отложений, включающая аэратор вязкопластичных жидкостей с прерывателем потока газа [3]. При этом процесс формирования пузырьковой газожидкостной смеси, как наиболее эффективной для повышения текучести грунтов, обеспечивается прерывателем потока воздуха – электромагнитным клапаном и генератором импульсов, предотвращающими переход к пробковой и снарядной форме течения.

В состав аэратора также входят газоподающие трубки, состоящие из металлического сетчатого или перфорированного каркаса и внутренней неметаллической части с диспергирующими отверстиями.

1. Цели и задачи исследования

На основании результатов экспериментов по исследованию реологических свойств газожидкостной смеси вязкопластичная жидкость-воздух с использованием аэратора вязкопластичной жидкости согласно [3] получены уравнения регрессии, характеризующие изменения реологических свойств:

$$\tau_0' = (\mathbf{1,4}3 - 1{,}34\,d + 1{,}58d^2 - 8{,}2q + 52q^2 - 0{,}01\tau_0 + 0{,}0001{\tau_0}^2)\tau_0 \quad (1)$$

$$\eta' = (2{,}72 - 0{,}81\,\eta + 0{,}08\,\eta^2 - 0{,}59\,d + 0{,}61d^2 - 1{,}18\,q - 17{,}08\,q^2)\eta, \quad (2)$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига исходной жидкости, Па;
η – пластическая вязкость исходной жидкости, Па с;
τ_0' – предельное напряжение сдвига газожидкостной смеси, Па;
η' – пластическая вязкость газожидкостной смеси;
q – относительное объемное газосодержание смеси, выраженное через отношение расходов жидкости Q_1 и газа Q_2, $q = Q_1/Q_2$;
d – расчетный относительный диаметр пузырьков воздуха $d=d_п/d_{кр}$, при этом согласно [4]:

$$d_{кр} \le \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \tau_0}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}, \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность илистых донных отложений, кг/м^3;
ρ_2 – плотность воздуха, кг/м^3.

Данные уравнения справедливы для описания реологических свойств газожидкостных смесей вязкопластичная жидкость воздух в широком

диапазоне параметров: $d = 0..1$, q < 0,3, при τ_0 < 100 Па, что соответствует реологии илистых донных отложений естественной влажности.

Использование данных уравнений при проектировании грунтонасосных установок землесосных земснарядов затруднительно. Для этого необходима инженерная методика расчета системы аэрации, позволяющая определить основные конструктивные параметры. Целесообразно выполнить оптимизацию относительно наиболее важного фактора. В качестве параметра оптимизации выберем величину гидравлического уклона i (Па/м) как меру потерь энергии при гидротранспорте. Тогда физическую модель процесса аэрации илистых донных отложений относительно гидравлического уклона i' для смеси запишем следующим образом:

$$i' = f(\tau_0, d, q, U_1, \rho_1, D), \qquad (4)$$

где U_1 – скорость жидкой фазы, м/с.
D – диаметр напорного грунтопровода, м.

Оптимизацию параметра гидравлического уклона целесообразно выполнить на основании результатов численного эксперимента по плану дробно факторного эксперимента ДФЭ 3^{6-2}.

Расчет факторов, входящих в уравнение (4) будет выполняется в следующей последовательности:

$$U_1' = \frac{4\,(Q_1+Q_2)}{\pi D^2} \qquad (5)$$

U_1' – скорость течения смеси, м/с;
Q_1 – объемный расход жидкой фазы, м^3/ч;
Q_2 – объемный расход газовой фазы, м^3/ч;
D – диаметр трубопровода, м.

Затем определяется число Рейнольдса для смеси:

$$Re' = \frac{(\rho_1(1-q)+\rho_2 q)\,U_1'\,D}{\eta'} \qquad (6)$$

Критерий Ильюшина, характеризующего неньютоновские свойства перекачиваемой смеси:

$$И' = \frac{\tau_0'\,D}{\eta'\,U_1'} \qquad (7)$$

Тогда модифицированное число Рейнольдса согласно [2] запишем следующим образом:

$$Re_{пл}' = \frac{Re'}{\left(1+\frac{И'}{6}\right)\left[1-\left[\frac{И'}{8{,}87\left(1+\frac{И'}{6}\right)}\right]^4\right]} \qquad (8)$$

Потери напора ΔP на длине трубопровода L диаметром D определяются следующим образом:

$$\Delta P_0 = \frac{64}{Re_{пл}'}\,\frac{L}{D}\,\frac{(\rho_1(1-q)+\rho_2 q)\,U_1'^2}{2} \qquad (9)$$

Гидравлический уклон при гидротранспорте смеси по напорному трубопроводу:

$$i_{см} = \frac{64}{Re_{пл}'}\,\frac{1}{D}\,\frac{(\rho_1(1-q)+\rho_2 q)\,U_1'^2}{2} \qquad (10)$$

Необходимо, чтобы границы факторного пространства соответствовали характеристикам существующих энергетических установок землесосных земснарядов, способных перекачивать грунты естественной влажности – проекты земснарядов: 258.60СШ, 44.001, 44.002 и проект 6000 (таблица 1).

Таблица 1

Фактор	Min	Центр т.	Max
τ_0, Па	22	60	100
d, м/м	0,2	0,5	0,8
q, (м^3/с) / (м^3/с)	0,02	0,09	0,16
U_1, м/с	0,15	1,3	2,5
D, м	0,1	0,25	0,4
ρ_1, кг/м^3	1000	1250	1500

2. Результаты эксперимента и задача оптимизации

Анализ результатов эксперимента выполнен в программном пакете *Statistica 6.0*.

Оценка значимости по *t*-критерию Стьюдента позволяет исключить из уравнения регрессии величину диаметра трубопровода D, а также плотность илистых донных отложений ρ_1. Поверхность отклика i'=f(U1,d) при постоянных значениях факторов τ_0 и q представлена на рисунке 1, исходя из которого видно, существует явный оптимум в окрестностях d = 0,44 и U1 = 1,2..2,6.

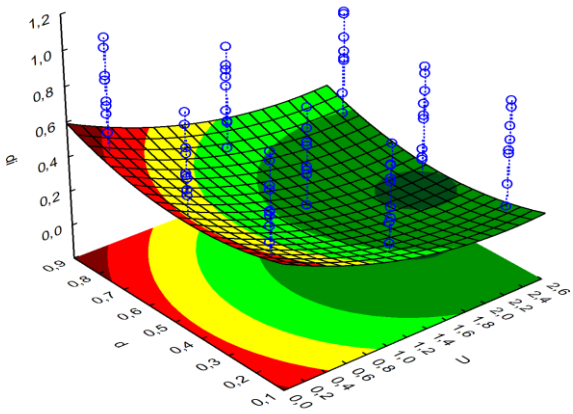


Рис. 1. Поверхность отклика i'=f(U1,d)

С учетом результатов программного дисперсионного анализа и исключения из модели незначимых эффектов и взаимодействий запишем уравнение регрессии относительного гидравлического уклона с величиной достоверности $R^2 = 0{,}8$:

$$i' = (0{,}077\tau_0)^2 - 0{,}007\tau_0 - 3{,}5q + 0{,}8\,d^2 - 0{,}7d + 0{,}07U_1^2 - 0{,}3U_1 \qquad (11)$$

В большинстве случаев предельное напряжение сдвига илистых донных отложений при разработке грунтонасосных установок является исходным параметром, то в задаче оптимизации учитываются факторы: скорость смеси U_1, относительная концентрация пузырьков газа q относительным диаметром d.

В результате анализа уравнения 11 получим:

$$U_{1\text{опт}} = \frac{0,3}{0,14} = 2,14\ [\text{м/с}] \qquad (12)$$

$$q_{\text{опт}} = \frac{3,48}{11,8} = 0,29 \qquad (13)$$

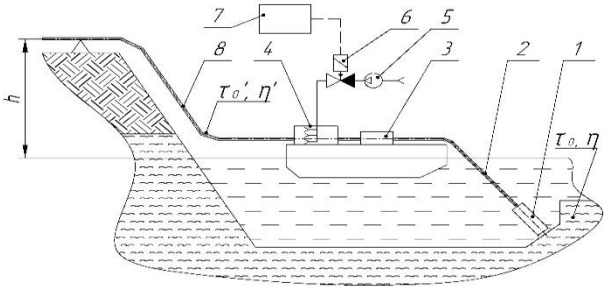
$$d_{\text{опт}} = \frac{0,59}{1,56} = 0,44 \qquad (14)$$

Оптимальные значения факторов *d=0,44; q=0,09..0,29; U_1=1,32..2,26 м/с* позволяют снизить гидравлический уклон при гидротранспорте газожидкостной смеси илистых донных отложений и воздуха по сравнению с транспортированием одной лишь вязкопластичной жидкости в 2,7..5,56 раза (*i'/i*= 0,18..0,37). На практике для сохранения пузырьковой структуры течения смеси целесообразно использовать расчетные значения *q = 0,08..0,09*.

3. Методика инженерного расчета системы аэрации

Исходными данными для проектирования и модернизации землесосных земснарядов являются: требуемая техническая производительность по грунту, требуемая дальность транспортирования (L_i) и высота всасывания (глубина грунтозабора), требуемая высота подъема грунта (*h*), физические и реологические свойства разрабатываемого грунта.

Расчетная схема напорного грунтопровода предлагаемой инженерной методики расчета представлена на рисунке 2.



1 – грунтозаборное устройство; 2 – всасывающий грунтопровод; 3 – грунтовый насос; 4 – аэратор вязкопластичной жидкости; 5 – компрессор воздушный; 6 – клапан электромагнитный воздушный; 7 – генератор импульсов; 8 – напорный грнутопровод длиной L диметром D.

Рис.2 – Расчетная схема

Алгоритм расчета системы аэрации илистых донных отложений выполнен в виде блок-схемы и представлен на рисунке 3.

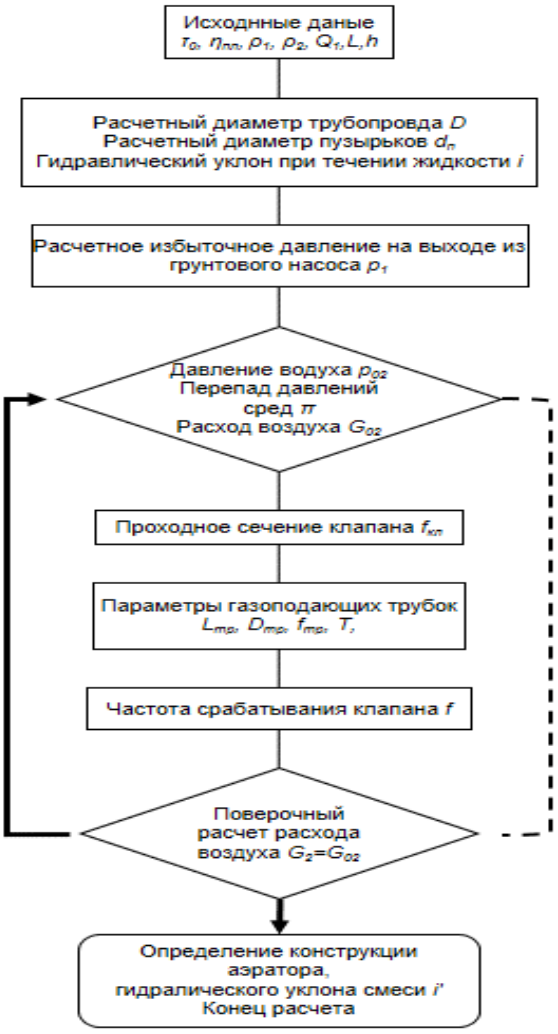


Рис.3 – Блок-схема алгоритма методики расчета

Методика расчета в соответствие с указанной блок схемой должна осуществляться по уравнениям, указанным в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные	
Параметр	Примечание
$\eta_{пл}$	Реологические параметры отложений
τ_0	
ρ_1	плотность илистых донных отложений
ρ_2	плотность воздуха при избыточном давлении p_2=0,2 МПа – первое приближение
Q_1	Расчетная подача грунтового насоса
L	Расчетная длина напорного грунтопровода
T_0	Температура процесса (293,15 К)
Расчетные параметры системы аэрации	
$d_{кр}=\frac{3}{4}\cdot\frac{\pi\cdot\tau_0}{g\cdot(\rho_1-\rho_2)}$	Критический диаметр пузырька газа
$d_п=0,4\ d_{кр}$	Расчетный диаметр пузырька газа

$V_п=\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_п}{2}\right)^3$	Расчетный объем пузырька газа
U_1=1,32..2,26 м/с $D=\frac{Q_1}{U_1}$	Расчетный диаметр грунтопровода при оптимальных параметрах скорости грунта
$Re_0=\frac{\rho_1 U_1 D}{\eta_0}$	Число Рейнольдса при течении по расчетному трубопроводу только илистых донных отложений
$И_0=\frac{\tau_0 D}{\eta_{пл} U_1}$	Число Генки-Ильюшина при течении по расчетному трубопроводу только илистых донных отложений
$Re_{пл}=\frac{Re}{\left(1+\frac{И}{6}\right)\left[\frac{И}{8{,}87\left(1+\frac{И}{6}\right)}\right]^4}$	Число Рейнольдса, для ВПЖ
$i=\frac{64}{Re_{пл}}\frac{1}{D}\frac{\rho_1 U_1^2}{2}$	Гидравлический уклон трубопровода диаметром *D* при течении только илистых донных отложений
$p_1=iL+h\left(\frac{\rho_1}{1000\ \frac{кг}{м^3}}\right)$	Расчетное избыточное давление на выходе из грунтового насоса при гидротранспорте грунта по трубопроводу длиной *L* на расчётную высоту подъема *h* (м вод. ст.)
$dp_{02}=\frac{2\sigma}{0{,}5d_п}$	Разница давления газа в сформировавшемся пузырьке воздуха и в жидкости (σ = 0,073 Па м)
$p_{02}=p_1+dp_{02}$	Давление воздуха расчетное
$\rho_{02}=\frac{\mu p_{02}}{R T_0}$	Плотность воздуха при избыточном давлении p_{02}, (μ – молярная масса воздуха [г/моль]; R=8,3144 – универсальная газовая постоянная, [Дж/(моль К)])

Продолжение таблицы 2

$Q_{02}=0{,}44\ Q_1$	Расчетный расход воздуха
$G_{02}=0{,}44\ Q_1\rho_{02}$	
t	Время работы воздушного клапана, расчетное (*t=0,005*)
$n_0=\frac{Q_{02}t}{V_п}$	Количество пузырьков газа расчетного диаметра за 1 срабатывание клапана
Расчетные параметры газоподающих трубок и аэратора вязкопластичной жидкости	
m_0	Размерный коэффициент расчета газодинамических функций (при 293,15 К – m_0 = 0,0404)
$p_2=p_1+dp_2$	Давление воздуха расчетное
$\rho_{02}=\frac{\mu p_2}{R T_0}$	Плотность воздуха при избыточном давлении p_2
$\pi_\lambda=\frac{p_1}{p_2}$	Относительный перепад давлений сред ($\pi_\lambda > 0{,}565$). На практике 0,65<π_λ<0,85
$q_\lambda = -23{,}58 + 138{,}77\pi_\lambda - 290{,}3\pi_\lambda^2 + 267{,}74\pi_\lambda^3 - 92{,}51\pi_\lambda^4$	Относительный расход газа [1]
$d_{кл}$	Диаметр отверстия в клапане
$f_{кл}=\frac{\pi d_{кл}^2}{4}$	Площадь сечения отверстия в клапане
$G_2=\frac{m_0 p_2 q_\lambda f_{кл}}{\sqrt{T_0}}$	Массовый расход воздуха
$n=n_0\frac{G_2}{G_{02}}$	Требуемое количество отверстий в газоподающих трубках
$D_{тр}$, $L_{тр}$	Параметры газоподающих трубок
$f_{тр}=\frac{2}{3}\pi D_{тр}L_{тр}$	Площадь диспергирующей поверхности газоподающих трубок
N	Количество отверстий на единицу площади поверхности трубки
$T=\frac{n}{N f_{тр}}$	Расчетное количество газоподающих трубок в аэраторе
$F=\frac{Q_2}{V_п n}$	Частота срабатывания газового электромагнитного клапана
$BxB=0{,}5\left(\pi\frac{D^2}{2}+TD_{тр}L_{тр}\right)$	Размеры поперечного сечения корпуса аэратора
Расчетные потери напора	
$i'=\left[(0{,}077\tau_0)^2-0{,}007\tau_0-0{,}5D^2+0{,}7D+U_1^2-0{,}3U_1+0{,}77\right]i$	Расчетный гидравлический уклон при использовании системы аэрации

Согласно приведенной методике расчета при внедрении системы аэрации илистых донных отложений гидравлический уклон земснаряда проекта 258.60СШ и, соответственно, удельные энергетические затраты, снижаются в 4 раза, энергетическая эффективность земснарядов проектов 6000, 44.001 и 44.002 в среднем возрастает в 1,6 раза.

Выводы

1. Полученный метод позволяет выполнить проектный расчет корпуса аэратора вязкопластичных жидкостей, параметров газоподающих трубок и диспергирующих отверстий, выполнить подбор следующего

оборудования: электромагнитного воздушного клапана, генератора импульсов *ГИ,* воздушного компрессора.

2. Оптимизация параметров по величине гидравлического уклона приводит к снижению удельных энергетических затрат на гидротранспорт илистых донных отложений, как вязкопластичных жидкостей. Также в данном методе приведено уравнение, аппроксимирующее значение относительного расхода газа согласно таблицам газодинамических функций $q_\lambda=f(\pi)$, полученное авторами и используемое в автоматизированной системе расчета.

3. Использование расчетных уравнений таблицы 2 и блок-схемы алгоритма расчета системы аэрации позволяет автоматизировать расчет системы аэратора как в виде отдельной подпрограммы различных пакетов, так и в интегрированном виде в системах САПР.

Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика, Ч. I – М.: Наука, 1991 – 600с.
2. Арефьев, Н.Н. Научное обоснование технических решений и разработка на их основе средств повышения эффективности судовых энергетических установок землесосных снарядов: дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н.: 05.08.05/ Николай Николаевич Арефьев; ВГАВТ. – Н. Новгород, 2010. – 389с.
3. Патент РФ № RU 166169 U1, 06.04.2016. Аэратор вязкопластичных жидкостей // Патент России № 2122745. 20.11.2016 Бюл. № 32 / Арефьев Н.Н., Сухарев И.С.
4. Арефьев Н.Н., Сухарев И.С. Расчет радиуса пузырька газа при аэрации вязкопластичных жидкостей // Вестник ВГАВТ /.2014 – №40 – с.241-243
5. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем/ С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович – М.: Энергия, 1976 – 296с.
6. Сухарев И.С. Исследование влияния сферических частиц, распределенных в вязкопластичной жидкости, на предельное напряжение сдвига // Речной транспорт (XXI век) / 2016 – № 3 (79) – С. 49-52.
7. Chhabra R.P. Bubbles, drops and particles in Non-Newtonian fluids/ R.P. Chhabra. – 2nd ed. – USA: CRC Press, 2006. – 771 p.

References

1. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinami-ka, CH. I – M.: Nauka, 1991 – 600s.
2. Aref'yev, N.N. Nauchnoye obosnovaniye tekhniche-skikh resheniy i razrabotka na ikh osnove sredstv povysheniya effektivnosti sudovykh energeti-cheskikh ustanovok zemlesosnykh snaryadov: diss. na soisk. uch. st. d.t.n.: 05.08.05 Nikolay Nikola-evich Aref'yev; VGAVT. – N. Novgorod, 2010. – 389s.
3. Patent RF № RU 166169 U1, 06.04.2016. Aera-tor vyazkoplastichnykh zhidkostey Patent Rossii № 2122745. 20.11.2016 Byul. № 32 Aref'yev N.N., Sukharev I.S.
4. Aref'yev N.N., Sukharev I.S. Raschet radiusa puzyr'ka gaza pri aeratsii vyazkoplastichnykh zhidkostey Vestnik VGAVT 2014 – №40 – s.241-243
5. Kutateladze S.S. Gidrodinamika gazozhid-kostnykh sistem/ S.S. Kutateladze, M.A. Styriko-vich – M.: Energiya, 1976 – 296s.
6. Sukharev I.S. Issledovaniye vliyaniya sferi-cheskikh chastits, raspredelennykh v vyazkoplastich-noy zhidkosti, na predel'noye napryazheniye sdvi-ga Rechnoy transport (XXI vek) 2016 – № 3 (79) – S. 49-52.
7. Chhabra R.P. Bubbles, drops and particles in Non-Newtonian fluids. – 2nd ed. – USA: CRC Press, 2006. – 771 p

УДК 629.12-:502.7

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВКИ ПО СОЗДАНИЮ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА ДЛЯ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Николай Николаевич Арефьев
исследователь, инженер-технолог ООО "Питер софт"
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: Arefyev.Nikolay@gmail.com
Александр Серафимович Курников
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kaftkm@vgavt-nn.ru
Виктор Степанович Наумов
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu@vgavt-nn.ru
Николай Фролович Попов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры эксплуатации судовых энергетических установок
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu@vgavt-nn.ru

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования установки по комплексному снижению вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ). На сегодняшний день существует множество способов снижения токсичности ОГ судовых дизельных двигателей, однако каждый из них способен нейтрализовать лишь вредных 1-2 компонента. В статье предлагается вариант комплексного решения данной проблемы, разработанный на основании анализа существующих методов и возможности их совместного применения с получением синергетического эффекта. Для достижения поставленной цели используется частичная рециркуляция ОГ и контактная жидкостная очистка в циклонно-пенном аппарате (ЦПА). Таким образом, на впуск двигателя подается уже искусственно подготовленный воздушный заряд.

В результате эксперимента были получены данные, подтверждающие расчетные параметры узлов установки, а также значения концентрации основных вредных веществ в ОГ с применением установки и без нее. Применение комплексного метода очистки позволило снизить токсичность ОГ на 64% по CO, на 76% по NO_x и на 74% по SO_2.

Ключевые слова: отработавшие газы, рециркуляция, искусственный воздушный заряд, циклонно-пенный аппарат.

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PLANT FOR CREATING AN ARTIFICIAL AIR CHARGE FOR MARINE ENGINE

Nikolay N. Arefyev
Researcher, engineer-technologist, Peter Soft Ltd.
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: Arefyev.Nikolay@gmail.com
Alexander S. Kurnikov
Dr.Sci.Tech, professor
Professor of the Department of Hoisting-and-Transport machines and machine repair
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kaftkm@vgavt-nn.ru

Victor S. Naumov
Dr.Sci.Tech, professor
Head of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: eseu@vgavt-nn.ru
Nikolay F. Popov
Dr.Sci.Tech, professor
Professor, Department of Operation of Ship Power Plants
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: eseu@vgavt-nn.ru

Abstract

The paper presents the results of an experimental study of a plant for the comprehensive reduction of harmful emissions with exhaust gases. Today, there are many ways to reduce the toxicity of exhaust gases from marine diesel engines, but each of them is able to neutralize only 1-2 harmful components. The article proposes a variant of a comprehensive solution to this problem, developed on the basis of the analysis of existing methods and the possibility of their joint use with obtaining a synergistic effect. To achieve this goal, partial exhaust gas recirculation and contact liquid cleaning in a cyclone-foam apparatus are used. Thus, an artificially prepared air charge is supplied to the engine intake.

As a result of the experiment, data were obtained confirming the design parameters of the plant units, as well as the concentration values of the main harmful substances in the exhaust gas with and without the use of the plant. The application of comprehensive purification method reduced the toxicity of exhaust gases by 64% for CO, by 76% for NO_x and by 74% for SO_2.

Keywords: exhaust gases, recycling, artificial air charge, cyclone-foam apparatus.

Введение

В настоящее время все более остро стоит проблема загрязнения окружающей среды различными техногенными факторами. Один из них – вредные вещества в ОГ двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Во всем мире ограничивают концентрацию таких веществ жесткими нормами: Евро для автотранспорта, Tier и Stage для спецтехники и железнодорожной техники, нормы MARPOL-73/78 для судов. Особенно остро эта проблема затрагивает флот, где дизельные двигатели большой мощности работают в течение длительного периода, поэтому их сложно адаптировать под современные экологические нормы.

1. Цели и задачи исследования

ОГ— рабочее тело, выполнившее работу в цилиндре двигателя [1]. Являются продуктами окисления и неполного сгорания углеводородного топлива. Представляют собой сложную по составу многокомпонентную смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Выбросы ОГ— основная причина превышения допустимых концентраций токсичных веществ и канцерогенов в атмосфере, образования смога, являются частой причиной отравления в замкнутых пространствах. Основной состав ОГ приведен в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1

Состав ОГ дизельных четырехтактных двигателей [3]

Компонент	Концентрация, %
N_2	76…78
O_2	2…8
CO_2	1…10
CO	0,01…0,50
Пары воды	0,5…4,0
NO_x	0,001…0,400
CH	0,01…0,10
Альдегиды	0…0,002

Наиболее опасными для окружающей среды являются следующие компоненты ОГ: сажа, оксиды азота, альдегиды, оксиды углерода и углеводороды.

Оксид углерода CO – образуется в ходе предпламенных реакций при сгорании углеводородного топлива с некоторым недостатком воздуха, а также при диссоциации CO_2 (при температуре более 2 000 К).

Диоксид углерода CO_2 – нетоксичное, но вредное вещество в связи с фиксируемым повышением его концентрации в атмосфере планеты и его влиянием на изменение климата. Основная доля образовавшихся в камере сгорания CO окисляется до CO_2, не выходя за пределы камеры сгорания.

Углеводороды C_xH_y – несколько десятков веществ, образующихся в результате реакций цепочно-теплового взрыва – пиролиза и синтеза, а также из-за неполноты сгорания топлива.

Сажа – твердый углерод, является основным компонентом нерастворимых твердых частиц. Образуется при объемном термическом разложении углеводородов в газовой или паровой фазе при недостатке кислорода.

Сера S, содержащаяся в моторном топливе, во время горения интенсивно окисляется в диоксид серы SO_2 по механизму, сходному с механизмом образования CO. Диоксид серы SO_2 может окисляться до сернистого ангидрида SO_3.

Оксиды азота NO_x представляют собой набор следующих соединений: NO, N_2O, N_2O_3,NO_2, N_2O_4 и N_2O_5. Из них преобладает NO – 90%. Количество оксидов азота в ОГ существенно возрастает с увеличением температуры в цилиндре двигателя.

Для того, чтобы двигатель соответствовал

современным жестким экологическим стандартам, необходимо эффективно удалить и нейтрализовать вредные компоненты ОГ. Этого можно достичь путём оптимизации процессов в двигателе и очистки ОГ на выходе из двигателя. В настоящее время можно разделить методы снижения концентрации вредных веществ в ОГ на внутренние и внешние [4].

Методами внутреннего снижения выбросов являются: использование малотоксичных рабочих процессов; подача воды в цилиндр, водо-топливная эмульсия (ВТЭ); регулирование топливоподачи; использование альтернативных видов топлива; рециркуляция ОГ.

К методам внешнего снижения выбросов относятся: сажевые фильтры; термические реакторы; жидкостные нейтрализаторы; каталитические нейтрализаторы; присадки (антидымные, антисажевые); ультразвуковая коагуляция сажи; очистка жидкостью [5].

На основании проведенного анализа методов очистки ОГ определено, что одним из наиболее перспективных методов является сочетание рециркуляции ОГ и очистки его жидкостью. При этом возврат газов при рециркуляции должен быть значительным (до 30%), а жидкостную очистку целесообразно проводить с помощью ЦПА. Для обеспечения высокой доли рециркуляции необходимо искусственно обогатить возвращаемую часть ОГ кислородом до состава, близкому к атмосферному воздуху. В результате была разработана функциональная схема установки по созданию искусственного воздушного заряда для питания судового двигателя, изображенная на рис. 1.

В предлагаемой установке ОГ от двигателя направляются в ЦПА, где происходит их очистка от механических примесей, охлаждение и увлажнение. Затем 70% газов выбрасывается в атмосферу, а часть (30%) направляется обратно на впуск двигателя, предварительно смешиваясь с обогащенным кислородом воздухом из генератора кислорода.

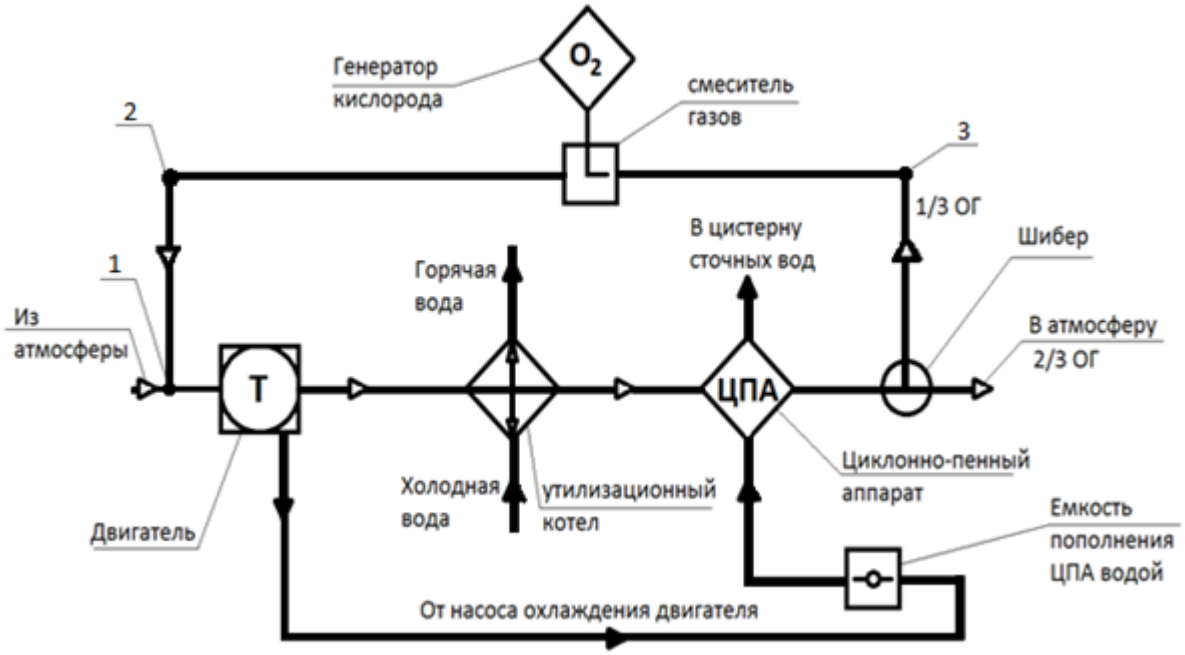


Рис. 1. Функциональная схема установки по созданию искусственного воздушного заряда для питания судового двигателя:
1, 2, 3 – точки замера влажности и температуры смеси газов

Таким образом, в точке 2 концентрация кислорода в ОГ близка к атмосферному воздуху, поэтому на впуск двигателя в точке 3 попадает искусственный воздушный заряд с достаточным количеством кислорода, чтобы не препятствовать горению топлива в цилиндре двигателя и не ухудшать рабочие параметры последнего. Вода из ЦПА по мере наработки меняется, при этом слив из аппарата на судне целесообразно сделать в цистерну сточных вод, т.к. на выходе из аппарата вода имеет высокую кислотность (pH 4-5) [6], что способствует более эффективному дальнейшему обеззараживанию сточных вод. На основании анализа существующих методов получения кислорода и их применимости на судне [7] был разработан адсорбционный генератор кислорода, который для функционирования использует уже имеющиеся судовые системы.

Расчет основных узлов экспериментального стенда проводился с учетом использования дизель-генератора мощностью 3.5 кВт маркировки по ГОСТ 1ЧН7,8х6,2. Так как дизель-генератор

работает на постоянных оборотах и не оснащен турбонаддувом, количество воздуха, подаваемого в цилиндры, постоянно и не зависит от величины нагрузки, следовательно и количество ОГ также можно считать постоянным.

В этом случае расход воздуха дизель-генератора 1ЧН7,8х6,2 будет:

$$Q_{дв} = V \cdot m \cdot n \cdot k \quad (1)$$

где $Q_{дв}$-расход воздуха, потребляемого дизелем, м^3/с

V-объем цилиндра, *м*^{3};

m-число цилиндров.

k-коэффициент наполнения цилиндра

$$V = S \cdot H \quad (2)$$

где S-площадь донышка поршня, м^2;

H-ход поршня, м.

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

где D-диаметр донышка поршня, м.

Число цилиндров дизель-генератора – 1, частота вращения коленчатого вала составляет 3000 мин$^{-1}$, коэффициент наполнения цилиндров для безнаддувного двигателя принимаем 0,8 [6]. Тогда по уравнениям (1-3) получим:

$$S = 4{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$V = 296{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$Q_{дв} = 11{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

После подбора и расчета параметров всех компонентов установки был разработан экспериментальный стенд на базе лаборатории «Металлорежущего оборудования» кафедры «Технологии конструкционных материалов и машиноремонта» Волжского государственного университета водного транспорта.

Для проведения экспериментального исследования необходимо контролировать рабочие параметры установки, такие как: концентрация кислорода на выходе из двигателя, влажность и температура ОГ до и после ЦПА, значения концентраций вредных веществ в ОГ до и после очистки, а также параметры, необходимые для эффективного функционирования узлов установки, таких как генератор кислорода и ЦПА. Для этого экспериментальный стенд оснащен контрольно-измерительными приборами, перечень которых приведен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень контрольно-измерительных приборов

Средства измерения	Тип	Класс точности	Предел измерения
Термогигрометр электронный	ИВТМ-7М	0,2	(-20…60)°С (0…100) %
Измеритель концентрации кислорода	ATE-3012	0,2	(0…100) %
Газоанализатор	DELTA 2000 CD	0,1	
Манометр	МТПС-100-ОМ2	2,5	(0…0,4) МПа
Мановакуумметр	МВПТИ-М1	0,6	(-0,1…+0,15) МПа
Ротаметр с местными показаниями	РМ-I	2,0	(0…0,8)м^3/ч
Ротаметр с местными показаниями	РМ-I	2,0	(0…0,6)м^3/ч
Секундомер	СДС	2,0	(0…1800) с
Весы электронные	AND NP-2000S	1,0	(0...2) кг

В результате эксперимента необходимо получить следующие данные:

- подтвердить рассчитанные параметры ЦПА;
- подтвердить расчетные параметры генератора кислорода при работе в составе установки;
- степени увлажнения ОГ после прохождения ЦПА;
- концентрации кислорода после смешивания ОГ с обогащенным кислородом воздухом (точка 2);
- температуре и влажности воздушного заряда на входе в двигатель;
- снижению основных токсичных соединений в ОГ двигателя: CO, NO, SO_2;
- расходу топлива;
- определить возможность эффективной работы двигателя с рециркуляцией 30% ОГ.

Внешний вид экспериментального стенда представлен на рис. 2.

Эксперимент проводился с номинальной нагрузкой на дизель-генератор и на холостом ходу.

Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда установки по созданию искусственного воздушного заряда для питания судового двигателя.
1-термогигрометр электронный; 2-измеритель концентрации кислорода; 3-генератор кислорода; 4-газоанализатор; 5-компрессор; 6-двигатель; 7-патрубок для замера параметров ОГ; 8-расходная емкость с водой; 9-насос центробежный; 10-манометр; 11-шиберная заслонка; *12-ЦПА.*

В первом случае нагрузка составляла 2,5кВт, что соответствует 71% от максимальной мощности генератора, частота вращения коленчатого вала при этом составляла 3000мин$^{-1}$. При работе на холостом ходу нагрузка не подключалась к генератору, частота вращения коленчатого вала также составляла 3000 мин$^{-1}$ Каждый замер повторялся три раза, затем рассчитывалось среднее значение. Также в ходе эксперимента измерялся расход топлива весовым методом с помощью электронных весов. Результаты эксперимента на номинальной мощности и холостом ходу показали следующее уменьшение токсичности ОГ: по CO на 64%, по NO_x – 76% и по SO_2 – на 74%.

2. Результаты эксперимента

Температура ОГ после прохождения ЦПА (т.3) составила 32°С при номинальной нагрузке и на холостом ходу. Так как для увеличения производительности генератор кислорода оборудован осушителем, относительная влажность обогащенного кислородом воздуха на выходе генератора составляет 0%. При смешивании рециркулируемых ОГ и обогащенного кислородом воздуха относительная влажность смеси газов составила 77% (точка 2). Далее эта часть ОГ смешивается с атмосферным воздухом с температурой 27°С и относительной влажностью 55%. В итоге на впуск двигателя подается искусственный воздушный заряд с температурой 29°С и относительной влажностью 63% (точка 1), что дает дополнительное поступление воды в цилиндр в количестве 168 г/ч. По отношению к расходу топлива количество дополнительной воды составляет 17,4% для номинальной нагрузки и 23,6% для холостого хода. ЦПА охлаждает ОГ до температуры жидкости и увлажняет до 95%. Температура искусственного воздушного заряда на входе в двигатель увеличилась всего на 2°С по сравнению с атмосферным воздухом, влажность возросла с 55% до 63% Концентрация кислорода в точке 2 составила 21% в режиме номинальной нагрузки, что подтверждает правильность расчета генератора кислорода.

Заключение

1. Экспериментально подтверждено, что двигатель может эффективно работать с высокой степенью рециркуляции ОГ (до 30%), что позволяет существенно снизить токсичность выбросов, при этом не снижая своих эксплуатационных характеристик.
2. Расход топлива с применением установки остался без изменений.

3. Получено снижение основных токсичных соединений в ОГ двигателя на 64% по CO, на 76% по NO_x и на 74% по SO_2 за счет рециркуляции и очистки ОГ.

Литература

1. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие // Вестн. Университета им В.И. Вернадского – 2010. –№10-12 – С.31.
2. Гогин А.Ф., Кивалкин А.А., Богланов А.А. Судовые дизели. – М.: Транспорт, 1988 – 432 с.
3. Толшин В.И., Якунчиков В.В. Режимы работы и токсичные выбросы отработавших газов судовых дизелей. – М.:МГАВТ, 1999 – 192 с.
4. Панчишный В.И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей // Двигателестроение– 2005. – №5 – С.35.
5. Климова Е.В. Образование вредных веществ в выбросах судовых дизелей в процессе горения топливовоздушной смеси // Вестн. АГТУ – 2010. – №2.
6. Богатых С.А. Циклонно-пенные аппараты. - Л.: Машиностроение, 1978 – 224с.
7. Курников А.С., Ванцев В.В., Арефьев Н.Н. Применение различных установок генерации кислорода в судовых условиях при создании искусственного воздушного заряда для питания судового дизеля // Вестник ВГУВТ Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015 –Выпуск №42 с.148-151
8. Курников А.С., Арефьев Н.Н. Адсорбционная установка получения кислорода. Патент на изобретение RUS 160225. Дата приобретения 29.10.2015

References

1. Chernetsov D.A. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley i ikh antropogennoe vozdeystvie // Vestn. Universiteta im V.I. Vernadskogo – 2010. –№10-12 – S.31.
2. Gogin A.F., Kivalkin A.A., Boglanov A.A. Sudovye dizeli. – M.: Transport, 1988 – 432 s.
3. Tolshin V.I., Yakunchikov V.V. Rezhimy raboty i toksichnye vybrosy otrabotavshikh gazov sudovykh dizeley. – M.:MGAVT, 1999 – 192 s.
4. Panchishnyy V.I. Neytralizatsiya oksidov azota v otrabotavshikh gazakh dizeley // Dvigatelestroenie– 2005. – №5 – S.35.
5. Klimova E.V. Obrazovanie vrednykh veshchestv v vybrosakh sudovykh dizeley v protsesse goreniya toplivovozdushnoy smesi // Vestn. AGTU – 2010. – №2.
6. Bogatykh S.A. Tsiklonno-pennye apparaty. - L.: Mashinostroenie, 1978 – 224s.
7. Kurnikov A.S., Vantsev V.V., Aref'ev N.N. Primenenie razlichnykh ustanovok generatsii kisloroda v sudovykh usloviyakh pri sozdanii iskusstvennogo vozdushnogo zaryada dlya pitaniya sudovogo dizelya // Vestnik VGUVT Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2015 –Vypusk №42 s.148-151
8. Kurnikov A.S., Aref'ev N.N. Adsorbtsionnaya ustanovka polucheniya kisloroda. Patent na izobretenie RUS 160225. Data priobreteniya 29.10.2015

УДК 504.3.054:621.436:629.5.03

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РАБОТОЙ РЕЧНОГО ФЛОТА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Александр Юрьевич Платов
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики,
Нижегородский архитектурно-строительный университет, 603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 5
e-mail: platoff@mail.ru
Юрий Иванович Платов
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Управления транспортом
Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: platov1@yandex.ru

Аннотация

Известно, что расход топлива в ходу главными двигателями речного судна может составлять более 50% от всех прямых эксплуатационных расходов, а ходовое время – более 50% от продолжительности рейса. Поскольку в основе всего транспортного процесса лежит рейс судна, то метод управления ходовым временем рейса может использоваться как основа для интеграции основных методологий управления работой флота: планированием, регулированием и нормированием в рамках специализированной информационной системы. В этой интегральной методологии одним из варьируемых параметров всегда будет общее время следования судна, для которого будет рассчитываться соответствующий расход топлива в ходу.

Для построения интегральной методологии строится базовая модель движения судна, с помощью которой при заданном ходовом времени можно определить режим движения судна с минимальным расходом топлива.

На основе базовой модели возможно решение задачи нормирования расхода топлива, оперативного регулирования при движении судна в условиях временных ограничений при прохождении каналов и шлюзов, планирования эксплуатационных затрат, планирования потребности во флоте, а также нормирования выбросов CO2.

Ключевые слова: расход топлива речных судов, оптимальная скорость судна, планирование работы флота, интеграция управления работой флота, выбросы CO2, рейсовое планирование, нормирование расхода топлива, автоматизация планирования работы речных судов

INTEGRAL APPROACH TO MANAGEMENT OF RIVER FLEET OPERATION BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES

Alexander Y. Platov
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Applied Informatics and Statistics,
Nizhny Novgorod University of Architecture and Civil Engineering, 603950, N.Novgorod, Ilinskaya, 5
e-mail: platoff@mail.ru
Yuri I. Nechaev
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Transportation Management Department of
Volga State University of Water Transport
603951, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: platov1@yandex.ru

Abstract

It is known that fuel consumption of the main engines, on the run, of a river vessel can be more than 50% of all direct operating costs; and running time - is more than 50% of duration of a voyage. Since the whole transport process is based on the vessel voyage, the method of management of the voyage travel time can be used as a basis for integrating the main fleet management methodologies: planning, control and rationing within a specialized information system. In this integral methodology, one of the variable parameters will always be the total time of vessel's travel, for which the corresponding fuel consumption per run will be calculated.

For building an integrated methodology, a basic model of vessel travel is built, with the help of which, for a given running time, the vessel travel mode with minimal fuel consumption can be defined.

On the basis of the basic model, it is possible to solve the problem of fuel consumption rationing, operational control during vessel travel under the conditions of time constraints when passing channels and locks, planning operating costs, fleet planning, and rationing of CO2 emissions.

Keywords: fuel consumption of riverboats, optimal ship speed, fleet planning, integration of fleet management, CO2 emissions, voyage planning, fuel consumption rationing, automation of riverboat planning

Повышение эффективности работы флота за счёт рационального планирования транспортного процесса – это одна из тех проблем, поиск решения которой проводился на самых различных направлениях. В современных условиях, характеризуемых преобладанием трампового судоходства, а также значительной стоимостью энергоносителей, главным на наш взгляд является направление, посвящённое рациональному управлению ходовой операции грузовых судов.

В основе транспортного процесса лежит рейс судна (состава) на некотором конкретном водном пути. На ходовую операцию приходится более половина всего времени рейса. Более половины всех расходов, связанных с перевозками, составляют расходы на топливо. Однако оптимизации этой операции на практике уделяется очень мало времени.

Ни нормирование расхода топлива, применяемое на практике с середины 60-х годов, ни системы мониторинга движения судов, которые начали распространятся несколько лет назад, не могут предоставить судоходным компаниям средств для планирования или оптимизации работы флота.

Это можно сделать только на основе специального моделирования ходовой операции, в силу своей сложности существенным образом ориентированной на реализацию в составе специализированных информационных систем.

Компьютерная реализация, как известно, позволяет ставить более широкую задачу интеграции ряда функций управления работой флота, причём интеграция данных сегодня уже является обычным делом. Однако наличие единой основы транспортного процесса позволяет предложить в данном случае интеграцию методологий планирования, нормирования и регулирования работы флота на базе оптимизации ходовой операции.

Следует заметить, что для морских перевозок оптимальные скорости судов уже давно являются предметом многочисленных исследований, которые, однако, неприменимы для условий речных перевозок. В отличии от движения морских судов оптимизация речной ходовой операции основана в первую очередь на перераспределении затрат энергии по участкам с разной глубиной, течением и стеснённостью фарватера. Как показано в [1], эффект от подобной оптимизации весьма заметный – расход топлива может быть снижен более чем на 10%.

Многочисленные исследования по оптимизации движения речных судов не привели к практически значимым результатам из-за того, что в таких исследованиях, как правило, оставался за кадром вопрос о вычислении необходимых винтовых и ограничительных характеристик судового пропульсивного комплекса. Здесь следует заметить, что основным необходимым условием для построения практически реализуемой процедуры оптимального движения речного судна является задача определения расхода топлива при установившемся движении судна при заданных условиях плавания.

Обычный способ такого определения – использование статистических норм расхода топлива – непригоден для оптимизации ходовой операции.

В настоящее время в отечественной литературе до сих пор для вычисления расхода топлива употребляется формула, имеющая следующую структуру:

$$F = k g_e N_e t_x \qquad (1)$$

где: k – некоторый коэффициент, с помощью которого учитывают все особенности режима движения судна (скорость, путевые условия и т.д.); g_e – удельный эффективный расход топлива главными двигателями (ГД), кг/(кВт*ч); N_e – мощность ГД, кВт; t_x – ходовое время судна, ч.

Эта формула была введена в теорию эксплуатации в конце 40-х годов и предназначалась для пароходов. Для теплоходов в случае переменной технической скорости формула (1) имеет неадекватное поведение. Эта формула в некоторой мере пригодна только для нормирования расхода топлива при фиксированных нормах времени следования. Но в этом случае она, строго говоря, выражает зависимость расхода топлива не от времени, а от расстояния. Несмотря на очевидные недостатки этого способа расчёта расхода топлива, он до сих пор фигурирует в научной и учебной литературе, например, в [2, 3].

Для морских судов обычно используются аппроксимации, основанные на кубической зависимости суточного расхода топлива $F_{сут}$ от скорости судна [4,5,6,7,8]. Например, в [6,7] для оценки расхода топлива предлагается использовать топливный коэффициент f_c (по аналогии с адмиралтейским):

$$f_c = \frac{\Delta^{2/3}}{F_{сут} v^3},$$

где Δ - водоизмещение судна.

В этом подходе заложено несколько упрощений и самое главное из них – это предложение считать величину эффективного к.п.д. главных двигателей постоянной.

Нетрудно убедиться по [9], что, например, для танкера №1577 снижение скорости с 20 км/ч до 15 км/ч ведёт к увеличению удельного расхода топлива на 23%, что и будет погрешностью кубической формулы на сниженных скоростях.

То же самое можно сказать и о утяжелении винтовой характеристики на мелководье, которая будет изменяться не только из-за роста потребляемой мощности, но и из-за уменьшения эффективного к.п.д.

В зарубежной практике используются также и более примитивные регрессии суточного расхода, которые даже не зависят от скорости судна [10, 11, 12], а зависят от мощности N_e главных двигателей или от дедвейта.

В [13] и [14] предлагаются более совершенные показательные регрессионные модели.

Следует заметить, что регрессии хороши для обоснования перевозок, но уже сомнительны при планировании работы флота и совершенно

неприменимы на уровне рейсового планирования в силу своего статистического характера.

Поэтому главной составляющей методов расчёта расходов должна быть модель пропульсивного комплекса судна, с помощью которой возможен расчёт ограничительных и винтовых характеристик комплекса при заданных условиях плавания для конкретных судов с достаточной степенью точности. Иначе говоря, с помощью такой модели можно определить винтовую характеристику по часовому расходу топлива главными двигателями G при движении с установившимся режимом

$$G = f(v,s,u), \qquad (2)$$

а также ограничительные характеристики по скорости судна:

$v_{\max} = f(s,u)$, $v_{\min} = f(s,u)$,

где v - скорость судна, км/ч, s - совокупность технических параметров судна, u - совокупность условий плавания.

Модель, удовлетворяющая перечисленным условиям, была создана Платовым А.Ю. и Платовым Ю.И. ещё в 1998 г. [15]. Ядром модели являются модель дизельного двигателя, метод расчёта винтовых и ограничительных характеристик, а также метод калибровки модели.

Кроме того, практическое применение данной модели для задач планирования работы флота или регулирования на рейсовом уровне будет сильно ограничено без наличия данных по водным путям и пунктам погрузки-выгрузки. Современные геоинформационные или навигационные системы не предоставляют всей необходимой для таких задач информации. В частности, в этих системах нет данных по течениям, временных характеристик шлюзов, средних температур воды и воздуха (для расчёта расхода топлива на отопление и подогрев нефтепродуктов).

Необходимая база данных, включающая кроме всего прочего параметры судов, условия плавания рек Центрального и Северо-Западного бассейнов, а также морских направлений была создана силами авторов, а также сотрудником ОАО «Волготанкер» Н.Е. Клюкиным. Эти разработки позволили внедрить метод в нескольких судоходных компаниях в составе компьютерных систем нормирования и рейсового планирования [16], которые до сих пор эксплуатируются в нескольких судоходных компаниях.

Только имея такие модель и набор данных, можно рассчитывать не на абстрактно-теоретическое, а на конкретно-практическое моделирование ключевых элементов транспортного процесса.

Следующая необходимая часть интегральной методологии – это метод определения оптимального режима движения судна при заданном ходовом времени.

Естественно выбирать такой режим, при котором расход топлива будет минимальным. Минимальное значение расхода будет служить некоторым критерием, оценкой фактических результатов рейса.

Модель минимизации расхода топлива судна при заданном ходовом времени имеет вид:

$$F = \sum_{k=1}^{N} F_k \to \min, \quad (3)$$

$$t_k^{\min} \le t_k \le t_k^{\max} \text{ и } \sum_{k=1}^{N} t_k = t_x,$$

где k - номер участка водного пути, N - число участков, на которые разделён водный путь; F_k - расход топлива на k-ом участке, кг; $t_k^{\max}$, $t_k^{\min}$, t_k - максимальное, минимальное и оптимальное ходовое время на k-ом участке соответственно, час; t_x - общее ходовое время, час.

В данной модели исходный водный путь разделён на участки со средними постоянными условиями плавания. Считаем движение на каждом участке установившимся и пренебрегаем переходными процессами, что, как показано в [15], не приводит к заметным погрешностям.

Эта задача формулировалась и решалась неоднократно. Отличия в этих решениях заключались в форме функций F_k. Например, в [17] использовалась кубическая зависимость, в [18] – полином четвёртой степени.

Однако вопрос об определении коэффициентов аппроксимаций F_k в этих работах оставался «за кадром». Кроме того, течения и ограничения $t_k^{\max}$, $t_k^{\min}$ в работе не учитывались.

В [15] доказано, что применение кубической зависимости позволяет определить с высокой точности оптимальное ходовое время на каждом участке, хотя, как уже говорилось, не позволяет вычислить расход топлива. Поэтому задача оптимизации разбивается на две. Сначала определяется оптимальное время движения, а затем по данному времени с помощью модели СПК вычисляется расход топлива.

Для этого с помощью модели СПК на первом этапе для каждого участка вычисляется часовой расход топлива при максимальной скорости (на ограничительной характеристике) (кг/ч):

$$G_k = F_k^{\max} / t_k^{\min}.$$

Величины G_k по сути являются максимальными значениями часового расхода на каждом участке.

Тогда аппроксимация кубической параболой для функции расхода топлива будет иметь вид:

$$F_k = G_k \left(\frac{t_k^{\min}}{t_k} \right)^3 t_k.$$

даёт возможность

В этой формулировке задачу можно решить методом Лагранжа. При решении получаются три набора участков $\{i\}$, $\{n\}$, $\{m\}$, для которых время движения будут выражаться следующими формулами:

$$t_n = t_n^{\min}, \; t_m = t_m^{\max},$$

$$t_i = \left(t_x - \sum_{\{m\}} t_m^{\max} - \sum_{\{n\}} t_n^{\min} \right) \frac{t_i^{\min} \sqrt[3]{G_i}}{\sum_i t_i^{\min} \sqrt[3]{G_i}}.$$

Конкретный набор индексов $\{i\}$, $\{n\}$, $\{m\}$ можно определяется с помощью простого переборного алгоритма, который здесь не описывается.

После определения t_k с помощью модели СПК вычисляется расход топлива.

Можно заметить, что при слишком малом значении t_x будут вычислены минимальное общее время движения $t^{\min} = \sum_k t_k^{\min}$ и соответствующий расход топлива.

Рассмотренную модель мы называем *базовой*, поскольку она лежит в основе всех прочих методов и моделей.

Первое очевидное применение базовой модели состоит в нормировании расхода топлива, как она в основном и используется в эксплуатируемых системах нормирования.

При этом общее время движения берётся из статистики или плановых навигационных расчётов.

Второе применение базовой модели – это планирование рейсовых или совокупных эксплуатационных расходов.

В настоящее время эксплуатационные расходы на рейс в некоторых крупных судоходных компаниях планируются по выражению:

$$C = (t_x c_x + t_{ст} c_{ст}) m_{кр};$$

где C – эксплуатационные расходы за плановое число круговых рейсов, руб.; t_x, $t_{ст}$ – соответственно, продолжительность ходового и стояночного времени в составе кругового рейса, сут.; c_x, $c_{ст}$ – соответственно, среднесуточные расходы судна в ходу и на стоянке, руб./сут.; $m_{кр}$ - число круговых рейсов.

Среднесуточные расходы определяются на основе статистических или плановых данных путем деления годовых эксплуатационных расходов на средний период работы судов.

Эта формула существует так же с 40-х годов прошлого века и не даёт ни гарантий достоверности планирования расходов, ни каких-либо данных для оптимизации перевозок.

Рациональный подход к исчислению рейсовых расходов исходит из следующей их структуры:

$$C = (c_1 F + c_3) m_{кр} + c_2 T \quad (6)$$

где c_1 - цена топлива, руб./кг; c_2 - удельные текущие расходы, руб./час; c_3 - плата за прохождение водных путей, портовые сборы и т.д., руб.; T - период планирования (работы судов).

Для случая танкерного флота в c_3 должны быть добавлены расходы на подогрев вязких нефтепродуктов, вычисление которых также является нетривиальной, но решённой и уже внедрённой задачей.

Поскольку расход топлива считается с помощью оптимизационной модели, постольку формула (4) представляет идеальные расходы, которые можно использовать для оценки качества управления.

Третье применение базовой модели можно видеть в бизнес-планировании работы флота.

При таком планировании, кроме планирования эксплуатационных расходов определяется ещё потребность во флоте, которая обычно вычисляется по выражению:

$$Ф = ч t_{кр}(1 + k_{рез}),$$

где $Ф$ – потребность во флоте для отдельного участка работы, ед. судов; $ч$ – частота отправления судов, ед. в сут.; $t_{кр} = t_x + t_{ст}$ – продолжительность кругового рейса судна (состава), сут.; $k_{рез}$ – коэффициент резерва (накладного) времени в размере 5-7%;

При использовании этого способа, как правило, время кругового рейса берётся из постоянных норм времени следования или из статистики.

Очевидно, что такой способ вычислений также не предоставляет возможностей для повышения эффективности.

На основе базовой модели можно определять потребность во флоте следующим образом. Время кругового рейса определяется из задачи максимизации тайм-чартерного эквивалента:

$$\frac{Qf - c_1 F - c_3}{t_{кр} + \Delta t} \to \max,$$

где Δt - сумма резервного времени по каждой операции, час; Q - эксплуатационная загрузка судна, т; f - фрахтовая ставка, руб./т.

После чего потребность во флоте вычисляется по выражению

$$Ф = \frac{G_{гр}}{Q} \frac{(t_{кр} + \Delta t)}{t_{от}}$$

где $G_{гр}$ - объём перевозок, т; $t_{от}$ - период отправления груза, час.

При избытке флота можно время кругового рейса можно определять из условия минимального расхода топлива.

Четвёртое применение базовая модель может найти в сфере автоматизации регулирования работы флота. Практически востребованной в этой сфере является задача регулирования рейса судна в условиях временных ограничений по проводке судов через шлюзы или каналы. Модель, решающая эту задачу, была предложена в [19].

Пятое применение базовая модель может найти для нормирования выбросов CO2. Как известно, в соответствии с требованиями МАРПОЛ для действующих судов в рамках мероприятий судового плана управления энергоэффективности судна (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) требуется мониторинг и минимизация показателя EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator), который вычисляется для каждого рейса судна по выражению [20]:

$$EEOI = \frac{F c_f}{QL},$$

где c_f - коэффициент выброса CO2, L - протяжённость рейса [миль].

Мы полагаем, что в условиях речных перевозок этот показатель неприменим в силу невозможности определить его нормативное значение.

Действительно, во-первых, из-за переменных глубин и течений на реке показатель EEOI будет на

разных участках реки различным. Причём эта разница будет существенно зависеть от соотношения осадки и глубины судна, а также от его скорости. Движение вниз по течению будет отличаться от движения вверх. Кроме того, сезонные изменения глубин и течений на реках также будут отражаться на значении показателя.

Во-вторых, традиционно используемая на транспорте величина грузооборота *QL* не имеет никакого физического смысла, что порождает другую проблему: при одном и том же значении *QL* для одного и того же судна при разных скоростях показатель EEOI будет различен. Более того, этот показатель будет различен на реке даже при одинаковой средней скорости судна. Максимальное относительное изменение EEOI для судов грузоподъёмностью в 5000 т на реке Волга можно теоретически оценить в 30%.

Для нормирования выбросов CO2 был предложен другой критерий, которые не зависит ни от общего ходового времени, ни от участка работы судна и при этом обеспечивает минимальное топливопотребление [21]. Этот критерий строится на базе значения минимального среднего удельного расхода топлива g_e, который определяется по выражению:

$$g_e = \frac{G}{N_e} = \frac{F}{A},$$

где N_e - эффективная мощность на валу главных двигателей, кВт; A - работа главных двигателей на валу, кВт*ч.

Таким образом, имеющаяся в настоящее время методология позволяет реализовать принципиально новый способ планирования, регулирования и нормирования работы флота, способствующий повышению эффективности водного транспорта и полностью соответствующий тенденциям цифровой экономики.

Литература

1. Платов А.Ю., Платов Ю.И. О современных методах бизнес-планирования работы речного флота. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, 2018. – № 54. – С. 110-116.
2. Веселов, В.Г. Совершенствование методов планирования расходов на энергоресурсы в судоходных компаниях / В.Г. Веселов, В.И. Минеев // Вестник / ВГАВТ. - Нижний Новгород, 2007. - Вып. 21. - С. 133-137.
3. Злобин Д.С. Совершенствование методов обоснования эксплуатационно-технических параметров судов «река-море» плавания: Дис. канд. техн. наук: 05.22.19. – Н. Новгород, 2013. – 151 с.
4. Alderton P.M. The Optimum Speed of Ships. Journal of Navigation, 34 (3), 1981, pp. 341-355.
5. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. Journal of the Operational Research Society, 33 (11), 1982, pp. 1035–1040.
6. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004.
7. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
8. Górski W., Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z. The influence of ship operational parameters on fuel consumption.Scientific Journals.Maritime University of Szczecin, 36(108), 2013. pp. 49-54.
9. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. - М.: Транспорт, 1980. 424 с.
10. Economic Guidance memorandum 05-06 FY 2004 Shallow Draft Vessel Operating Costs. U.S. Army Corps of Engineers, 2004. P. 16.
11. Gentle, N.F. An Estimate of Operating Costs for Bulk, Ro-Ro and Container Ships / N.F. Gentle, R.J. Perkins, R.J. // Bureau of Transport Economics, Canberra. 1982.
12. Pocuca, M. Methodology of Day-to-Day Ship Costs Assessment / M. Pocuca // Traffic&Transportation. Vol. 18, 2006, No. 5, pp. 337-345.
13. Kowalski, A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions / A. Kowalski // Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2013, 36(108) z. 1 pp. 94–99.
14. Shrady, D.A. Predicting Ship Fuel Consumptions / D.A. Shrady, G.K. Smith, R.B. Vassian // Naval Postgraduate School, 1996. P. 70.
15. Платов, А.Ю. Методология оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях: дис. док. техн. наук: 05.22.19 / А.Ю. Платов. - Н.Новгород, 2010. - 314 с.
16. Малышкин А.Г., Платов А.Ю., Платов Ю.И., Смирнов С.Г.Система автоматизированного расчёта норм времени следования и расхода топлива. // Наука и техника на речном транспорте. ЦБНТИ МТ РФ. 2003. Спец. вып. С. 80-84.
17. Перевезенцев С.В. Моделирование динамики и разработка микропроцессорных систем управления режимами работы главных дизелей водоизмещающих судов: дис. канд. техн. наук: 05.13.07. - Н.Новгород, Горький, 1997. - 183 с.
18. Кулибанов Ю.М., Малый П.А., Сахаров В.В Экономичные режимы работы судовых энергетических установок. М.: «Транспорт», 1987. - 205с.
19. Корьев В.Ю. Непрерывное регулирование работы танкеров смешанного река-море плавания: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Н.Новгород: ВГУВТ, 2017.
20. Rules and Guidelines. VI Additional Rules and Guidelines. Part 13. Energy Efficiency. Germanischer Lloyd SE, Hamburg, 2013.
21. Платов, А.Ю. О целесообразности использования на речном транспорте отраслевой методики нормирования энергоэффективности / А.Ю. Платов, Ю.И. Платов, В.Н. Молькин // Речной транспорт (XXI век). 2015. № 5 (76). С. 47-50.

References

1. Platov A.YU., Platov YU.I. O sovremennyh metodah biznes-planirovaniya raboty rechnogo flota. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta, 2018. – № 54. – S. 110-116.
2. Veselov V.G. Mineev V.I. Sovershenstvovanie metodov planirovaniya raskhodov na ehnergoresursy v sudohodnyh kompaniyah. Vestnik VGAVT. - Nizhnij Novgorod, 2007. - Vyp. 21. - S. 133-137.
3. Zlobin D.S. Sovershenstvovanie metodov obosnovaniya ehkspluatacionno-tekhnicheskih parametrov sudov «reka-more» plavaniya: Dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19. – N. Novgorod, 2013. – 151 s.
4. Alderton P.M. The Optimum Speed of Ships. Journal of Navigation, 34 (3), 1981, pp. 341-355.
5. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. Journal of the Operational Research Society, 33 (11), 1982, pp. 1035–1040.
6. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004.
7. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
8. Górski W., Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z. The influence of ship operational parameters on fuel consumption.Scientific Journals.Maritime University of Szczecin, 36(108), 2013. pp. 49-54.
9. Rukovodstvo po teplotekhnicheskomu kontrolyu serijnyh teplohodov. - M.: Transport, 1980. 424 s.
10. Economic Guidance memorandum 05-06 FY 2004 Shallow Draft Vessel Operating Costs. U.S. Army Corps of Engineers, 2004. P. 16.
11. Gentle, N.F. An Estimate of Operating Costs for Bulk, Ro-Ro and Container Ships. Bureau of Transport Economics, Canberra. 1982.
12. Pocuca M. Methodology of Day-to-Day Ship Costs Assessment. Traffic&Transportation. Vol. 18, 2006, No. 5, pp. 337-345.
13. Kowalski, A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship’s sulfur and nitrogen oxides emissions. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 2013, 36(108) z. 1 pp. 94–99.
14. Shrady D.A., Smith G.K., Vassian R.B. Predicting Ship Fuel Consumptions. Naval Postgraduate School, 1996. P. 70.
15. Platov, A.YU. Metodologiya operativnogo planirovaniya raboty rechnogo gruzovogo flota v sovremennyh usloviyah: dis. dok. tekhn. nauk: 05.22.19 / A.YU. Platov. - N.Novgorod, 2010. - 314 s.
16. Malyshkin A.G., Platov A.YU., Platov YU.I., Smirnov S.G.Sistema avtomatizirovannogo raschyota norm vremeni sledovaniya i raskhoda topliva. Nauka i tekhnika na rechnom transporte. CBNTI MT RF. 2003. Spec. vyp. S. 80-84.
17. Perevezencev S.V. Modelirovanie dinamiki i razrabotka mikroprocessornyh sistem upravleniya rezhimami raboty glavnyh dizelej vodoizmeshchayushchih sudov: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.07. - N.Novgorod, Gor'kij, 1997. - 183 s.
18. Kulibanov YU.M., Malyj P.A., Saharov V.V EHkonomichnye rezhimy raboty sudovyh ehnergeticheskih ustanovok. M.: «Transport», 1987. - 205s.
19. Kor'ev V.YU. Nepreryvnoe regulirovanie raboty tankerov smeshannogo reka-more plavaniya: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – N.Novgorod: VGUVT, 2017.
20. Rules and Guidelines. VI Additional Rules and Guidelines. Part 13. Energy Efficiency. Germanischer Lloyd SE, Hamburg, 2013.
21. Platov, A.YU. O celesoobraznosti ispol'zovaniya na rechnom transporte otraslevoj metodiki normirovaniya ehnergoehffektivnosti. Rechnoj transport (XXI vek). 2015. № 5 (76). S. 47-50.

УДК 504.3.054:621.436:629.5.03

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕЙСОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И НОРМИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ CO2 РЕЧНЫХ ГРУЗОВЫХ СУДОВ

Александр Юрьевич Платов
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой прикладной информатики и статистики,
Нижегородский архитектурно-строительный университет,
603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65
e-mail: platoff@mail.ru
Юрий Иванович Платов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Управления транспортом
Волжский государственный университет водного транспорта,
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: platov1@yandex.ru
Александр Георгиевич Малышкин
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Управления транспортом
Волжский государственный университет водного транспорта,
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru
Александр Владимирович Иванов
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры ЮНЕСКО,
Нижегородский архитектурно-строительный университет,
603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65
e-mail: alexanderivanov52@gmail.com

Аннотация

Серьезной проблемой практического применения наиболее распространённых моделей судовых дизелей, основанных на ОДУ, является необходимость использования ряда эмпирических параметров, которые проблематично установить в обычных условиях эксплуатации судовых дизелей.

Важными требованиями к практически применимым моделям судовых дизелей являются, во-первых, необходимость в минимальном наборе данных по двигателю и, во-вторых, калибровка моделей для достижения требуемой точности расчёта расхода топлива.

Авторами приведена классификация моделей работы ДВС. Показано, что для задач рейсового планирования, нормирования расхода топлива практически применимыми оказываются лишь простейшие модели рабочих процессов, основанные на нелинейных уравнениях или же формальные аппроксимации. В качестве примера такой практически применимой модели приводится описание простого алгоритма моделирования судового дизеля, основанного на использовании идеального цикла Тринклера. Приводятся примеры расчёта винтовой характеристики.

Описанная модель может использоваться в ПО для рейсового нормирования для малых судовых компаний, так как в силу простоты реализуется с помощью языка программирования в электронных таблицах.

Ключевые слова: судовые дизели, модели рабочих процессов дизеля, типы моделей ДВС, расход топлива главными двигателями, выбросы CO2, рейсовое планирование, нормирование расхода топлива, планирование работы флота, автоматизация планирования работы речных судов

MARINE DIESEL MODELING FOR THE PROBLEMS OF VOYAGE PLANNING AND CO2 EMISSIONS REGULATIONS FOR RIVER CARGO SHIPS

Alexander J. Platov
Dr.Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Applied Informatics and Statistics Department,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Ilyinskaya st., 65, 603950, Nizhny Novgorod
e-mail: platoff@mail.ru
Juri I. Platov
Dr.Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Transport Management

Volga State University of Water Transport,
Nesterova st., 5, 603951, Nizhny Novgorod,
e-mail: platov1@yandex.ru
Alexander G. Malyshkin
Professor, Dr.Sci.Tech
Chief Researcher,
Volga State University of Water Transport,
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru
Alexander V. Ivanov
Cand. Sci. Economics, associate professor of UNESCO Chair,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Ilyinskaya st., 65, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation,
e-mail: alexanderivanov52@gmail.com

Abstract

The important difficulty of practical application of the most common engine models based on the ordinary differential equations was the need to use a number of empirical parameters, which were problematic to define under normal operating conditions for marine diesel engines.

Important requirement for practically applicable models of marine diesel engines was, firstly, the need for a minimization of data set on the engine parameters and, secondly, the calibration of models to achieve the required accuracy in fuel consumption calculating.

The classification of the internal combustion engine models was designed. It was shown that only the simplest models of operational processes based on nonlinear equations or formal approximations are practically applicable for voyage planning and regulations of fuel consumption.

As an example, a simple algorithm for modeling a river diesel engine was presented based on the use of the ideal Trinkler cycle. The relevant calculations of the propeller characteristic enclosed.

The proposed model can be used in software for voyage regulations by small river ship companies, because, due to its simplicity, the model would be designed using programming languages in spreadsheets.

Keywords: marine diesels, models of diesel working processes, types of ICE models, fuel consumption of marine engines, CO2 emissions, voyage planning, fuel consumption regulations, fleet planning, manage business systems for river fleet planning

Одним из путей повышения эффективности работы речного флота является оптимизация ходовой операции за счёт управления скоростью судов. В отличие от движения морских судов такая оптимизация основана в первую очередь на перераспределении затрат энергии по участкам с разной глубиной, течением и стеснённостью фарватера. Как показано в [1], эффект от подобной оптимизации весьма заметный – расход топлива может быть снижен более чем на 10%.

Другая проблема состоит, как это показано в [2], в непригодности рекомендаций Международной морской организации [3] для нормирования выбросов CO2 в атмосферу.

Все эти задачи могут быть реализованы в рамках автоматизации рейсового планирования. Для такой автоматизации необходимо располагать методом вычисления часового расхода топлива главными двигателями при движении судна с разной скоростью и при разных условиях плавания. Такой метод в свою очередь требует построения математической модели системы корпус-двигатели-движители, одним из важнейших элементов которой является математическая модель судового дизеля (СД).

Моделирование работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) вообще и СД в частности является предметом исследований многих учёных уже более ста лет. Однако разработка моделей СД, специально предназначенных для оперативных или плановых расчётов расхода топлива судовых двигателей, не пользовалась особым вниманием. В зарубежной практике проблема расчёта расхода топлива для судов решается посредством кубической аппроксимации [4, 5, 6], которая для речных условий плавания будет иметь большую погрешность.

Проблема построения модели СД, ориентированной для рейсового планирования, возникла в 1996 г., когда по заказу ОАО «Волготанкер» Платовым А.Ю. и Платовым Ю.И. в ВГУВТ были начаты работы по созданию программного комплекса для нормирования расхода топлива главными двигателями нефтеналивных судов и составов. В результате было разработано несколько моделей, логика построения которых излагается ниже.

Существуют различные подходы к классификации математических моделей ДВС.

Например, в наиболее полном обзоре [7] предлагается деление моделей ДВС на аналитические и эмпирические. В продолжение этой классификации в работе [8] аналитические модели в порядке убывания сложности делятся на следующие три вида: модели на основе динамики сплошной среды, модели «угла поворота кривошипа» и модели «средних величин».

Эмпирические модели в [7] делятся на интерполяции номограмм СД, полиномиальные аппроксимации статистических данных и нейросетевые аппроксимации.

Следует заметить, что в иностранных обзорах не представлены модели типа Гриневецкого-Мазинга. Рассматривая последние согласно терминологии [9], можно также различать модели СД на основе идеального, теоретического действительного циклов двигателя. В первом типе рабочее тело – идеальный газ, во втором –

реальный, а в третьем – реальный газ с теплообменом с внешней средой.

Хотя представленное перечисление видов моделей СД полное, можно предложить иной, формально-математический принцип разделения, который будет более удобным для установления соответствия модели СД решению «топливных» задач. Согласно такому принципу аналитические модели СД можно разделить на

- модели с уравнениями в частных производных (модели СД-I);
- модели с обыкновенными дифференциальными уравнениями (модели СД-II);
- модели с нелинейными трансцендентными или алгебраическими уравнениями (модели СД-III).

В моделях СД-I на основе уравнений неразрывности, сохранения энергии и массы детально описывается поведение смеси в пространстве цилиндра. Такие модели появились в 80-х годах и используются в задачах проектирования двигателей.

Совершенно ясно, что модели СД-I по уровню абстракции не соответствуют задачам рейсового планирования. Кроме того, время расчёта таких моделей неприемлемо при оперативных вычислениях.

Модели СД-II, которым посвящена подавляющая часть литературы по моделированию СД, разрабатываются с начала 50-х годов. Эти модели основаны на обыкновенных дифференциальных уравнениях, выражающих первый закон термодинамики, уравнения состояния и массового баланса, а также на эмпирических соотношениях, например, задержки воспламенения, скорости сгорания топлива или передачи тепла и т.д.

Применение описанных в литературе моделей СД-I для решения задач рейсового планирования или нормирования ограничивается рядом следующих обстоятельств.

Во-первых, без специальной калибровки модели СД любого типа будут иметь неприемлемую погрешность по величинам часового расхода топлива. Такая калибровка обычно не предусматривается при разработке модели СД, что, собственно, и является признаком того, что модель предназначена не для «топливных» задач.

Во-вторых, практическое применение моделей СД в реальных задачах рейсового планирования предполагает массовые расчёты для двигателей разных типов и поколений. Между тем известные в литературе числовые параметры эмпирических зависимостей, закладываемых в модели СД, справедливы лишь для некоторого ограниченного круга СД и неприменимы за пределами этого круга. Типичный пример – это методы расчёта давления механических потерь.

В-третьих, все описанные в литературе модели СД-II оперируют такими параметрами СД, которые в практических условиях по разным причинам определить либо затруднительно, либо нереально по организационным или экономическим соображениям. К таким параметрам можно отнести, например, параметры топливной аппаратуры (диаметр плунжера, давление затяжки пружины гидрозапора), параметры сгорания (углы ПКВ начала и конца горения), характеристики турбокомпрессора. Необходимость аппроксимации характеристик компрессора также существенно усложняет практическое применение моделей СД.

Вопросы, которые обычно ставятся разработчиками моделей СД-II, как правило, лежат в сфере оптимизации конструкции ДВС, исследований по токсичности отработавших газов, повышению экономичности ДВС и т.д. Характер вопросов определяет и уровень абстракции моделей СД, который не соответствует задачам рейсового планирования. Для задач уровня рейсового планирования детальное моделирование, например, топливной аппаратуры или процесса наполнения представляется излишним. Модели СД-I, как правило, ориентированы на получение адекватных относительных количественных результатов. Абсолютные количественные результаты могут не быть решающей целью при оптимизации конструкции СД или при каких-то прикладных исследованиях. Напротив, при рейсовом планировании от модели СД требуются именно абсолютные числовые значения расхода топлива, мощности и частоты вращения вала СД.

Примером такой, непригодной по описанным причинам для рейсовых задач модели СД-II является модель, описанная в [10], хотя по замыслу авторов эта модель предназначена в том числе и для рекомендаций для повышения экономичности судовых энергетических установок в условиях мелководья.

Очевидными основаниями для использования моделей СД-II может быть только необходимость моделирования нестационарных процессов или описания термохимии процессов для расчёта, например, выбросов NOx.

Как показано в [11], влияние переходных процессов в обычных рейсах речных грузовых судов невелика, и потому при определении расхода топлива и скорости судна этим влиянием можно пренебречь. По нашим оценкам влияние, например, циркуляции на расход топлива в типичных рейсах судов ограничивается 1-2%.

В отличие от аналитических моделей эмпирические модели при наличии достаточного количества статистических данных по работе СД могут быть весьма точными. В литературе имеются эмпирические модели, специально предназначенные для «топливных» расчётов, например [12, 13, 14]. Однако очевидным недостатком таких моделей является необходимость оперировать значительным количеством данных по СД. Например, для построения модели в [14] только для одного судна статистические данные по работе СД на разных режимах собираются в течение навигации и, очевидно, что не все необходимые режимы могут быть затронуты в ходе обычной работы судна. Кроме того, реализация мероприятий по сбору измерений (установка датчиков, дополнительные обязанности механика судна и т.д.) требуют усилий и расходов, которые, по нашему мнению, не всегда могут себе позволить даже относительно крупные судовые компании.

Аппроксимация номограмм СД в этом плане представляется более перспективной, однако в

реальном применении таких моделей обязательно возникнут проблемы по получению номограмм для многих СД. В базе данных по судовым дизелям, которая эксплуатируется в настоящее время в Волжском речном пароходстве, имеется более ста двигателей разного поколения. Аппроксимация номограмм даже для ключевых СД может оказаться непростым делом.

Ориентация на реальное практическое применение моделей СД в рейсовом планировании предполагает разработку и использование моделей, не требующих данных о СД сверх его паспортных и в то же время обладающих достаточной точностью.

Перспективным путём для построения практически применимых моделей оказалось использование моделей СД-III. В период с 1996 г. по 2002 г. был создан ряд компьютерных систем планирования работы флота и судов для судоходных компаний «Волготанкер», «Волжское пароходство» и некоторых других, предназначенных в том числе для оптимизации и нормирования расхода топлива главными двигателями [15]. Некоторые системы до сих пор находятся в эксплуатации. Для этих компьютерных систем были разработаны две модели СД-III [1, 16]: на основе метода Гриневецкого-Мазинга (МГМ) и на основе аппроксимации индикаторного к.п.д. (МАИК) по формуле Д.А. Портнова [17].

Основой этих моделей является алгоритм для вычисления функции эффективной мощности $N_e = f(n,G)$, зависящей от заданных частоты вращения вала СД n и часового расхода топлива G. Решая обратную задачу, можно при заданных n и N_e, вычислить часовой расход топлива.

Результаты работы алгоритма зависят не только от паспортных значений параметров СД, но и от специальных калибровочных коэффициентов (параметров аппроксимации), с помощью которых алгоритм настраивается на определённый двигатель. Таким образом, в самом алгоритме заложена качественно правильная «физика» явлений, а калибровка модели обеспечивает верные количественные результаты.

Используя описанный принцип, можно построить и другие модели, которые отличаются способом построения алгоритма $N_e = f(n,G)$. Далее будет изложена новая простая модель СД-III, в которой алгоритм $N_e = f(n,G)$ основан на идеальном цикле Тринклера (МИЦТ). Эта модель значительно проще, чем модель, основанная на методе Гриневецкого-Мазинга, но содержит более подробную «физику», чем МАИК.

Исходными данными для моделирования СД являются:

- $N_{ен}$, $n_н$ $G_н$ - номинальные мощность двигателя, кВт; частота вращения вала, 1/с; часовой расход топлива, кг/ч соответственно;

- $N_{ем}$, $n_м$, $G_м$ - «минимальные» (т.е. в точке стендовой винтовой или нагрузочной характеристики при $n_м < n_н$ и/или $N_{ем} < N_{ен}$) мощность двигателя, частота вращения вала и массовый часовой расход топлива соответственно;

- D, S, $z_ц$ – диаметр цилиндра, м; ход поршня, м; число цилиндров соответственно;

- ε, tk, p_k - степень сжатия, тактность и степень повышения давления в компрессоре;

- p_0, T_0 - давление (кПа) и температура (К) окружающей среды соответственно;

- n, N_e - заданные частота вращения и эффективная мощность соответственно.

Алгоритм $N_e = f(n,G)$ выполняется следующим образом.

1. Вычисляется температура воздуха после компрессора:

$$T_k = T_0\left(\frac{p_k}{p_o}\right)^{\frac{m-1}{m}},$$

где m - политропа сжатия, которая принимается равной 1,6.

2. Вычисляются давление и температура в конце наполнения:

$$p_a = 0{,}95\,p_k;\ T_a = \frac{T_k + \Delta T + \gamma_r T_r}{1+\gamma_r};$$

где $\Delta T = 10 \div 20$ - приращение температуры свежего заряда при подогреве от стенок цилиндра, К, γ_r - коэффициент остаточных газов, T_r - температура выпускных газов, К. Для всех СД γ_r принимается равной 0,04, а T_r - 600К.

3. Вычисляется количество рабочей смеси (кмоль):

$$M_a = \frac{p_a V_a}{R T_a},$$

где $R = 8{,}315$ кДж/(кмоль*К), $V_a = V_s \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$ объём смеси в начале сжатия, $V_s = \frac{\pi}{4} D^2 S$ - рабочий объём СД.

4. Вычисляются давление и температура конца сжатия:

$$p_c = p_a \varepsilon^k;\ T_c = T_a \varepsilon^{k-1},$$

где k - показатель адиабаты (принимается равным 1,4).

5. Вычисляется степень повышения давления при сгорании по формуле А.И.Толстова [18]:

$$\lambda = a + b\tau,$$

где задержка воспламенения τ вычисляется по формуле Семёнова [19], с:

$$\tau = \frac{0{,}4413}{(c_m p_c)^{0{,}635} T_c^{\,0{,}294}},$$

где $c_m = 2Sn$ - средняя скорость поршня, м/с. При расчётах принято принято $a = 1{,}18$ $b = 180$.

5. Давление и температура в конце подвода теплоты при $V = const$ определяются из уравнений:

$$p_y = \lambda p_c \quad T_y = \lambda T_c,$$

а при подводе теплоты при $p = const$ - из уравнений:

$$p_z = p_y \; ; \; T_z = T_y + \frac{1}{c_p}\left(\frac{Q_1}{M_a} - c_v\left(T_y - T_c\right)\right),$$

где $c_p = \frac{k}{k-1}R$ и $c_v = \frac{R}{k-1}$ - теплоёмкости, $Q_1 = H_u g_ц$ - количество подведённой теплоты, $g_ц = \frac{G}{3600\, n z_ц i}$ - цикловая подача, i - коэффициент тактности (=1 для двухтактных и 0,5 – для четырёхтактных СД).

6. Вычисляются давление и температура конца расширения:

$$p_b = p_z / \delta^k \; ; \; T_b = T_z / \delta^{k-1},$$

где $\delta = \varepsilon / \rho$ - степень последующего расширения, $\rho = T_z / \left(\lambda T_c\right)$ - степень предварительного расширения.

7. Вычисляется термодинамический к.п.д.:

$$h_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где $Q_2 = M_a c_v \left(T_b - T_a\right)$ - количество отведённой теплоты.

8. Вычисляются индикаторная мощность, мощность механических потерь и эффективная мощность СД:

$$N_i = k_i h_t H_u \frac{G}{3600}; \; N_m = k_m n \; ; \; N_e = N_i - N_m .$$

В последних формулах коэффициенты k_i и k_m используются для калибровки модели.

Калибровка модели заключается в вычислении коэффициентов k_i и k_m через решение системы уравнений:

$$N_{ен} = f(n_н, G_н) \; , \; N_{ем} = f(n_м, G_м) \; .$$

В случае отсутствия данных $N_{ем}$, $n_м$, $G_м$ вычисление мощности N_m проводится по выражению

$$N_m = p_m V_s z_ц n i \; ,$$

где давление механических потерь p_m принимается по любой из применяемых на практике эмпирических формул. Калибровка в этом случае сводится к решению одного уравнения.

При известном часовом расходе топлива легко вычислить массу выбросов CO2 за единицу времени M_{CO2} либо по рекомендациям [3], либо по выражению (кг/ч)

$$M_{CO2} = 44 G \frac{C}{12} \; ,$$

где C - молярная доля углерода в топливе (для топлива среднего состава – 0,86), 44 – молярная массу углерода (кг/моль).

Пример расчёта удельного расхода топлива $g_e = 1000\, G / N_e$ на стендовой винтовой характеристике для СД 8NVD48A мощностью 736 кВт при 375 об/мин с помощью моделей МАИК и МИЦТ в сравнении со стендовыми значениями из [20] приведён на рис.

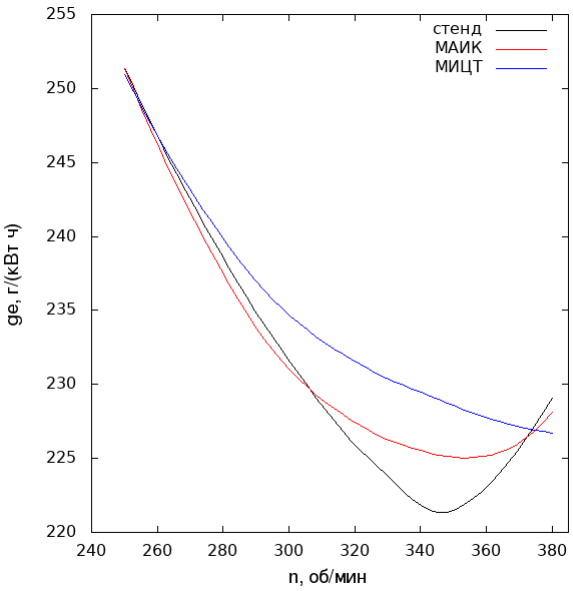


Рис. Удельный расход топлива для СД 8NVD48A

Максимальная погрешность в приведённом диапазоне для МАИК составляет 1,77%, а для МИЦТ – 3,48%.

Можно отметить три важных момента, которые касаются любого метода типа СД-III, построенного по изложенному принципу.

Во-первых, из-за калибровки модели конкретные эмпирические значения ряда параметров влияют незначительно на результаты расчётов. Поэтому, например, значения параметров ΔT , γ_r , T_r , k , m , a , b , приведённые в алгоритме МИЦТ, можно принять для всех СД сразу.

Во-вторых, давление наддува принимается постоянным и равным на номинальном режиме. Как показывают расчёты, это не приводит к существенным погрешностям. Кроме того, калибровка по «минимальной» точке ещё больше уменьшает эту погрешность.

В-третьих, изложенный принцип построения модели СД позволяет рассматривать подобные модели как определяемые алгоритмически аппроксимации одной характеристики СД (на практике лучше всего стендовой винтовой). Однако заложенная в эти алгоритмы «физика» обеспечивает приемлемые результаты при работе двигателя на режимах, отличных от аппроксимируемого. Это позволяет значительно сократить объём данных, необходимых для работы модели и, тем самым, обеспечить применимость последней.

Недостатком МГМ и МИЦТ является «идеальное» поведение индикаторного к.п.д.: при уменьшении нагрузки он всегда увеличивается. Такое поведение связано с тем, что в моделях СД-III не учитывается изменение теплообмена со стенками, а также времени сгорания топлива.

Для задач рейсового планирования указанный недостаток, как правило, не имеет большого значения, так как вычисление режима движения судна при минимальном g_e на практике не используется. Возможным применением

указанного режима может быть методика нормирования выбросов CO2, предложенная в [2]. В этом случае возможна модификация моделей СД-III, которая в настоящей статье не описывается.

Несомненным преимуществом моделей СД-III является возможность работы с минимумом данных, что позволяет реализовать простой и недорогой, доступный даже для мелких судовых компаний программный комплекс рейсового нормирования на языке VBA в рамках электронной таблицы для MS Excel, OpenOffice Calc или LibreOffice Calc.

Литература

1. Платов А.Ю. Методы оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях. Н. Новгород: ВГАВТ, 2009. 155 с.
2. Платов А.Ю., Иванов А.В., Степанов Д.В., Молькин Н.В., Степанец О.И. Нормирование вредных выбросов в атмосферу для речных грузовых и пассажирских судов на базе Web-технологий. / Великие реки 2017: Тез. докл. межд. конгресса. Н.Новгород, 2017. Т. 1. С. 132-135.
3. Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. Module 2. International Maritime Organisation, London, January 2016.
4. Górski W., Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z. The influence of ship operational parameters on fuel consumption. Scientific Journals. Maritime University of Szczecin. 2013, 36(108). pp. 49-54.
5. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
6. Brink A., Fröberg J. Permanent Slow Steaming. A solution to manage the increased costs imposed by the 2015 SECA regulation. University of Gothenburg, 2013.
7. Brace C. J. Transient Modeling of a Diesel Engine. PhD thesis, Bath, UK, 1996.
8. Schulten P.J.M. The interaction between diesel engines, ship and propellers during manoeuvring. PhD-thesis. Delft University of Technology, 2005.
9. Теория двигателей внутреннего сгорания. М.-Л.: Машиностроение,1954. 480 с.
10. Толшин В.И., В.В. Якунчиков. Режимы работы и токсичные выбросы отработавших газов судовых дизелей. М.: МГАВТ, 1999. 192 с.
11. Сахновский Б.М. Исследование и разработка экономико-математической модели проектирования системы "корпус-двигатель-движитель" мелкосидящих речных судов: дисс. канд. техн. наук: Горький, 1979.
12. Самыкин Г.А. Исследование эксплуатационной экономичности главных двигателей речных теплоходов: дисс. канд. техн. наук: 05.08.05. Горький, 1975. 183 с.
13. Ручкин Ю.Н. Эффективность эксплуатационных режимов судовых гидромеханических комплексов: дисс. док. техн. наук: 05.08.05. Н. Новгород, 2000. 392 с.
14. Полковников А.К. Решение основных задач технической эксплуатации главных судовых дизелей на базе информационных технологий: дисс. канд. техн. наук: 05.08.05. Новороссийск, 2002. 207 с.
15. Малышкин А.Г., Платов А.Ю., Платов Ю.И., Смирнов С.Г.Система автоматизированного расчёта норм времени следования и расхода топлива. // Наука и техника на речном транспорте. ЦБНТИ МТ РФ. 2003. Спец. вып. С. 80-84.
16. Платов А.Ю. Метод расчёта расхода топлива и оптимального движения речных теплоходов // Наука и техника на речном транспорте. ЦБНТИ МТ РФ, 2003. 76 с.
17. Портнов Д.А. Рабочий процесс авиадизеля при наддуве с использование выхлопных газов. М.: Оборонгиз, 1948. 41 с.
18. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. М.: Машгиз, 1963. 640 с.
19. Кавтарадзе. Р. З. Теория поршневых двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
20. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. - М.: Транспорт, 1980. 424 с.

References

1. Platov A.Yu. Metody operativnogo planirovaniya raboty rechnogo gruzovogo flota v sovremennyh usloviyah. N. Novgorod: VGAVT, 2009.
2. Platov A.Yu., Ivanov A.V., Stepanov D.V., Mol'kin N.V., Stepanec O.I. Normirovanie vrednyh vybrosov v atmosferu dlya rechnyh gruzovyh i passazhirskih sudov na baze Web-tekhnologij. / Velikie reki 2017: Tez. dokl. mezhd. kongressa. N.Novgorod, 2017, Vol. 1. pp. 132-135.
3. Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. Module 2. International Maritime Organisation, London, January 2016.
4. Górski W., Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z. The influence of ship operational parameters on fuel consumption. Scientific Journals. Maritime University of Szczecin. 2013, 36(108). pp. 49-54.
5. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2011.
6. Brink A., Fröberg J. Permanent Slow Steaming. A solution to manage the increased costs imposed by the 2015 SECA regulation. University of Gothenburg, 2013.
7. Brace C. J. Transient Modeling of a Diesel Engine. PhD thesis, Bath, UK, 1996.
8. Schulten P.J.M. The interaction between diesel engines, ship and propellers during manoeuvring. PhD-thesis. Delft University of Technology, 2005.
9. Teoriya dvigatelej vnutrennego sgoraniya. M.-L.: Mashinostroenie,1954.
10. Tolshin V.I., V.V. Yakunchikov. Rezhimy raboty i toksichnye vybrosy otrabotavshih gazov sudovyh dizelej. M.: MGAVT, 1999.

11. Sahnovskij B.M. Issledovanie i razrabotka ekonomiko-matematicheskoj modeli proektirovaniya sistemy "korpus-dvigatel-dvizhitel" melkosidyashchih rechnyh sudov: diss. kand. tekhn. nauk: Gor'kij, 1979.
12. Samykin G.A. Issledovanie ekspluatacionnoj ekonomichnosti glavnyh dvigatelej rechnyh teplohodov: diss. kand. tekhn. nauk: 05.08.05. Gor'kij, 1975.
13. Ruchkin Yu.N. Effektivnost' ekspluatacionnyh rezhimov sudovyh gidromekhanicheskih kompleksov: diss. dok. tekhn. nauk: 05.08.05. N. Novgorod, 2000.
14. Polkovnikov A.K. Reshenie osnovnyh zadach tekhnicheskoj ekspluatacii glavnyh sudovyh dizelej na baze informacionnyh tekhnologij: diss. kand. tekhn. nauk: 05.08.05. Novorossijsk, 2002.
15. Malyshkin A.G., Platov A.Yu., Platov Yu.I., Smirnov S.G.Sistema avtomatizirovannogo raschyota norm vremeni sledovaniya i raskhoda topliva. Nauka i tekhnika na rechnom transporte. CBNTI MT RF. 2003. Spec. vyp. S. 80-84.
16. Platov A.Yu. Metod raschyota raskhoda topliva i optimal'nogo dvizheniya rechnyh teplohodov / Nauka i tekhnika na rechnom transporte. CBNTI MT RF, 2003.
17. Portnov D.A. Rabochij process aviadizelya pri nadduve s ispol'zovanie vyhlopnyh gazov. M.: Oborongiz, 1948.
18. Portnov D.A. Bystrohodnye turboporshnevye dvigateli s vosplameneniem ot szhatiya. M.: Mashgiz, 1963.
19. Kavtaradze. R. Z. Teoriya porshnevyh dvigatelej. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008.
20. Rukovodstvo po teplotekhnicheskomu kontrolyu serijnyh teplohodov. - M.: Transport, 1980.

УДК 536.24+532.52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КАНАЛАХ СУДОВЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ

Юрий Гурьянович Володин
кандидат технических наук, доцент
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д.1
e-mail: yu.g.volodin@mail.ru
Оксана Николаевна Гречухина
доцент кафедры «Математических и естественнонаучных дисциплин»
Каспийский институт морского и речного транспорта филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
414014, Астрахань, ул. Костина, 2
e-mail: gre-oks@mail.ru
Юрий Иванович Матвеев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатации судовых энергетических установок»
ФГБОУ ВО Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Михаил Юрьевич Храмов
доцент кафедры «Эксплуатации судовых энергетических установок»
ФГБОУ ВО Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru

Аннотация

Одной из особенностей при эксплуатации газотурбинных двигателей является то, что пусковому режиму отводится роль одного из наиболее важных и ответственных режимов, так как за весьма короткий промежуток времени в результате возгорания топлива резко увеличивается температура рабочего тела и также резко изменяются по величине эксплуатационные параметры двигателя, что приводит также к резкому увеличению температуры обтекаемой поверхности его проточных элементов. Указанные обстоятельства определяют актуальность проведения систематических исследований влияния данных факторов на гидромеханические и тепломассообменые процессы. С позиций параметрических методов представлена математическая модель турбулентного пограничного слоя, описывающая нестационарное неизотермическое течение несжимаемого газа в осесимметричных каналах с теплообменом. Уравнения движения, неразрывности и энергии, замыкающие соотношения для коэффициентов трения и теплоотдачи при соответствующих краевых условиях позволяют выполнить анализ влияния конкретного воздействия на процессы трения и теплоотдачи с последующим синтезом явлений – изучением их совместного воздействия и установления корреляционных связей между ними.

Ключевые слова: Нестационарность, неизотермичность, математическая модель, газовый поток, осесимметричный канал.

MATHEMATICAL MODEL THE UNSTEADY-STATE CURRENT NON-COMPRESSIBLE GAS WITH HEAT TRANSFER IN THE AXLE SYMMETRIC CANALS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Yury G. Volodin
candidate of technical science, reader
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1
E-mail: yu.g.volodin@mail.ru
Oksana N. Grechukhina
candidate of physical and mathematical sciences
assistant professor of the department "Mathematical and Natural Sciences"
Caspian Institute of sea and river transport
414014, Astrakhan, Str. Kostina, 2
e-mail: gre-oks@mail.ru
Yury I. Matveyev
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Operation of ship power plants"
FSBEI HE Volga State University of Water Transport

603950, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Mikhail Yu. Khramov
candidate of technical sciences, assistant professor of the department
Volga state University of water transport
5 Nesterov Str. 603950 Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: eseu655@vsawt.ru

Abstract

One of the features in the operation of gas turbine engines is that the start-up mode plays the role of one of the most important and challenging modes, as in a very short period of time as a result of ignition of the fuel dramatically increases the temperature of the working fluid and also dramatically change the magnitude of the operating parameters of the engine, which also leads to a sharp increase in the temperature of the streamlined surface of the flow channel elements. These circumstances determine the relevance of systematic studies of the influence of these factors on the hydro-mechanical and heat and mass transfer processes. With positions the parameter methods to showed the mathematical model turbulent boundary layer, descriptive the unsteady-state non-isothermity current non-compressible gas in the axle symmetric canals with heat transfer. The equations movement, non-tearimity and energy, the trailing correlations on the laws friction and heat transfer at the conformable the regional conditions permit to fulfil analysis influence the concrete act on the process friction and heat transfer with following synthesis phenomenons – study their jointly act and ascertain the correlation ties between by us.

Keywords: unsteady-state, non-isothermal, mathematical model, gaseous flow, axle semmetry canal.

Введение

В рассматриваемой очень динамичной обстановке даже небольшое по величине отклонение одного или нескольких режимных параметров от номинального значения может стать причиной внештатной ситуации с разрушением конструктивных элементов судового газотурбинного двигателя (ГТД). Поэтому изучение нестационарного теплообмена и гидромеханики при турбулентных режимах течения газообразных сред в условиях совместного воздействия на поток динамической и тепловой нестационарности, неизотермичности, продольного градиента давления в зоне формирования пограничных слоев при больших температурных напорах и разработка методик их расчета представляют актуальную научно-прикладную задачу.

Описание разработки

В основу математической модели, описывающей нестационарное неизотермическое течение несжимаемого газа в осесимметричных каналах с теплообменом, положены уравнения движения, неразрывности и энергии, записанные в следующей форме [1]

$$\rho\frac{\partial w_x}{\partial t}+\rho w_x\frac{\partial w_x}{\partial x}+\rho w_r\frac{\partial w_x}{\partial r}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial(r\tau)}{\partial r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho r}{\partial t}+\frac{\partial(\rho w_x r)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w_r r)}{\partial r}=0 \quad (2)$$

$$\rho\frac{\partial h^*}{\partial t}+\rho w_x\frac{\partial h^*}{\partial x}+\rho w_r\frac{\partial h^*}{\partial r}=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial(rq)}{\partial r}+\frac{\partial P}{\partial t} \quad (3)$$

$$h^*=h_i+\frac{w_x^2}{2};\ h_i=\int_0^T Cp_i\partial T\,. \quad (4)$$

Система уравнений (1) – (4) совместно с заданными в форме (5) начальными и граничными условиями

$$G=f(t)$$
$$T_0^*=f(t) \quad (5)$$
$$T_w=f(t,x)$$

и необходимыми замыкающими соотношениями (6) – (7)

$$\sqrt{\frac{C_f}{2}}=\int_{\omega_1}^{1}\sqrt{\rho/\rho_0}\,\partial\omega\Big/\int_{\zeta_1}^{1}\sqrt{\bar{\tau}/\bar{\tau}_0}\,\frac{\partial\zeta}{x\zeta}\,, \quad (6)$$

$$S_t=\sqrt{\frac{C_f}{2}}=\int_{\omega_1}^{1}\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}\,\partial\omega\Big/\int_{\zeta_1 h}^{1}\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0}\sqrt{\frac{\bar{\rho}_0}{\bar{\rho}}}\,\frac{\partial\zeta_h}{x\zeta_h} \quad (7)$$

описывает нестационарное неизотермическое течение несжимаемого газа в осесимметричных каналах.

В рассматриваемом случае имеют место следующие возмущающие течение факторы: неизотермичность, тепловая нестационарность, динамическая нестационарность, продольный градиент давления.

В основу аналитического исследования положен параметрический метод, суть которого заключается в изучении влияния конкретного воздействия на процессы трения и теплоотдачи с последующим синтезом явлений – изучением их совместного воздействия и установления корреляционных связей между ними.

Предположим, что при достаточно большом периоде осреднения нестационарных параметров по сравнению с временным масштабом турбулентности, нестационарность не оказывает влияния на структуру турбулентности пограничного слоя. При этом останутся справедливыми основные предпосылки полуэмпирических теорий турбулентности.

Воспользуемся уравнениями (1) и (3) в виде преобразованном к интегральным соотношениям импульсов

$$\frac{1}{\rho_0 w_0^2}\cdot\frac{\partial\rho_0 w_0\delta^*}{\partial t}+\frac{\partial\delta^{**}}{\partial x}+ \\ +\delta^{**}\left[\begin{array}{l}(2+H)\cdot\dfrac{1}{w_0}\dfrac{\partial w_0}{\partial x}+\\ +\dfrac{1}{\rho_0}\cdot\dfrac{\partial\rho_0}{\partial x}+\dfrac{1}{r_0}\cdot\dfrac{\partial r_0}{\partial x}\end{array}\right]=\frac{C_f}{2} \quad (8)$$

и энергии

$$\frac{1}{\Delta h w_0}\cdot\frac{\partial \Delta h \delta_h^*}{\partial t}+\frac{\partial \delta_h^{**}}{\partial x}+\frac{\delta_h^{**}}{w_0}\cdot\frac{\partial w_0}{\partial x}+ \quad (9)$$

$$+\frac{\delta_h^*}{\rho_0}\cdot\frac{\partial \rho_0}{\partial x}+\frac{\delta_h^{**}}{\Delta h}\cdot\frac{\partial \Delta h}{\partial x}+\frac{\delta_h^{**}}{r_0}\cdot\frac{\partial r_0}{\partial x}=St$$

Соотношение импульсов является уравнением первого порядка в частных производных. Для численной его реализации

$$D\frac{\partial W_0}{\partial t}+E\frac{\partial W_0}{\partial X}=Ж \quad (10)$$

используем метод характеристик. Это позволяет при переходе к новым характеристическим координатам в квазилинейном приближении представить уравнение (10) в виде системы дифференциальных уравнений в полных производных

$$\begin{cases}\frac{dt}{D}=\frac{dX}{E}; & \frac{dt}{dX}=\frac{D}{E}\\ \frac{dX}{E}=\frac{dW_0}{Ж}; & \frac{dW_0}{dX}=\frac{Ж}{E}\end{cases}, \quad (11)$$

где

$$Ж=Re_1\frac{C_{f_0}}{2}\Psi_{\Sigma}\cdot W_0^2\cdot\bar r_0- \quad (12)$$

$$-\left(Re^{**}\cdot W_0+Re^{**}\cdot H\cdot W_0-\frac{Re_1}{4}\cdot W_0^2 2\cdot\bar r_0\right)\cdot\frac{\partial\bar r_0}{\partial X}$$

$$E=Re^{**}\bar r_0+W_0\bar r_0\frac{\partial Re^{**}}{\partial W_0}+$$

$$Re^{**}H\bar r_0+Re^{**}W_0\bar r_0\frac{\partial H}{\partial W_0}+HW_0\bar r_0\frac{\partial Re^{**}}{\partial W_0}- \quad (13)$$

$$-W_0\bar r_0^2\frac{Re^{**}}{4}$$

$$\frac{\partial Re^{**}}{\partial W_0}=\frac{LЖ-KB}{NB+H\bar r_0 Ж} \quad (14)$$

$$L=\frac{Re_1}{4}\bar r_0^2-Re^{**}\bar r_0\frac{\partial H}{\partial W_0} \quad (15)$$

$$K=Re^{**}\bar r_0+Re^{**}H\bar r_0+ \quad (16)$$

$$+Re^{**}W_0\bar r_0\frac{\partial H}{\partial W_0}-W_0\bar r_0^2\frac{Re_1}{4}$$

$$N=W_0\bar r_0+HW_0\bar r_0 \quad (17)$$

$$B=\left(Re^{**}H-\frac{Re_1}{2}W_0\bar r_0\right)\frac{\partial\bar r_0}{\partial X}- \quad (18)$$

$$-\frac{Re_1}{4}\bar r_0^2\frac{2\bar r_{0_1}}{w_{0_1}}\frac{1}{\rho_{0_1}}\frac{\partial\rho_{0_1}}{\partial t}-$$

$$-\frac{Re^{**}H\cdot\bar r_0}{W_0}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1-\phi_h}{\phi_h}\right)$$

$$D=Re^{**}\bar r_0\frac{2r_{0_1}}{w_{0_1}}\frac{\partial H}{\partial W_0}+H\bar r_0\frac{2r_{0_1}}{w_{0_1}}\frac{\partial Re^{**}}{\partial W_0} \quad (19)$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{4HRe^{**}\bar r_0}{Re_1}=W_0\bar r_0^2-1. \quad (20)$$

Уравнение энергии

$$\frac{\partial Re_h^{**}}{\partial X}=-Re_h^{**}\left[\frac{1}{h_0^*-h_w}\frac{\partial}{\partial X}\left(h_0^*-h_w\right)+\frac{1}{\bar r_0}\frac{\partial\bar r_0}{\partial X}\right]+ \quad (21)$$

$$+\frac{Re\,St_0\Psi_{\Sigma_h}}{\bar r_0}+$$

$$+\frac{1}{h_0^*-h_w}\frac{\partial}{\partial t}h_0^*\bar\rho_0\bar r_0\frac{\bar r_{0_1}}{2w_{0_1}}Re_1,$$

где

$$Re=\bar\rho_0\bar r_0 W_0\,Re_1, \quad (22)$$

$$Re_1=\frac{\rho_{0_1}w_{0_1}2r_{0_1}}{\mu_{0_1}}, \quad (23)$$

$$\bar\rho_0=\frac{\rho_0}{\rho_{0_1}};\ W_0=\frac{w_0}{w_{0_1}};\ \bar r_0=\frac{r_0}{r_{0_1}} \quad (24)$$

Заслуживает внимания временная производная в уравнении (22). Видно, что

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho rh^*=\frac{\partial}{\partial t}\rho_0 r_0 h_0^*, \quad (25)$$

т.е. комплекс величин ρrh изменяется во времени одинаково по всему сечению канала. Это довольно удобное свойство системы, так как переводит его в класс обыкновенных дифференциальных уравнений. Величина $\rho_0 r_0 h_0^*$ определяется начальными условиями для случая течения в коротких каналах.

Таким образом, соотношения (10 – 21), замыкающиеся зависимостями (6) и (7) для коэффициентов трения и теплоотдачи с начальными и граничными условиями (5), позволяют рассчитать значения коэффициентов трения и теплоотдачи, интегральных и тепловых характеристик и параметры течения с теплообменом несжимаемого газа в целом в осесимметричных каналах переменной геометрии.

Содержание параметров трения и теплоотдачи, определяющих различные виды дестабилизирующих воздействий, вытекает из граничных условий при аппроксимации профилей касательных напряжений и тепловых потоков по сечению пограничного слоя [2] и представляет собой

$$\bar\tau_w'=\left(\frac{\partial\bar\tau}{\partial\xi}\right)_{\xi\to0};\ \bar q_w'=\left(\frac{\partial\bar q}{\partial\xi_h}\right)_{\xi_h\to0}. \quad (26)$$

Здесь $\bar\tau=\tau/\tau_w$, $\bar q=q/q_w$.

Данные производные определяются из уравнений движения и энергии, записанных для области потенциального ядра и пристенной области.

Обобщающий параметр трения $\bar\tau_w'$.

$$\rho_0\frac{\partial w_0}{\partial t}+\rho_0 w_0\frac{\partial w_0}{\partial x}=-\frac{\partial P}{\partial x}, \quad (27)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x}+\left[\frac{1}{r}\left(\frac{\partial r\tau}{\partial r}\right)\right]_{\xi\to0}=0\cdot \quad (28)$$

Подставляя (27) в (28) и умножая полученный результат на δ/τ_w, получаем

$$-\frac{\delta}{\tau_w}\rho_0\frac{\partial w_0}{\partial t}-\frac{\delta}{\tau_w}\rho_0 w_0\frac{\partial w_0}{\partial x}=\frac{\delta}{\tau_w}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau)\right]_{\xi\to0}$$

(29)

Раскрывая производную в правой части (29) и замечая, что $\tau_w=\frac{C_f}{2}\rho_0 {w_0}^2$, получаем

$$\bar\tau_w'=\left(\frac{\partial\bar\tau}{\partial\xi}\right)_{\xi\to0}=z+\lambda-\frac{\delta}{r_0}, \quad (30)$$

где параметр динамической нестационарности

$$z = -\frac{2}{C_f}\cdot\frac{\delta}{w_0^2}\cdot\frac{\partial w_0}{\partial t}, \qquad (31)$$

параметр продольного градиента

$$\lambda = -\frac{2}{C_f}\cdot\frac{\delta}{w_0}\cdot\frac{\partial w_0}{\partial x}. \qquad (32)$$

Обобщающий параметр теплоотдачи $\bar{q}'_w$.

$$\rho_0\frac{\partial h_0^*}{\partial t} + \rho_0 w_0\frac{\partial h_0^*}{\partial x} = 0, \qquad (33)$$

$$\rho_w\frac{\partial h_w^*}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial y}. \qquad (34)$$

Проведя преобразования, подобные обобщающему параметру трения, получим

$$\bar{q}'_w = \left(\frac{\partial\bar{q}}{\partial\xi_h}\right)_{\xi_h\to 0} = z_h + \lambda_h - \frac{\delta_h}{r_0}. \qquad (35)$$

Здесь параметр тепловой нестационарности

$$z_h = -\frac{\delta_h}{St\cdot w_0\cdot\phi_h\left(h_0^* - h_w\right)}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(h_0^* - h_w\right) \qquad (36)$$

параметр продольного градиента энтальпии

$$\lambda_h = -\frac{\delta_h}{St\cdot\phi_h\left(h_0^* - h_w\right)}\cdot\frac{\partial h_0^*}{\partial x}. \qquad (37)$$

Следуя [2], зависимость для коэффициента трения запишем в виде

$$\sqrt{\frac{C_f}{2}} = \int_{\omega_1}^{1}\sqrt{\rho/\rho_0}\,\partial\omega \Big/ \int_{\zeta_1}^{1}\sqrt{\bar{\tau}/\bar{\tau}_0}\,\frac{\partial\zeta}{x\zeta}. \qquad (38)$$

Входящее в (38) распределение плотности по сечению турбулентного пограничного слоя в стационарных условиях определяется интегралом Крокко [3]. Сделаем допущение, что и в нестационарных условиях имеет место данная зависимость, т.е.

$$\rho/\rho_0 = \left[\phi_h + (1-\phi_h)\cdot\omega\right]^{-1},$$

Где

$$\phi_h = T_w/T_0. \qquad (39)$$

Обозначим знаменатель в (38) через A′

$$A = \int_{\xi_1}^{1}\sqrt{\bar{\tau}/\bar{\tau}_0}\,\frac{\partial\xi}{x\xi}. \qquad (40)$$

Интегрируя (38) с учетом (39) и (40) получим

$$\sqrt{\frac{C_f}{2}} = \frac{2(1-\omega_1)}{(1-\omega_{10})\left[1+\sqrt{\phi_h+(1-\phi_h)\omega_1}\right]A'} \qquad (41)$$

Введем функции относительного изменения коэффициента трения

$\Psi_\Sigma = \left(C_f/C_{f_0}\right)_{Re^{**}}$, где согласно [4] $C_{f_0} = 0.0256/\mathrm{Re}^{**\,0.25}$.

Преобразуя (41), находим

$$\sqrt{\frac{C_f}{C_{f_0}}} = \sqrt{\Psi_\Sigma} = \frac{2\cdot(1-\omega_1)\ln\xi_{10}}{(1-\omega_{10})\cdot\left[1+\sqrt{\phi_h+(1-\phi_h)\omega_1}\right]A} \qquad (42)$$

Здесь $A = \int_{\xi_1}^{1}\sqrt{\bar{\tau}/\bar{\tau}_0}\,\frac{\partial\xi}{\xi}$, ω_{10} и ξ_{10} значения относительной скорости на границе вязкого подслоя и его толщина в стандартных условиях. Как видно из (42), конечная реализация зависимости связана с распределением касательных напряжений. Следуя [5] и [2], запишем их в виде

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0} = 1 + \frac{\bar{\tau}'_w\xi}{\Psi_\Sigma(1+2\xi)};\ \bar{\tau}'_{w0} \ge 0 \qquad (43)$$

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0} = 1 + \frac{(\Psi_\Sigma + \bar{\tau}'_{w0})\xi}{(1-\xi)\Psi_\Sigma} - \frac{(\Psi_\Sigma + \bar{\tau}'_{w0})\xi^d}{(1-\xi)\Psi_\Sigma};\ \bar{\tau}'_{w0} \prec 0, \qquad (44)$$

где $d = \bar{\tau}'_{w0}\big/\left(\Psi_\Sigma + \bar{\tau}'_{w_0}\right)$.

Соотношения (42 − 44) совместно с зависимостями для относительных толщин вязкого подслоя и скорости на его границе образуют систему уравнений,

$$\xi_1 = 11{,}6\left\{\mathrm{Re}_w^{**}\frac{\delta}{\delta^{**}}\sqrt{\frac{C_f}{2}\left(1+\bar{\tau}'_w\frac{\xi_1}{2}\right)}\right\}^{-1} \qquad (45)$$

$$\omega_1 = \mathrm{Re}_w^{**}\frac{\delta}{\delta^{**}}\left\{\frac{C_f}{2}\xi_1\left(1+\bar{\tau}'_w\frac{\xi_1}{2}\right)\right\} \qquad (46)$$

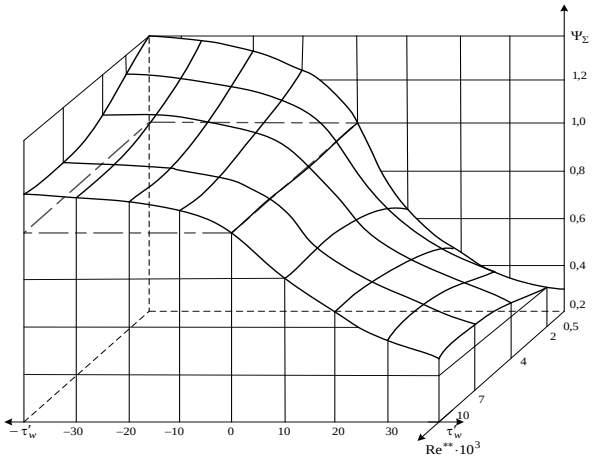


Рис.1. Влияние числа и параметра трения на относительный коэффициент трения в изотермических условиях при

которая при заданных значениях Re^{**}, $\bar{\tau}'_{w0}$, ϕ_h и $\frac{\delta}{r_0}$ позволяет рассчитать изменения относительного коэффициента трения. Показано (рис. 1) влияние числа Рейнольдса и обобщающего параметра трения в изотермических условиях. В области положительных значений $\bar{\tau}'_w$ (расширяющийся канал или при уменьшении расхода рабочего тела) коэффициент трения меньше своего стандартного аналога. Изменения проявляется глубже при меньших числах Рейнольдса, т.к. поток менее устойчив к внешним возмущениям и требуется соответственно меньше затрат энергии для его деформации. Увеличение числа Рейнольдса заметно увеличивает сопротивляемость потока к внешнему возмущению.

В области отрицательных значений параметра трения (когда поток ускоряется при сужении канала или при увеличении расхода газа) относительный коэффициент трения больше единицы. Меняется и дислокация по числу Рейнольдса, что вызвано перераспределением энергии.

Согласно [2] закон теплоотдачи в общей форме запишем в виде:

$$S_t = \sqrt{\frac{C_f}{2}} = \int_{\omega_1}^{1} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}\partial\omega / \int_{\zeta_1 h}^{1} \frac{\bar{q}}{\bar{q}_0}\sqrt{\frac{\bar{q}_0}{\bar{q}}}\frac{\partial\zeta_h}{x\zeta_h} \quad (47)$$

Подставляя в (47) распределение плотности (39) и интегрируя полученное выражение, находим

$$\mathrm{St} = \frac{2(1-\vartheta_1)\sqrt{\frac{C_f}{2}}}{\left[1+\sqrt{\phi_h+(1-\phi_h)\cdot\vartheta_1}\right]\cdot B}, \quad (48)$$

Где

.

$$B = \int_{\zeta_1 h}^{1} \frac{\bar{q}}{\bar{q}_0}\sqrt{\frac{\bar{\tau}_0}{\bar{\tau}}}\frac{\partial\zeta_h}{x\zeta_h} \quad (49)$$

Входящее в (49) распределение плотности теплового потока может быть аппроксимировано полиномом [5] в области $\bar{q}'_w \succ 0$ и степенным полиномом [2] при $\bar{q}'_w \prec 0$.

Имеем

$$\frac{\bar{q}}{\bar{q}_0} = 1 + \frac{\bar{q}'_{w0}\xi_h}{\Psi_{\Sigma_h}(1+2\xi_h)}; \bar{q}'_{w0} \geq 0, \quad (50)$$

$$\frac{\bar{q}}{\bar{q}_0} = 1 + \frac{\left(\Psi_{\Sigma_h} + \bar{q}'_{w0}\right)\xi_h}{\Psi_{\Sigma_h}(1+\xi_h)} - \frac{\left(\Psi_{\Sigma_h} + \bar{q}'_{w0}\right)\xi_h^{d_h}}{\Psi_{\Sigma_h}(1+\xi_h)}; \bar{q}'_{w0} \prec 0, \quad (51)$$

$$d_h = \bar{q}'_{w0} / \left(\Psi_{\Sigma_h} + \bar{q}'_{w0}\right) \quad (52)$$

$\bar{q}'_{w_0}$ − параметр теплоотдачи, $\Psi_{\Sigma_h} = \left(\frac{St}{St_0}\right)_{\mathrm{Re}_h^{**}}$.

Распределение касательных напряжения в (47) аппроксимируется зависимостями (43) и (44). Однако, в силу изменения переменной интегрирования, данные выражения удобнее записать в виде

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0} = 1 + \frac{\bar{\tau}'_{w0}\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}}{\Psi_\Sigma\left(1+2\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}\right)}; \bar{\tau}'_{w0} \geq 0, \quad (53)$$

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0} = 1 + \frac{\left(\Psi_\Sigma + \bar{\tau}'_{w0}\right)\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}}{\left(1-\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}\right)\Psi_\Sigma} - \frac{\left(\Psi_\Sigma + \bar{\tau}'_{w0}\right)\left(\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}\right)^{d_h}}{\left(1-\xi_h\frac{\delta_h}{\delta}\right)\Psi_\Sigma}; \bar{\tau}'_{w0} \prec 0 \quad (54)$$

Безразмерные параметры на границе теплового вязкого подслоя $\xi_{1\mathrm{h}}$ и ϑ_1 определяются из условия сопряжения линейной и логарифмической областей профиля температуры по методике [2]

$$\vartheta_1 = \frac{\mathrm{Re}_h^{**}\cdot\mathrm{Pr}\cdot\delta_h}{\delta_h^{**}}\left[\mathrm{St}\cdot\xi_{1_h}\left(1+\frac{\bar{q}'_w\cdot\xi_{1_h}}{2}\right)\right], \quad (55)$$

$$\xi_{1_h} = 11.6\left[\mathrm{Re}_h^{**}\cdot\frac{\delta_h}{\delta_h^{**}}\sqrt{\mathrm{St}\cdot\mathrm{Pr}\left(1+\frac{\bar{q}'_w\cdot\xi_{1_h}}{2}\right)}\right]^{-1} .(56)$$

Выражения, определяющие коэффициент теплоотдачи (47) − (56), непосредственно указывают на воздействие газодинамических эффектов. Последние проявляют себя не только через диссипацию энергии, т.е. коэффициент трения, но и через профиль касательных напряжений, а также отношение толщин теплового и динамического пограничных слоев.

Так как данные величины определяются числом Рейнольдса и параметром трения, то и коэффициент теплоотдачи является функцией данных параметров. Однако влияние их меньше, чем на коэффициент трения, поскольку коэффициент теплоотдачи пропорционален корню квадратному из этих величин. увеличение числа Стантона относительно стандартного значения. Обобщающий параметр трения воздействует на относительный коэффициент теплоотдачи обратным образом.

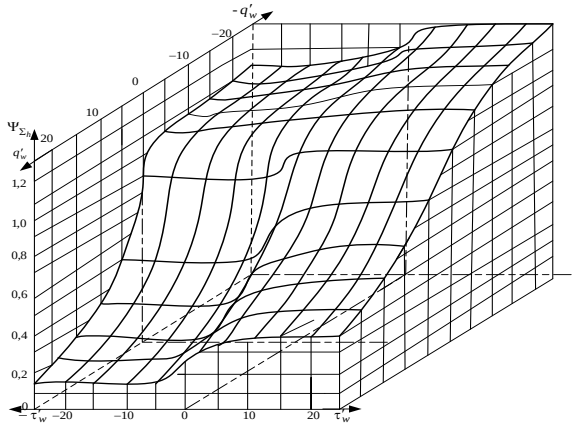


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от параметров $\bar{\tau}'_w$ и теплоотдачи $\bar{q}'_w$ при $\mathrm{Re}^{**} = \mathrm{Re}_h^{**} = 10^3$.

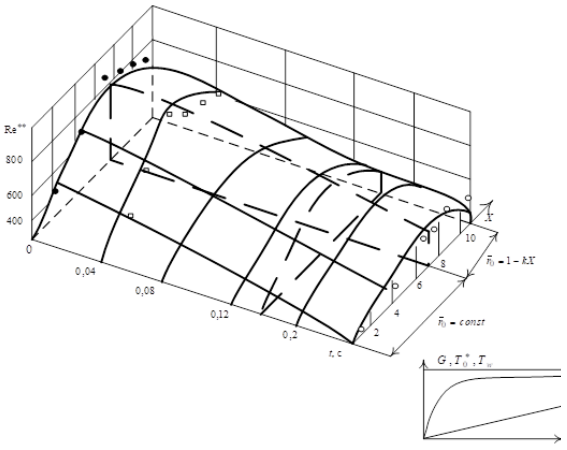


Рисунок 3. Изменения числа Re^{**} по длине опытного участка и во времени. Линии – расчет. Точки – эксперимент: ● – t = 0; □ – t = 0,04; ○ – t = 0,2

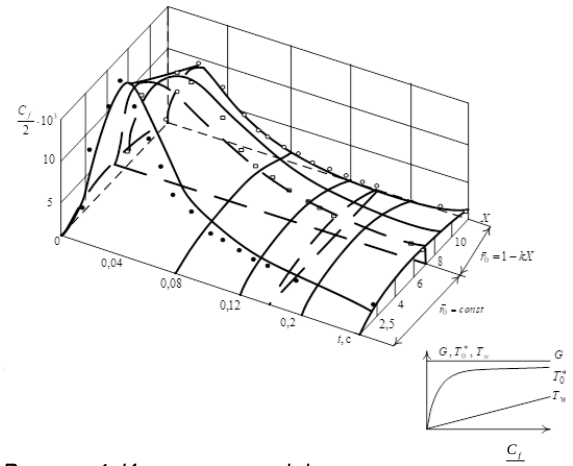


Рисунок 4. Изменения коэффициента трения $\frac{C_f}{2}$ по длине опытного участка и во времени. Линии – расчет. Точки – эксперимент: ● – X= 2,5; □ – X= 7,5; ○ – X= 10,5

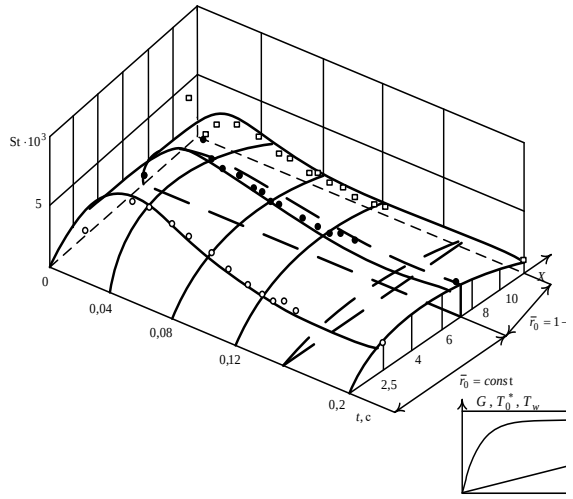


Рисунок 5.Изменения коэффициента теплоотдачи St по длине опытного участка и во времени. Линии – расчет. Точки – эксперимент: □ – X = 10,5; ● – X = 7,5; ○ – X = 2,5

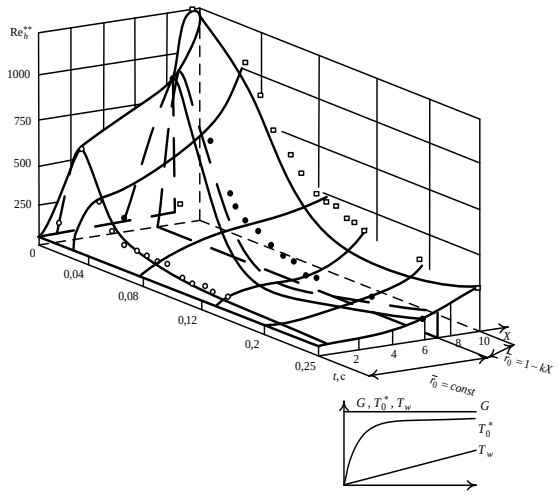


Рисунок 6. Изменения числа Re_h^{**} по длине опытного участка и во времени. Линии – расчет. Точки – эксперимент: □ – X = 10,5; ● – X = 7,5; ○ – X = 2,5

В ускоренных, во времени и пространстве, потоках коэффициент теплоотдачи уменьшается, а замедленных возрастает. Различные же их сочетания, естественно, могут изменить ситуацию в ту или иную сторону, что и иллюстрируется на рисунке.

На рисунках 3 – 6 приведены сравнения результатов расчета с экспериментальными данными [6 – 11]. При расчетах краевые условия приведены к краевым условиям эксперимента. На графиках показаны зависимости коэффициентов трения и теплоотдачи ● и чисел Рейнольдса Re^{**} и Re_h^{**} в функции времени и продольной координаты. Как видно на графиках, сравнение расчета и эксперимента показывает удовлетворительную сходимость в результатах.

Выводы:

Предложенная методика позволяет рассчитать значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи в функции продольной координаты и времени в осесимметричных каналах постоянного и переменного радиуса в зоне формирования пограничных слоев при воздействии на газовый поток тепловой и динамической нестационарности, неизотермичности, вызванными изменениями температуры или расхода рабочего тела, и продольного градиента давления, обусловленного изменением диаметра канала в функции продольной координаты.

Литература

1. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок. Санкт-Петербург. Изд. «Инфо-да». 2007. 128 с.
2. Фафурин А.В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое. // Тепло− и массообмен в двигателях летательных аппаратов, 1979. Казань. Вып. 2. С. 62 – 69.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 342 с.
5. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1973. 256 с.

6. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Нестационарные эффекты и трение при запуске энергетических установок// Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 2006. № 1. С. 34 – 36.
7. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Нестационарные эффекты и теплообмен в пусковом режиме энергетических установок// Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 41 – 43.
8. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Теплообмен при пуске энергоустановок// Двигателестроение. – 2006. № 2. С. 11 – 13.
9. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Коэффициент трения в пусковом режиме энергетических установок// Изв. ВУЗов. Машиностроение. 2006. № 8. С. 37 – 40.
10. Володин Ю.Г., Яковлев М.В. Ламинаризация ТПС в пусковом режиме энергетических установок// Изв. ВУЗов. Машиностроение. 2006. № 10. С. 39 42.
11. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Коэффициент теплоотдачи в пусковом режиме энергетических установок// Изв. ВУЗов Машиностроение. 2007. № 1. С. 26 – 29.

References

1. Volodin Yu.G., Marfina O.P. Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energeticheskikh ustanovok. Sankt-Peterburg. Izd. «Info-da». 2007. 128 p.
2. Fafurin A.V. Zakony treniya i teplootdachi v turbulentnom pogranichnom sloe. // Teplo− i massoobmen v dvigatelyakh letatel'nykh apparatov, 1979. Kazan'. Vyp. 2. p. 62 – 69.
3. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. M.: Atomizdat, 1979. 415 p.
4. Kutateladze C.C., Leont'ev A.I. Teploobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe. M.: Energiya, 1972. 342 p.
5. Fedyaevskiy K.K., Ginevskiy A.S., Kolesnikov A.V. Raschet turbulentnogo pogranichnogo sloya neszhimaemoy zhidkosti. L.: Sudostroenie, 1973. 256 p.
6. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Nestatsionarnye effekty i trenie pri zapuske energeticheskikh ustanovok// Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 2006. № 1. p. 34 – 36.
7. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Nestatsionarnye effekty i teploobmen v puskovom rezhime energeticheskikh ustanovok// Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 2006. № 4. p. 41 – 43.
8. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Teploobmen pri puske energoustanovok// Dvigatelestroenie. – 2006. № 2. p. 11 – 13.
9. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Koeffitsient treniya v puskovom rezhime energeticheskikh ustanovok// Izv. VUZov. Mashinostroenie. 2006. № 8. p. 37 – 40.
10. Volodin Yu.G., Yakovlev M.V. Laminarizatsiya TPS v puskovom rezhime energeticheskikh ustanovok// Izv. VUZov. Mashinostroenie. – 2006. p № 10. p. 39 42.
11. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Koeffitsient teplootdachi v puskovom rezhime energeticheskikh ustanovok// Izv. VUZov Mashinostroenie. 2007. № 1. p. 26 – 29.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 629.5.024:532.54

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВОКРУГ КОРПУСА СУДНА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Александр Николаевич Клементьев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Игорь Викторович Липатов
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5
e-mail: i_lipatov@mail.ru
Александр Николаевич Ситнов
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru

Аннотация

В статье представлены методические аспекты выполнения исследования безаварийного движения флота на участках со стеснением габаритов. Основной акцент сделан на исследование просадки судна и возможности появления «бенк» эффекта, которые ведут к удару корпуса судна о дно. Натурные эксперименты для решения задачи связаны с большими экономическими издержками и высокими рисками от результатов возможных транспортных происшествий и аварий в случае неудачного сочетания исходных факторов. Лабораторные эксперименты не обеспечивают качественного учета влияния масштабного фактора, меняющего структуру гидродинамического поля и существенно искажающего реальный процесс движения. Поэтому в качестве исследовательского аппарата выбрано математическое моделирование гидродинамических полей, формирующихся вокруг корпуса судна.

С целью максимально адекватного воспроизведения явления движения судна в стесненных условиях моделирование выполнено с использованием меняющейся расчетной области. Деформации расчетной области осуществляются в соответствии с режимом движения, дифферента и просадки корпуса судна. Последние являются целью решения.

Разработанная математическая модель была использована при моделировании выхода судна типа «Волго-Дон» из Чайковского шлюза, лимитирующего судоходство на важном участке Единой глубоководной системы Европейской части России.

Исследование показало, что изменения просадки и дифферента корпуса в стесненных условиях зависят от динамики изменения скорости движения судна и это объясняется спецификой воздействия гидродинамических полей на корпус судна.

Ключевые слова: Гидродинамические поля, просадка судна, «бенк» эффект, свободная поверхность, твердотельная CAD модель, масса - инерционные характеристики судна, кинематическая структура потока.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE RESEARCH OF HYDRODYNAMIC FIELDS AROUND THE VESSEL HULL WHEN MODELING HER MOTIONS IN CONSTRICTED WATERWAY

Alexander N. Klementyev
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Ship Navigation and Safety
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Igor V. Lipatov
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: i_lipatov@mail.ru

Alexander N. Sitnov
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Waterways
and Hydraulic Structures
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru

Abstract

The article presents the methodological aspects of the study of accident-free traffic of fleet in areas with restraint of dimensions. The main focus is on the study of drawdown of a vessel and possibility of the appearance of a “bank” effect, which lead to the result of the hull hitting the seabed. Full-scale trials to solve the problem are associated with high economic costs and high risks from the results of possible traffic accidents and accidents in case of unsuccessful combination of initial factors. Laboratory experiments do not provide a qualitative account of the influence of a scale factor that changes the structure of the hydrodynamic field and significantly distorts the actual process of motion. Therefore, mathematical simulation of hydrodynamic fields generated around the hull of the vessel was chosen as a research model.

In order to maximize the adequate simulation of the phenomenon of vessel motions in constricted waterway, the simulation was performed using a varying computational domain. Deformations of the computational domain occur in accordance with the mode of motion, trim and drawdown of the hull. The latter are the goal for problem solving.

The developed mathematical model was used to simulate the departure of a Volgo-Don-type vessel from the Tchaikovsky Lock, which limits shipping in an important part of the Unified Deep-Water System of the European Part of Russia.

The study showed that changes in the drawdown and trim of the hull in constricted waterway depend on the dynamics of changes in the speed of the vessel and this is due to the specific effects of hydrodynamic fields on the hull.

Keywords: Hydrodynamic fields, vessel drawdown, “bank” effect, free surface, solid-state CAD model, mass — inertial characteristics of the vessel, kinematic structure of the flow.

Введение

Во все времена человечество старалось организовать свое жилище на берегах крупных водоемов. С одной стороны, это обеспечивало водопользование и рыбный промысел, а с другой – транспортные коммуникации с другими населенными пунктами. Еще больше эта тенденция стала усиливаться в последние двести лет. С ростом энерговооруженности и водопотребления производством наличие крупной водной артерии стало определяющим фактором развития той или иной территории.

Параллельным курсом шло развитие внутреннего водного транспорта. До периода промышленной революции XIX в. во внутреннем судоходстве использовались суда с небольшим водоизмещением. Поэтому естественное состояние внутренних водных вполне удовлетворяло текущие потребности.

Рост энерговооруженности судов увеличил их водоизмещение и осадки. В результате потребовались значительные объемы путевых работ. Без последних безопасный заход судов на акваторию порта, движение по каналам, проход через узкие места становились затруднительными.

Заинтересованность судовладельцев в строительстве судов с максимально возможным водоизмещением, обусловленная снижением себестоимости водно-транспортных перевозок, требовало увеличения габаритов водного пути. Но дноуглубительные и выправительные работы лишь частично сглаживали проблему, и были неспособны решить ее полностью. С развитием шлюзования рек лимитирующими участками для прохождения судов стали не естественные водные участки, а другие инфраструктурные элементы пути (судоходные каналы, шлюзы и т. д.). Поэтому фрагментарно габариты строящихся судов стали приближаться к габаритам водных путей и, как следствие, запасы воды под днищем судна сокращались. Снижение их резко увеличило градиенты скоростей, воздействующих на дно водоема и корпус судна. В совокупности с усложнением гидродинамических полей потока вокруг корпуса судна при динамическом характере воздействия скорости, ухудшаются условия эксплуатации судов, поскольку в разных ситуациях могут усиливаться «поршневой» и «бенк» эффекты и возможно касание судна корпусом дна реки (водоема) и т.д.

Устранение таких опасных ситуаций возможно на базе тщательного и всестороннего анализа функционирования системы «судно - водный путь» в сочетании с анализом гидродинамических полей вокруг корпуса судна, движущегося в стесненных условиях. Этим определяется актуальность задачи.

В результате проведения исследований появляется возможность свести с минимуму вероятность возникновения транспортных происшествий и аварий, что увеличит интенсивность пропуска судов на лимитирующих и сложных участках внутренних водных путей. Учитывая многообразие эксплуатационных ситуаций, методические подходы решения поставленной задачи рассмотрим на примере движения судна через шлюз при его выходе из камеры в подходной канал.

1. Постановка задачи и исследовательская математическая модель

Масштабный эффект вносит большую погрешность в лабораторный эксперимент. Постановка натурных исследований крайне ограничена в реализации и связана с большими техногенными рисками. Вследствие этого предпочтение отдается более перспективному и доступному методу исследований - математическому моделированию. Отправная точка - решение системы полных гидродинамических уравнений :

:

$$\frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) = F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) = F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt},$$

где : t - время;

V_x, V_y, V_z — компоненты абсолютной скорости движения жидкости;

F_x, F_y, F_z - компоненты массовых сил;

p - пьезометрическое давление;

ρ — плотность;

v- эффективная вязкость.

Решение реализуется с помощью метода контрольного объема [1]. В нем пространство решения дискретизируется прямоугольными параллелепипедами. В границах каждого параллелепипеда дифференциальное соотношение заменяется разностным. На базе разностных аналогов определяются искомые расчетные величины (скорость, давление, турбулентные характеристики, положение свободной поверхности). Пространственное положение свободной поверхности отслеживается с помощью маркера - VOF скаляра. Его дискретное значение C получается из решения следующего уравнения [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} C + \nabla C \vec{U} = 0, \quad (2)$$

где: C - имеет только два значения: 1 - для жидкости и 0 - для воздуха.

Для замыкания системы уравнений (1) и описания турбулентных эффектов в потоке жидкости, воспользуемся $k - \varepsilon$ подходом. Величина коэффициента турбулентной вязкости (коэффициент турбулентного обмена) определяется формулой [3,4]:

$$\nu_m = c_\rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где: κ - кинетическая энергия турбулентности,

ε - коэффициент диссипации турбулентной кинетической энергии.

Принимая во внимание результаты [6], [7], 8], для описания турбулентности в речном потоке используем высокорейнольдсовскую гипотезу турбулентности, а в пристеночной (переходной) области - логарифмический закон [5].

Дальнейшее формирование математической модели осуществим применительно к исследованию процесса выхода судна “Волго-Дон” из Чайковского шлюза. Область подходного канала и корпус расчетного судна в представлены на рис. 1 и 2. Они оформляются в виде твердотельной CAD модели.

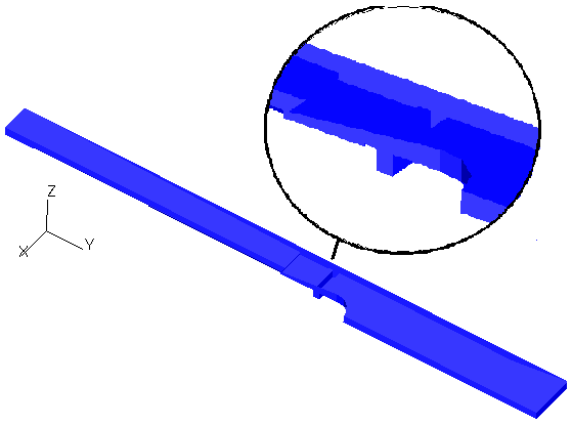


Рис. 1 Твердотельная CAD модель шлюза и подходного канала

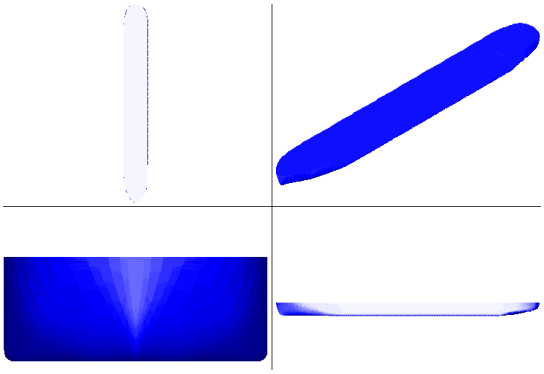
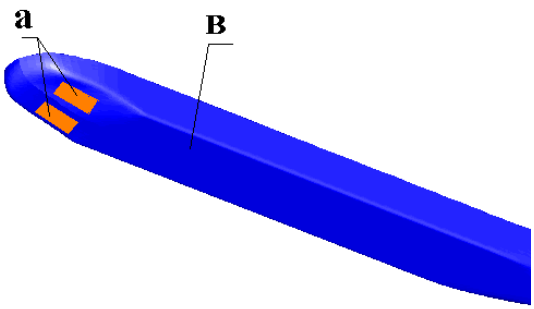


Рис. 2 CAD модель судна типа «Волго-Дон»

Расчетная область формируется из твердотельных моделей и заполняется расчетными ячейками [1]. Выделяются следующие граничные области (см. рис. 3):

- А — область воздействия от вращения винтов движителей;
- В - корпус судна, движущегося с динамической скоростью;
- С - шероховатая поверхность бетона шлюза и подходного канала;
- Д - выход из подходного канала;
- Е - область симметрии шлюзов.

а) граничные области на судне



б) граничные области на шлюзе

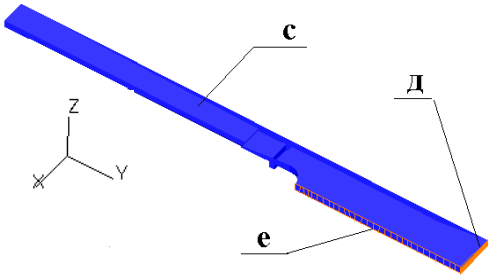


Рис. 3 Граничные области к постановке граничных условий

Граничные условия модели следующие:

1. *x,y,z* є A

w = 200 об/мин; *L*=0.01: *l*=0.01: (4)
VOF = 1

2. *x,y,z* є B

V_x, V_z = 0: $V_y = V_{суд}$: *к* = 0: *ε* = 0: *dVOF/ dn* (5)
= 0

3. *x,y,z* є C

V_x, V_y, V_z = 0 ; *к* = 0.0 : *ε* = 0.0 : *dVOF/ dn* (6)
=0

4. *x,y,z* є Д

$\frac{dV_n}{dn} = \frac{d\kappa}{dn} = \frac{d\varepsilon}{dn} = \frac{dVOF}{dn} = 0$ (7)

5. *x,y,z* є E (8)

V_x, = 0 : *dк/dn* = 0 : *dε/dn* = 0 :
dVOF/ dn = 0

Условие (4) относится к области действия винтов движителей, которые воздействуют на водный поток с вращательной скоростью *w.* При этом турбулентные характеристики *к* и *ε* пересчитываются через заданные величины *l* (характеристический размер) и *I* (интенсивность турбулентности 10 %) по известным классическим выражениям [6,7,8]. В контурах граничной области только водная среда *VOF* = 1.

Условия (5) и (6) – классическое условие не протекания, то есть поток среды в его границах недвижим. Поэтому все скорости и турбулентные характеристики равны нулю. Среда в произвольной точке на корпусе судна и бетоне шлюза может быть любой (*dVOF/ dn* = 0).

Условие (7) и (8) – выходное условие развитого потока [2]. Все скоростные компоненты, турбулентные характеристики и маркер среды *VOF* имеют произвольный параболический профиль. Последний является результатом решения на каждой итерации вычислительной процедуры. Исключение возможно только в условии (8), где вследствие симметрии расчетной области компонента V_x принимается равной нулю.

Начальные условия следующие :

$0 < Z < H_k$ *VOF* = 1 $P=P_{гд}$ V_x, V_y, V_z = 0 (9)

$Z > H_k$ *VOF* = 0 P=0. V_x, V_y, V_z = 0 (10)

Поведение судна аппроксимируем движением абсолютно твердого тела с тремя степенями свободы. Ввиду малости из рассмотрения исключим поперечную скорость, бортовую качку и плановое вращение вокруг вертикальной оси Z (см. рис. 4).

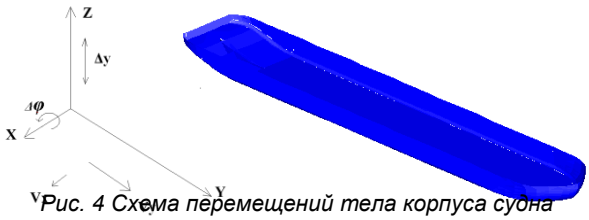


Рис. 4 Схема перемещений тела корпуса судна

Продольное перемещение судна по оси Y определяется его скоростью. Она непостоянна по времени и зависит от режима движения судна при выходе из шлюза. В исследовании ее принимали по экспериментальным данным.

Продольное движения судна вдоль оси OZ описывается вторым законом Ньютона :

$$\sum \vec{F} = m * \vec{a} = m * \frac{dv}{dt} = m * \frac{d'' y}{dt}, \quad (11)$$

где: *ΣF* - суммарная продольных сил, действующих на корпус;

m – масса судна «Волго-Дон» ;

a - вертикальное ускорение судна.

Сумма продольных сил равна :

$$\sum \vec{F} = \vec{F_A} + \vec{F}_I, \quad (12)$$

где : F_A – сила Архимеда;

F_I - сила инерции.

Вертикальное ускорение равно :

$$a = a_{sh} + g, \quad (13)$$

где: a_{sh} - ускорение подъема судна;

g - гравитационное ускорение .

Архимедова сила определяется водоизмещением корпуса, а инерционная сила равна:

$$F_I = -\lambda * m * a_{sh}, \quad (14)$$

где: λ - коэффициент присоединенных масс, описываемый формулой :

$$\lambda = \frac{B_{sh}}{12 * T_{sh} * \Delta_{sh}}, \quad (15)$$

где: B_{Sh} - ширина судна;

T_{Sh} - осадка судна;

Δ_{Sh} - запас воды под корпусом.

Из уравнения (14) имеем :

$$a_{sh} = \frac{F - m * g}{m * (I + \lambda)}, \quad (16)$$

Преобразуя формулу (11) , получим:

$$\Delta y = V_0 * \Delta t + \frac{a_{sh} * \Delta t^2}{2}, \quad (17)$$

где: Δy - вертикальное смещение судна за Δt ;

Δt - шаг по времени;

Vo— скорость подъема-опускания судна при движении.

Качка судна в диаметральной плоскости описывается уравнением :

$$\sum M = J_y * \varphi''(t), \quad (18)$$

где J_y - момент инерции ;

φ - угол крена судна;

ΣM_I - суммарный момент, действующий на судно:

$$\sum M = M_y - M_I, \quad (19)$$

где: M_y — кренящий момент ;

M_I — присоединенный момент инерции:

$$M_I = J_I * \lambda * \varphi''(t) \quad (20)$$

Интегрируя формулу (18), получим:

$$\varphi''(t) = \frac{M_y}{J_Y * (I + \lambda)}, \quad (21)$$

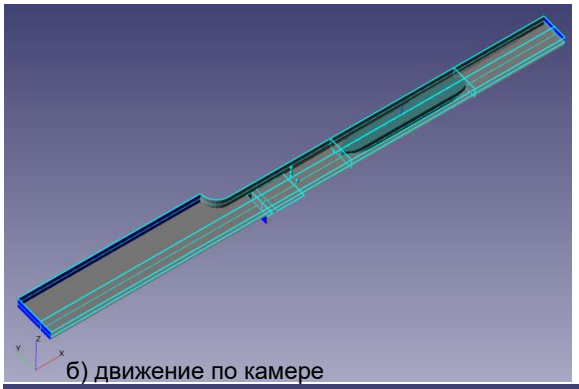
$$\Delta\varphi = \varphi'(t) * \Delta t + \frac{\varphi''(t) * (\Delta t)^2}{2}, \quad (22)$$

где : $\Delta\varphi$ - крен судна за время Δt;

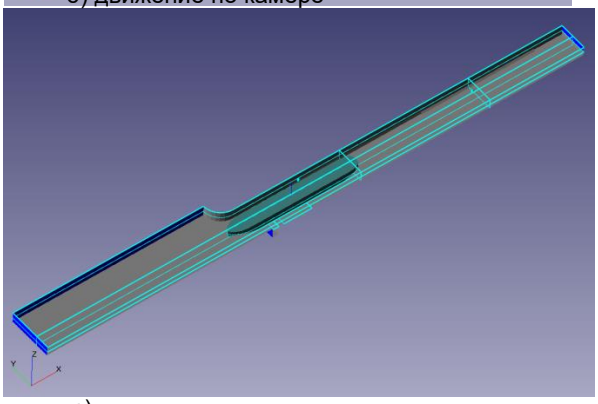
$\varphi'(t)$ - угловая скорость крена судна.

Вертикальное смещение судна и его кренящий момент пересчитываются после каждого обновления поля гидродинамических величин. Затем, сообразно этим величинам выполняется изменение расчетной области для потока. В результате следующий расчет гидродинамических полей выполняется в измененной области. Такие циклы расчетной процедуры выполняются вплоть до того момента, пока судно не покинет расчетную область (см. рис. 5).

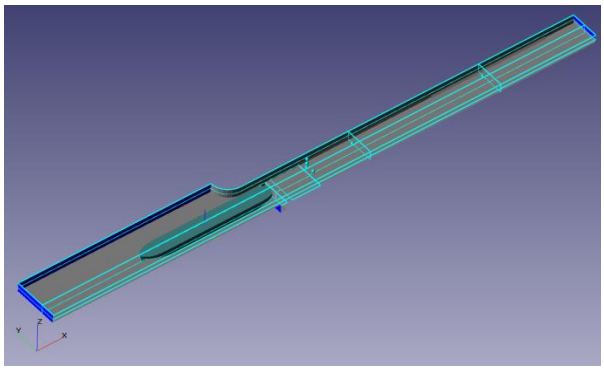
а) начальное положение



б) движение по камере



с) выход из камеры



д) выход из расчетной области

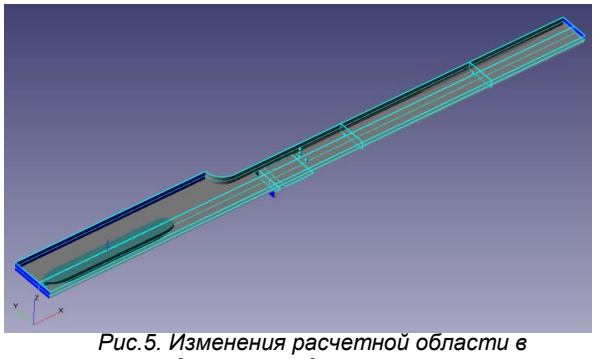


Рис.5. Изменения расчетной области в процессе движения судна из камеры

2.Результаты расчетов и практическая апробация

Разработанная модель была апробирована при исследовании гидродинамических полей вокруг корпуса судна, выходящего из камеры Чайковского шлюза при максимальной глубине 3.3м и начальном запасе воды под корпусом 0.4 м. Основной целью исследований был анализ просадки судна типа «Волго-Дон» при натурном графике скорости выхода судна из камеры вследствие влияния гидродинамических полей, формирующихся вокруг корпуса.

На рис. 6 приведен график изменения положения центра тяжести судна при его перемещении по камере шлюза. По горизонтальной оси отложено пройденное расстояние, при этом начальная точка отсчета находится на выходе из шлюза (в конце подходного канала), поэтому конечная координата при движении уменьшается. По вертикали отложена условная отметка свободной поверхности воды. Положение спокойного горизонта свободной поверхности соответствует отметке 11,60 м.

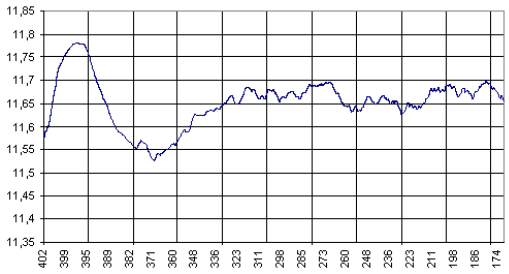


Рис.6 Просадка судна при движении по шлюзу

Максимальная просадка судна наблюдается после прохождения 32 м (координата 368 м) и составляет 8 см. К этому моменту судно заканчивает свой разгон из стационарного состояния и начинает двигаться с постоянной скоростью. В результате предпосылки к формированию «бенк» эффекта исчезают и происходит выравнивание положения судна под действием поля гидростатических и гидродинамических сил. По мере стабилизации скорости судно начинает «всплывать». Это связано с тем, что под корпусом аккумулируются массы воды, не успевающие перетечь из камеры в подходной канал. В результате отметка поверхности воды возрастает и водная подушка «приподнимает» судно, увеличивая запас под корпусом, который в среднем достигает 45 см. Такая картина наблюдается вплоть до полного выхода судна из камеры шлюза (координата 270 м).

При прохождении судном участка камеры шлюза, где расположены выходы галерей опорожнения, судно «проседает» (координата 260 м). Выход галерей представляет собой углубление в дне канала глубиной 8 м. (см. рис. 2). По мере прохождения судном углубления наблюдается уменьшение запаса воды под днищем. Резкие изменения уровней на графике связаны с прохождением и отражением системы волн от стен и дна камеры и корпуса судна с учетом интерференции волн на поверхности воды. Вид волновой поверхности приведен на рис. 7.

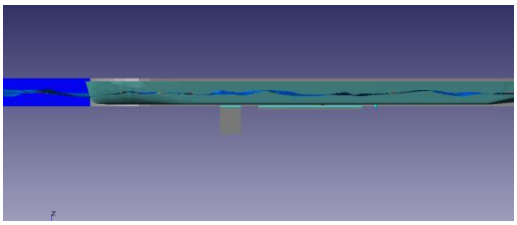


Рис. 7. Свободная поверхность при прохождении судном выхода галерей

При прохождении порога камеры цилиндрической частью корпуса судна запас воды под днищем начинает снова увеличиваться, что связано с изменением поля давлений между плоскодонной частью корпуса и сложными обводами кормы, а так же прохождением над углублением на выходе водопроводных галерей.

Таким образом, как видно из рис.6 наиболее опасным для корпуса с осадкой 3,3 м и начальным запасом 0,4 м является момент времени, когда скорость движения судна становится постоянной, т.е. заканчивается процесс разгона судна. Когда расстояние между корпусом судна и дном шлюза становится менее 0,33 м при осадке менее 3,2 м может возникнуть «бенк» эффект подсоса корпуса судна к дну камеры и соответственно произойти касание и удар.

Заключение

Полученные решения с использованием разработанных методических подходов на примере выхода судна типа “Волго-Дон” из Чайковского шлюза показывают, что безопасный скоростной режим, обеспечивающий прохождение корпуса через шлюз и его лимитирующий участок – порог камеры, возможен при следующих условиях: при получении разрешения на выход из камеры судно, отходя от стены, постепенно увеличивает скорость. При этом на подходе к порогу на выходе из камеры судно имеет скорость до 0,2 м/с; при выходе из камеры скорость судна возможна до 0,65 м/с; при движении по каналу судно может развить скорость до 0,8 м/с. Такие решения учитывают также просадку корпуса судна в стесненных условиях и подтверждаются практикой прохождения судов через рассматриваемый шлюз.

Развернутый анализ гидродинамических полей вблизи судна позволяет определять безопасные режимы движения на участке пути с лимитирующими параметрами и предотвратить потенциально возможные аварийные ситуации для судов.

Литература

1. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.E. Welch, //- Phys. Fluids, 1982, №8, pp 2182-2187.
2. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries /C. W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
3. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D. B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269- 289.
4. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows- 1979, v. 1, pp. 25-31.
5. Schlichting, H. Boundary Layer Theory / Schlichting, Ш/. 6th Edition, McGraw-Hill, New York, - 1968, 90p.
6. . Липатов И.В, Торенц К.. Численное моделирование волновых процессов в нижнем бьефе Нюрнбергского шлюза. // Сборник трудов «Великие реки 2005». Н.Новгород : ННГАСУ, - 372-373 с.
7. Липатов И.В. Липатов И.В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений. – Монография/ – Н.Новгород: Издательско-полиграфический комплекс ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 97 с.
8. Lipatov, I.V. Untersuchungen fun ein kombiniertes beschleunigtes Schleusen kammer full system /I.V.Lipatov// - B AW - Karlsruhe 1997, p 37

References

1. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.E. Welch, //- Phys. Fluids, 1982, №8, pp 2182-2187.
2. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries /C. W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
3. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D. B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269- 289.
4. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows- 1979, v. 1, pp. 25-31.
5. Schlichting, H. Boundary Layer Theory / Schlichting, Ш/. 6th Edition, McGraw-Hill, New York, - 1968, 90p.
6. Lipatov I.V. Chislennoye modelirovaniye volnovykh protsessov v Nizhnem B'yefe Nyurnbergskogo shlyuza./ I.V. Lipatov, K.Torents // «Velikiye reki 2005». N.Novgorod : NNGASU, - 372-373 s.
7. Lipatov I.V. Gidrodinamika rechnykh potokov i yeye vliyaniye na ekspluatatsionnyye parametry sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. – Monografiya/ I.V. Lipatov. – N.Novgorod: Izdatel'sko poligraficheskiy kompleks FGOU VPO VGAVT, 2006. – 97 s.
8. Lipatov, I.V. Untersuchungen fun ein kombiniertes beschleunigtes Schleusen kammer full system /I.V.Lipatov// - B AW - Karlsruhe 1997, p 37

УДК 534.231

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ ВОЛНОВОДАХ МЕЛКОГО МОРЯ

Дмитрий Олегович Владецкий
кандидат технических наук, доцент кафедры судовой энергетики и электрооборудования
филиала ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь,
299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, e-mail: sevgmu@ya.ru
Виктор Александрович Лисютин
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальных дисциплин
филиала ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь,
299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22
Александр Александрович Ярошенко
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальных дисциплин
филиала ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь,
299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22
Виталий Гаврилович Савельев
доктор технически наук, профессор,
генеральный директор ООО «Лазерные инновационные технологии»,
119991, город Москва, улица Вавилова, 38, корп. 1
e-mail: v.savelyev@lasintech.ru

Аннотация

В статье рассмотрены методы расчета полей давления в горизонтально-слоистых волноводах, осложненных задачей моделирования поля вектора интенсивности. Вследствие опережающего развития техники измерений образовался разрыв между измерительным потенциалом и возможностями осмысления результатов измерений, основанных на возможностях моделирования векторных акустических полей. В работе приводятся результаты моделирования векторного поля потока мощности в многомодовом горизонтально-слоистом волноводе мелкого моря. Моделирование поля потока мощности осуществляется «по определению», как произведение полей давления и компонент поля вектора колебательной скорости. Поля давления и колебательной скорости вычисляются методом нормальных волн. Анализируется структура поля давления, поля колебательной скорости и разностно-фазовые соотношения между полями давления и колебательной скорости в окрестности особой точки в случае распространения в волноводе двух первых мод. Устанавливаются причины возникновения особых точек – центров и седел. Устанавливается качественная связь между физическими и акустическими характеристиками слоистого дна и пространственным расположением особых точек поля потока мощности при многомодовом характере распространения звука.

Ключевые слова: гидроакустический волновод, мелкое море, поле давления, поле колебательной скорости, волновод Пекериса, поле потока мощности, сингулярные точки.

SIMULATING OF VECTOR INTENSITY FIELDS IN HORIZONTAL LAYER WAVEGUIDES OF THE SHALLOW WATER

Dmitry O. Vladetskiy
Candidate of technical sciences, lecturer of marine engineering department
of Sevastopol branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»,
299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation
Victor A. Lisiutin
Candidate of technical sciences, lecturer of fundamental disciplines department
of Sevastopol branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»,
299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation
Alexander A. Yaroshenko
Doctor of physical and mathematical sciences, head of fundamental disciplines department
of Sevastopol branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»,
299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation
Vitaliy G. Savelyev
Doctor of of technical sciences, professor, General Director of LASINTECH,
119991, Vavilov st., 38-1, Moscow, Russian Federation
e-mail: v.savelyev@lasintech.ru

Abstract

The results of the simulation of the power flux vector field in a multimode horizontally layered waveguide of the shallow sea are presented. Due to the advanced development of measurement techniques, a gap appeared between the measurement potential and the possibilities of understanding the measurement results based on the possibilities of modeling vector acoustic fields.The simulation of

the power flux field is carried out "by definition", as a product of pressure fields and field components of the vibrational velocity vector. Fields of pressure and vibrational velocity are calculated by the method of normal waves. The structure of the pressure field, the field of the vibrational velocity, and the difference-phase relations between the pressure fields and the vibrational velocity in the neighborhood of the singular point are analyzed in the case of propagation in the waveguide of the first two modes. The causes of the emergence of special points - centers and saddles - are established. A qualitative relationship is established between the physical and acoustic characteristics of the layered bottom and the spatial arrangement of the singular points of the power flux field in the multimode nature of sound propagation.

Key words: hydroacoustic waveguide, shallow water, pressure field, particle velocity field, Pekeris waveguide, vector intensity field, singular points.

Введение

В акустике океана, скалярным полем называют поле акустического давления, а векторными – поля вектора колебательной скорости (КС) и вектора плотности потока мощности (интенсивности) [1 - 4]. Вследствие многомодового характера распространения звука в волноводах возникают особые точки, где горизонтальная и вертикальная составляющие вектора интенсивности равны нулю. Между особыми точками поля генеральное направление тока энергии в волноводе изменяется на обратное [1,2,5].

В настоящее время все пассивные гидроакустические станции освещения подводной обстановки, кроме датчиков давления, оснащаются еще и датчиками колебательной скорости.

Убеждение, что исследование кроме «скалярного» поля давления, так же и «векторного» поля КС, энергетических и фазовых характеристик полей вызовет значительный прогресс в общем понимании структуры акустических полей в средах, способствовало успешному развитию техники и методов векторно-фазовых измерений [3,4]. К настоящему времени апробированы в натурных условиях технические средства, методы и методики измерений скалярно-векторных характеристик естественных акустических полей, что в принципе дает возможность извлечения дополнительной информации о среде, в которой распространяются волны [3,4]. Однако, вследствие опережающего развития техники измерений образовался разрыв между измерительным потенциалом и возможностями осмысления результатов измерений, основанных в конечном итоге на возможностях моделирования векторных акустических полей.

Методы расчета полей давления в горизонтально-слоистых волноводах хорошо разработаны, однако, задача моделирования поля вектора интенсивности усложнена тем, что для его нахождения помимо акустического давления требуется знание поля КС.

Постановка задачи и ее решение

В случае многомодового характера распространения звука, поле потока мощности $\mathbf{I}(r,z)$ в волноводе может быть вычислено «по определению», как произведение поля давления и компонент поля колебательной скорости [1,2]

$$I_{r,z} = \frac{1}{2} Re(p^* u_{r,z}) = \frac{1}{2} |pu_{r,z}| \cos(\arg(p) - \arg(u_{r,z})), \quad (1)$$

где p, u_r, u_z - комплексные амплитуды давления и соответствующей компоненты КС, * – символ комплексного сопряжения.

Наиболее просто поле КС может быть вычислено в виде суммы мод горизонтальной и вертикальной компонент КС. Поле КС отдельной нормальной волны можно получить, используя дифференциальную связь между горизонтальной u_r и вертикальной u_z компонентами КС и акустическим давлением $p(r,z)$ [1 - 4]:

$$u_z = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p(r,z)}{\partial z}, u_r = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p(r,z)}{\partial r}. \quad (2)$$

Комплексная амплитуда поля акустического давления в водном слое в виде суммы мод может быть записана в виде

$$p = \sum_{l=1}^{l_m} p_l(r,z) = \sum_{l=1}^{l_m} Q_l p_l(z) H_0^{(1)}(\xi_l r), \quad (3)$$

где l_m – максимальный номер моды, $p_l(z)$ - вертикальные профили мод, ξ_l – горизонтальное волновое число, Q_l - коэффициенты возбуждения мод. Тогда с помощью (1) поля компонент КС могут быть представлены в виде

$$u_r(r,z) = \frac{-i}{\omega\rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} u_{rl}(r,z) = \frac{-i}{\omega\rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} Q_l p_l(z) \xi_l H_1^{(1)}(\xi_l r), \quad (4)$$

$$u_z(r,z) = \frac{-i}{\omega\rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} u_{zl}(r,z) = \frac{-i}{\omega\rho^2 c} \sum_{l=1}^{l_m} Q_l \frac{\partial p_l(z)}{\partial z} H_0^{(1)}(\xi_l r). \quad (5)$$

Вычисляя горизонтальные волновые числа и профили мод, например, с помощью программы «KRAKENC» и осуществляя численное дифференцирование, нетрудно получить поле отдельной моды $u_z(z,r)$. Вычисляя далее в соответствии с (3) – (5) полные поля давления и компонент КС, а затем, перемножая в соответствии с (2), можно получить поле потока мощности при любом числе мод.

Особые точки вектора интенсивности

Классификации особых точек посвящена работа [5]. Нетрудно получить, используя (1), что сингулярные точки поля вектора интенсивности $\mathbf{I}(r,z)$ в точке (r_0, z_0), могут быть в любой из следующих ситуаций:

1) $Re(p(r_0,z_0)) = Im(p(r_0,z_0)) = 0$;

2) $Re(u_r(r_0,z_0)) = Im(u_r(r_0,z_0)) = 0$,

$Re(u_z(r_0,z_0)) = Im(u_z(r_0,z_0)) = 0$;

3) фаза давления и колебательной скорости в точке (r_0, z_0) отличаются на нечетное число π/2; 4) комбинация двух предыдущих случаев.

Показано [5], что для сингулярная точка – центр, только если это ноль давления, а седловая – если это ноль колебательной скорости, или точка в который фазы скорости и давления отличаются на нечетное число π/2.

Простейшей моделью является волновод с абсолютно отражающими границами. Анализу поля потока мощности в идеальном волноводе посвящена обстоятельная работа [2]. Однако, в [2] поле потока анализируется в случае распространения только 2-х мод: 3-й и 4-й или 1-й и 10-й. Ниже рассматривается случай распространения в идеальном волноводе 1-й и 2-й моды. Поле давления в водном слое в виде суммы мод может быть записано в виде (отбрасывая несущественные коэффициенты)

$$p(r,z) == \sum_{l=1}^{l_m} \sin(b_l z_s)\sin(b_l z) H_0^{(1)}(\xi_l r),$$

где b_l – вертикальное волновое число. С помощью (1) поля составляющих КС могут быть представлены в виде

$$u_r(r,z) = \frac{i}{\omega\rho^2 c} \times \times \sum_{l=1}^{l_m} \sin(b_l z_s)\sin(b_l z)\xi_l H_1^{(1)}(\xi_l r),$$

$$u_z(r,z) = \frac{-i}{\omega\rho^2 c} \times \times \sum_{l=1}^{l_m} \sin(b_l z_s)\cos(b_l z) b_l H_0^{(1)}(\xi_l r).$$

Рассмотрим на рис.1 поле вектора интенсивности. Яркость и цвет пропорционален абсолютной величине поля, стрелками указано направление вектора потока. Частота 57 Гц, 2 моды. Отчетливо видны особые точки – центры и седла. Пространственная периодичность особых точек определяется разностью горизонтальных волновых чисел (ξ_1-ξ_2)r=nπ, n=1,2..., откуда при ξ_1≈0.225 м$^{-1}$, ξ_2≈0.039 м$^{-1}$ можно получить r_1≈17 м, r_2≈34 м, r_2≈51 м, Для детального выяснения «акустической» природы особых точек, рассмотрим на рис.1, справа, «типичную» пару, отмеченную рамкой на панораме.

На увеличенном фрагменте видны два нуля абсолютной величины интенсивности. Снизу – центр, вокруг которого образуется вихрь потока, сверху – седло, где отмечены линии кроссирования потока. Между центром и седлом направление потока – обратное. На разрезе поля по линии А-А видно, что центр – это точка, где $|p|$=0. Из вертикального разреза слева, при тщательном рассмотрении, видно, что в седловой точке $|u_r|$≠0 и $|u_z|$≠0. На вертикальном разрезе справа – разности фаз между давлением и составляющими КС. В седловой точке и arg(p) – arg(u_r)=90º и arg(p) – arg(u_z)=90º, вследствие чего и образуется нуль интенсивности. Кроме того, от седловой точки и до поверхности l_z=0.

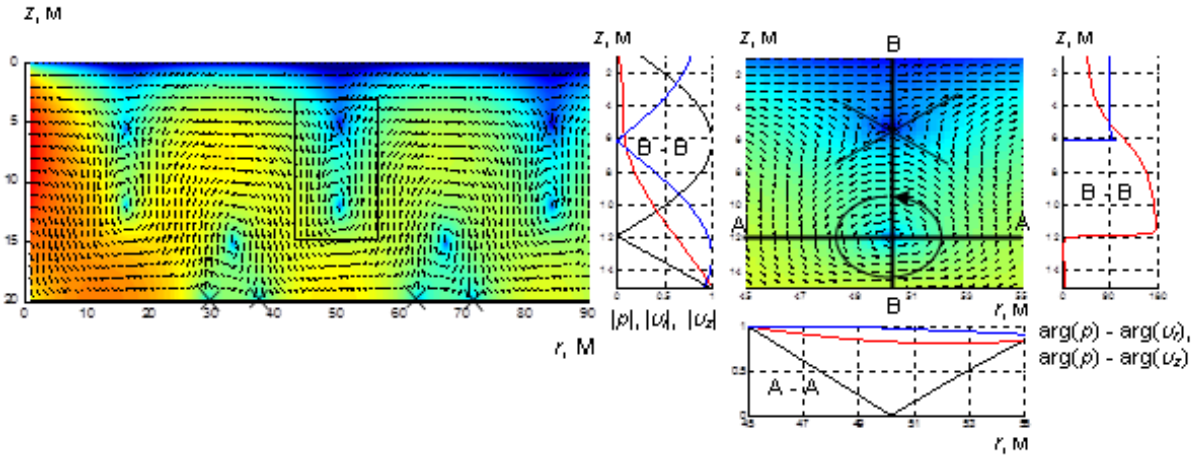


Рис.1. Структура поля активного потока мощности в идеальном волноводе (слева) и особые точки (цвета: черный – $|p|$, красный - $|u_r|$, синий - $|u_z|$)

Структура поля вектора интенсивности

Графически поле вектора интенсивности изображают линиями тока энергии (streamlines).

Рассмотрим «одномодовый» идеальный волновод с глубиной h=20 м, частота f=50 Гц, источник – на глубине z_s=10 м. На рис. 2, сверху – яркостная картина поля акустического давления и линии тока активной и реактивной составляющих потока мощности. Линии тока активной энергии направлены горизонтально вдоль оси волновода и ортогональны к линиям постоянной фазы. Линии тока реактивной энергии ортогональны к линиям равного уровня звукового давления. На рис.2, снизу – нормированные горизонтальные и вертикальные компоненты потоков Ф активной I и реактивной Y мощности, т.е. $\Phi_r^A(r) = 2\pi r \int_0^h I_r(r)dz / \Phi(r=1)$ – красная сплошная линия,

$\Phi_r^R(r) = 2\pi r \int_0^h Y_r(r)dz / \Phi(r=1)$ – красная пунктирная линия, $\Phi_Z^A(r) = 2\pi r \Delta r \int_0^h I_Z(r)dz / \Phi(1)$, $\Phi_z^R(r) = 2\pi r \Delta r \int_0^h Y_Z(r)dz / \Phi(1)$.

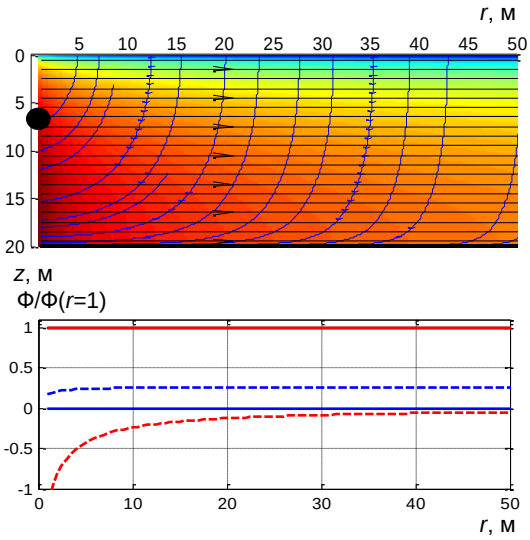


Рис.2. Идеальный волновод. Сверху - яркостная картина звукового давления и линии тока активной (черная линия) и реактивной (синяя линия) энергии. Снизу – поток активной (сплошная линия) и реактивной (пунктирная линия) энергии в зависимости от расстояния. Красная линия – горизонтальная, синяя – вертикальная компоненты

Величины $\Phi_r^A(r)$, и $\Phi_r^R(r)$ имеют смысл потока активной и реактивной мощности через образующую цилиндра с высотой равной глубине водного слоя на расстоянии r от источника. Величины $\Phi_z^A(r)$ и $\Phi_z^R(r)$ имеют смысл вертикального потока активной и реактивной мощности через кольцевую площадку размера $2\pi r\Delta r$, где Δr – шаг дискретизации по расстоянию.

Как видно из рисунка, $\Phi_r^A(r)$ – постоянно, и не зависит от расстояния, $\Phi_z^A(r) = 0$, что показывает выполнение закона сохранения энергии для волновода с идеально отражающими границами. Однако, реактивные потоки мощности оказываются не равны нулю, что соответствует волноводу с азимутальной симметрией.

Рассмотрим теперь распространение одной моды в волноводе Пекериса (изоскоростной водный слой и дно в виде полупространства с поглощением), глубина водного слоя 20 м, частота 50 Гц. На рис. 3, сверху – яркостная картина поля давления (аналогично рис. 2) и линии тока активной и реактивной составляющих потока мощности. Линии тока активной энергии имеют наклон в сторону дна, возрастающий с увеличением глубины (рис. 3, сверху, черная линия). В соответствии с законом распределения звукового давления по глубине, максимум давления на данной частоте оказывается «приподнятым» над дном (в идеальном волноводе – строго на дне), поэтому обратный ток реактивной энергии (рис.3, сверху, синяя линия) осуществляется не вдоль дна, а в водном слое. Утечка энергии в дно приводит к снижению величины активного потока мощности (рис.3, снизу, красная сплошная линия), вертикальный поток активной мощности не равен нулю, проекция вектора потока положительна.

Рассмотрим на рис.4, сверху, картину линий тока активной энергии в случае распространения двух мод в волноводе Пекериса, частота 120 Гц. Линии тока можно разделить на приповерхностные, слабые, где направление тока энергии почти прямолинейно, и срединные, с зигзагообразным направлением тока между приповерхностным и донными вихрями. На первых ста метрах происходит стекание энергии в направлении дна, в дальнейшем формирующее «придонный» поток, струи которого периодически проникают в дно, заворачивают вверх и частично возвращаются в водный слой, при этом общий поток активной энергии в водном слое постепенно снижается. Верхняя группа особых точек постепенно приближается к поверхности и по мере «высвечивания» второй моды вырождается, нижняя группа особых точек постепенно выходит из водного слоя и заглубляется в полупространство.

На рис. 4, снизу – линии тока энергии в волноводе с положительным градиентом скорости звука (приповерхностный звуковой канал, модель дна – промежуточный слой с градиентом фазовой скорости и потерь, ниже – полупространство) и многомодовый характер распространения звука (26 мод).

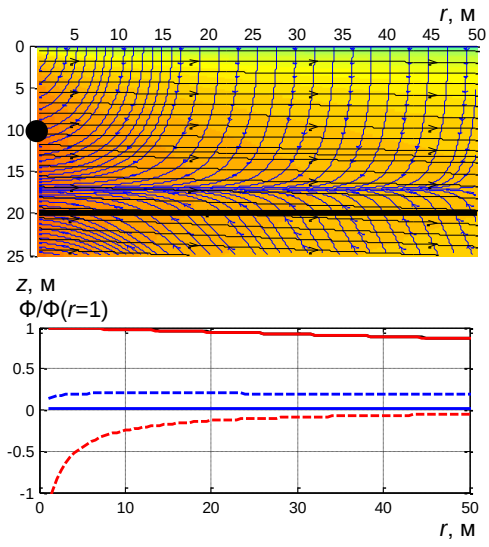


Рис.3. Волновод Пекериса. Сверху - яркостная картина звукового давления и линии тока активной (черная линия) и реактивной (синяя линия) энергии. Снизу – поток активной (сплошная линия) и реактивной (пунктирная линия) энергии в зависимости от расстояния. Красная линия – горизонтальная, синяя – вертикальная компоненты

На этой частоте уже формируется лучевая структура акустического поля и ток энергии направлен вдоль лучей с концентрацией энергии в первой зоне конвергенции. В зонах акустической тени – множественные вихри. Донный промежуточный слой предполагается состоящим из ила. Градиент скорости звука в иле невелик, и заворота луча в промежуточном слое не происходит. Акустическая энергия, распространяющаяся в промежуточном слое постепенно затухает.

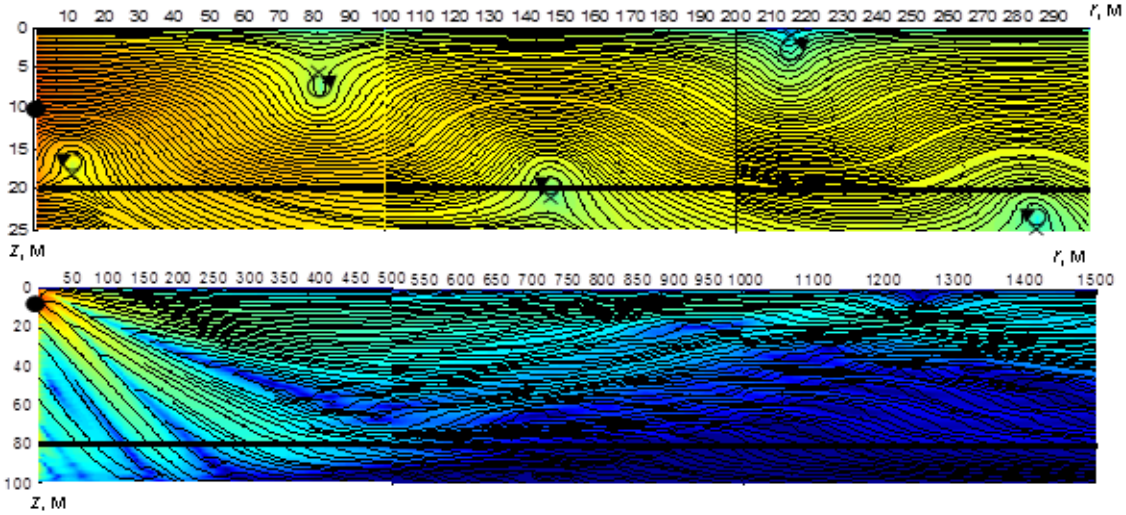


Рис.4. Структура поля активного потока мощности в волноводе Пекериса (а) и в волноводе с промежуточным слоем в виде ила (б) и песка (в) при многомодовом характере распространения (26 мод)

Заключение

Представленный численно-аналитический метод моделирования полей потоков мощности показывает хороший результат во всем частотном диапазоне, доступном для «волновых» расчетов. Моделирование возможно осуществлять для произвольных профилей скорости звука и различных моделей слоистого дна.

Структура линий тока вектора интенсивности в многомодовых волноводах сложна, и сильно зависит от частоты и профиля скорости звука. При распространении только двух мод пространственное расположение вихрей вполне упорядочено. В случае многомодового характера распространения «засветка» волновода полем со сплошным спектром волновых чисел препятствует образованию вихрей на малых расстояниях от источника. С ростом дистанции высшие моды постепенно «высвечиваются», вихри вырождаются, и направление тока энергии все более упорядочивается. На высоких частотах, при формировании лучевой картины поля, токи энергии в освещенных зонах направлены вдоль лучей, в зонах тени – множественные вихри. Характерный пространственный размер вихря составляет немного более 0.1λ.

Литература

1. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. – 307 с.
2. Елисеевнин В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. – 2001. – Т. 47, № 6. – С. 781 – 788.
3. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структуры потока мощности от локальных источников в мелком море // Акуст. журн. – 2016. – Т. 62, № 3. – С. 318-329.
4. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Пространственное затухание различных составляющих звуковых полей в водном слое и в осадках мелкого моря // Акуст. журн. – 2017. – Т. 63, № 6. – С. 781 – 788.
5. Chien C.F. Singular points of intensity in two-dimentional sound fields / C.F. Chien, R.V. Waterhouse // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – v. 101, N 2. – P. 705 – 712.

References

1. Shchurov V.A. Vektornaya akustika okeana [Vector acoustics of the ocean]. Vladivostok: Dal'nauka, 2003, 307.
2. Eliseevnin V. A., Tuzhilkin Yu. I. (2001). Acoustic Power Flux in a Waveguide. Acoustical Physics (47), 6, 688-694.
3. Belova N. I., Kuznetsov G. N., and Stepanov A. N. (2016). Experimental Research of the Interference and Phase Structure of the Power Flux from a Local Source in Shallow Water. Acoustical Physics (62), 3, 328-338.
4. Belov A. I., Kuznetsov G. N. (2017). Spatial Attenuation of Different Sound Field Components in a Water Layer and Shallow-Water Sediments. Acoustical Physics (63), 6, 652-659.
5. Chien C.F. (1997). Singular points of intensity in two-dimentional sound fields. J. Acoust. Soc. Am. (101), 2, 705 – 712.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 658.562.012.7

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ РИСКАМИ ВЕРФИ

Оксана Алексеевна Паутова
Аспирант кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: oksanushka7891@yandex.ru
Евгений Геннадьевич Бурмистров
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru
Иван Николаевич Лучков
Аспирант кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru
Виктор Иванович Любимов
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Аннотация

В статье отмечается, что эффективным инструментом для повышения качества продукции, совершенствования производства и обеспечения конкурентоспособности верфей является управление производственными рисками. Указывается, что управление производственными рисками должно основываться на концепции приемлемости риска, то есть на возможности воздействия на уровень риска, доведения его до приемлемого значения и поддержания этого уровня в допустимых пределах.

С учётом отмеченного, в статье предложен разработанный авторами алгоритм системы управления производственными рисками на судостроительной верфи. Дано описание блоков алгоритма. Описано взаимодействие субъекта и объекта управления в рамках системы управления производственными рисками. Приведён реестр производственных рисков верфи, причин их возникновения и мероприятий по снижению.

Алгоритм является базой для разработки модели системы управления производственными рисками и интегрированного в АСУ верфи программного комплекса.

Ключевые слова: судостроительная верфь, производственные риски, процесс управления производственными рисками, алгоритм системы управления производственными рисками.

PRODUCTION RISK MANAGEMENT SYSTEM ALGORITHM OF A SHIPYARD

Oksana A. Pautova
Postgraduate student of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: oksanushka7891@yandex.ru
Evgeny G. Burmistrov
Professor, Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru
Ivan N. Luchkov
Postgraduate student of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Viktor I. Lyubimov
Professor, Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Abstract

The article notes that an effective tool for improving product quality, improving production and ensuring the competitiveness of shipyards is production risk management. It is stated that production risk management should be based on the concept of risk acceptability, that is, on the possibility of influencing the level of risk, bringing it to an acceptable value and maintaining this level within acceptable limits.

Taking into account the above, the article proposed an algorithm, developed by the authors, of the production risk management system at a shipyard. A description of the algorithm blocks is given. The interaction of the subject and the control object within the framework of the production risk management system is described. A register of the shipyard's production risks, their causes and mitigation measures is given.

The algorithm is the basis for development of a model of a production risk management system and a software package integrated into the industrial-control system of a shipyard.

Keywords: shipyard, production risks, production risk management process, production risk management system algorithm.

Введение

В современных условиях судостроительная верфь должна непрерывно поддерживать свою конкурентоспособность. Для этого необходимо, непрерывно анализируя требования заказчиков и поддерживая производственные процессы в управляемом состоянии, стремиться к повышению качества продукции и к совершенствованию производства. Управление производственными рисками [1] является эффективным инструментом для достижения этих целей.

Управление производственными рисками должно основываться на концепции приемлемости риска, то есть на возможности воздействия на уровень риска, доведения его до приемлемого значения и поддержания этого уровня в допустимых пределах. Очевидно, что система управления производственными рисками на верфи, как любая человеко-машинная система, должна состоять из объекта и субъекта управления. В качестве управляемого объекта могут выступать: сама верфь, принятые на ней технологические процессы, информационные потоки, рабочие и служащие и т.д. Управляемой переменной является расчётная величина, то есть уровень значимости риска. Управляющие процедуры разрабатываются субъектом управления, в качестве которого на верфи может выступать специализированное структурное подразделение или экспертная комиссия из собственных и(или) приглашённых специалистов. Субъект управления, анализируя поступающую исходную информацию о состояния производства и используя известные методы управления риском [2], разрабатывает мероприятия, направленные на снижение уровня риска или поддержание его в допустимых пределах.

Ниже описан разработанный авторами алгоритм системы управления производственными рисками и приведены необходимые пояснения.

Алгоритм системы управления производственными рисками

Алгоритм процесса управления производственными рисками представлен блок-схемой, приведённой на рисунке 1.

Грамотное управление производственными рисками, во-первых, предполагает их идентификацию и систематизацию.

В Блоке 1 «Идентификация рисков» данной схемы отражён процесс распознавания и определения производственных рисков, источниками которого могут быть итоги надзорных проверок, внутренних и внешних аудитов, сообщения работников верфи и др. Собственно идентификация рисков является основным элементом системы управления рисками. В неё входят два этапа: 1) обнаружение риска – представляет собой процесс выявления подверженности производственной деятельности рискам, что предполагает наличие полной информации о функционировании верфи; 2) описание риска – структурированная характеристика идентифицированных рисков [1].

На верфи назначается ответственный руководитель системы управления производственными рисками, создаются рабочие экспертные группы из работников предприятия, которые проводят предварительную идентификацию рисков методом мозгового штурма. Формируется реестр производственных рисков, который дополняется при возникновении новых производственных рисков.

В качестве примера ниже представлен реестр производственных рисков верфи, причин их возникновения и мероприятий по снижению (табл. 1).

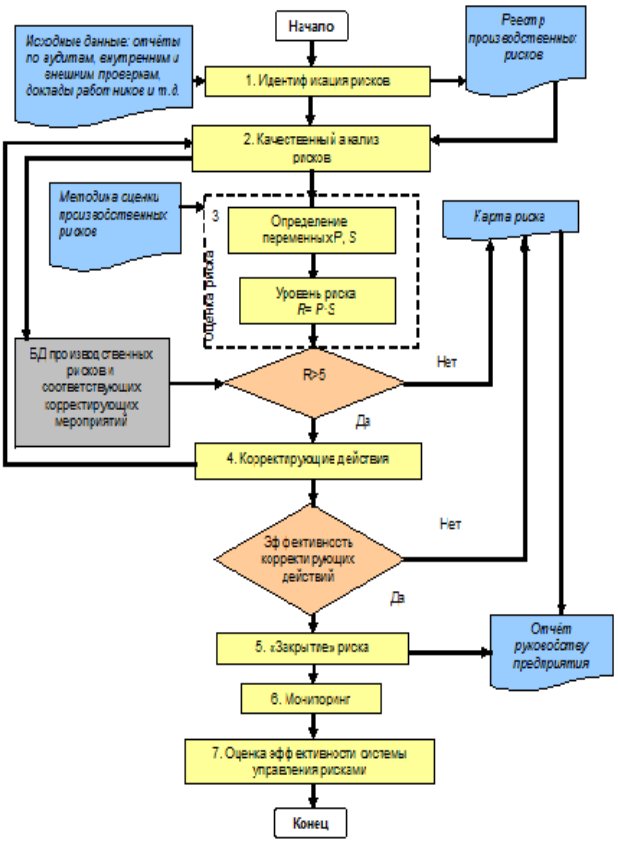


Рис. 1. Алгоритм системы управления производственными рисками

Таблица 1

Реестр производственных рисков верфи, причин их возникновения и мероприятий по снижению

Наименование риска	Причины возникновения риска	Мероприятия по снижению риска
Несоответствие КД требованиям заказчика	1. Несвоевременное внедрение изменений 2. Разработчик КД – сторонняя организация	1. Постоянная сверка действующей КД на соответствие ТЗ 2. Проработка КД службами 3. Своевременные запросы на уточнение КД
Несоответствие НД требованиям заказчика	Несвоевременное внедрение НД	Составление перечня НД и его актуализация
Нарушение технологического процесса производства	1. Ошибка исполнителя 2. Недостаточная квалификация персонала 3. Некачественный или несоответствующий инструмент, оснастка	1. Обучение персонала 2. Детальная проработка технологического процесса 3. Контроль инструмента, оснастки
Новые технологии	Отсутствие опыта применения нового техпроцесса	1. Обучение персонала 2. Отработка изготовления на образцах
Недостаток производственных мощностей	1. Физический и моральный износ оборудования 2. Поломки или простой оборудования 3. Потери рабочего времени 4. Недостаточная квалификация персонала 5. Несовершенство технологического процесса или завышенная трудоемкость	1. Приобретение нового оборудования в соответствии с графиком закупки оборудования 2. Капитальный ремонт оборудования 3. Расширение производственных мощностей 4. Повышение уровня квалификации персонала 5. Оптимизация технологических процессов, оптимизация программ, снижение трудоёмкости за счёт использования нового инструмента и режимов обработки
Отсутствие необходимого инструмента	1. Несвоевременная поставка инструмента 2. Получение некачественного инструмента 3. Отсутствие альтернативного поставщика инструмента 4. Необходимость использования специализированного инструмента	1. Обновление общезаводской базы наличия инструментов 2. Постоянный мониторинг ситуации в цехе 3. Сотрудничество с дилерскими центрами по подбору и приобретению инструмента 4. Составление прогнозов потребности в инструменте
Отсутствие или выход из строя оснастки	1. Износ 2. Ошибки при проектировании и изготовлении 3. Отсутствие контроля	1. Периодическая проверка и ремонт приспособлений 2. Контроль на образцах

В Блоке 2 «Качественный анализ рисков» реализуется процесс анализа рисков, позволяющий определить типы рисков, которые оказывают наибольшее воздействие на деятельность верфи и используются как база для количественного анализа. В процессе качественного анализа рисков формируются базы данных производственных рисков и соответствующих возможных корректирующих мероприятий.

В Блоке 3 «Оценка риска» реализуются процедуры выполнения количественной оценки уровня значимости производственного риска. Количественный анализ проводится с использованием статистических, и аналитических методов, метода экспертных оценок и др. Измерение

уровня значимости риска проводится с помощью специально разработанной программы, входящей в общую систему управления рисками на верфи. Суть данного этапа состоит в непосредственной оценке возможности наступления негативных событий [3].

Производственный риск рассматривается как мера измерения опасности с включением величины ущерба от влияния факторов опасности и вероятности возникновения этих фактора. Переменные «вероятность» и «ущерб» определяются количественно показателями «степени вероятности» P и «степени ущерба» S.

Уровень значимости риска R определяется как произведение этих двух величин по формуле:

$$R = P \cdot S .$$

Степень ущерба S определяется на основе допускаемого ущерба (K_{Si}) соответствующего рискового события по набору критериев по пятибалльной шкале. Далее проводится пересчёт экспертных оценок каждого события K_{Si} в степень ущерба S_i.

Пересчёт экспертных оценок каждого события K_{Si} в степень ущерба S_i осуществляется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

Перевод экспертных оценок в степень ущерба от риска

K_{Si}	1	2	3	4	5
S_i	1	4	8	16	32

Значение степени ущерба S_i определяется как реализация случайной величины S – ущерба от выражения совокупности факторов опасности. Данная оценка степени ущерба носит прогнозный характер.

Определение степени вероятности P проводится для каждого рискового события, и основано на регулярности повторения событий F. Частоту событий F следует определять в единицах событий на количество контрактов за период 10 лет или на количество построенных судов в течение 10 лет.

В таблице 3 представлены итоговые оценки исходя из количества рекламаций на количество построенных судов за 10 лет.

Таблица 3

Оценка частоты рискового события

Показатель «степени вероятности» P	Описательная характеристика P	Средние экспертные оценки частоты F
1	Крайне редко	**<0,3**
2	Редко	**0,3-10**
3	Периодически	**10-30**
4	Часто	**30-100**
5	Очень часто	**>100**

Оценивание производственных рисков может выполняться по универсальной матрице. При этом определяются уровни риска:

– пренебрегаемый, при $R<5$;

– приемлемый, при условии уменьшения $5 \le R \le 20$;

– недопустимый, при $R>20$.

Полученные значения R сравниваются с установленными уровнями.

Блок 4 «Корректирующие действия» представляет собой этап функционирования системы управления производственными рисками, основанный на дальнейшей обработке риска, т.е. работы по подбору и внедрению мер, направленных на изменение уровня риска [4]. Необходимые корректирующие действия выбираются из базы данных производственных рисков и соответствующих корректирующих мероприятий. Если действия по устранению или снижению уровня значимости риска эффективны, то риск «закрывают» (Блок 5). В противном случае данный риск пересматривается повторно экспертами при качественной оценке.

После проведения оценки значимости риска, информация поступает носителю риска в виде карты риска, где отражены причины возникновения риска и возможные корректирующие действия, позволяющие снизить уровень значимости риска, и сроки выполнения корректирующих действий. Кроме того, информация поступает руководителю системы управления рисками на верфи. Носитель риска отвечает за внедрение и управление корректирующих мероприятий по снижению уровня значимости риска.

В Блоке 6 «Мониторинг» реализуется процесс, осуществляемый в несколько стадий: постановка базовых параметров, по которым следует осуществлять оценку выполнения корректирующих мероприятий; создание системы определения и отслеживания состояния параметров контроля; установление размера отклонений фактических результатов рассматриваемых показателей от установленных; выявление основных причин отклонений фактических результатов от установленных базовых показателей.

В процессе контроля производственных рисков при необходимости обеспечивается изменение ранее принятых управляющих решений. Соответственно, на этапе контроля производственного риска важным моментом является оценка эффективности проведённых мероприятий, выполняющаяся в Блоке 7 «Оценка эффективности системы управления производственными рисками». Значительную роль при этом играет отчётная информация по рискам. На основании полученной отчётной информации оценивают эффективность использования определённых методов и инструментов системы управления рисками, а также общих затрат на их реализацию.

На основании представленного алгоритма разрабатывается модель системы управления производственными рисками. Модель предполагает дальнейшее развитие в программный продукт, предназначенный для идентификации производственных рисков судостроительной верфи, оценки, принятия и выполнения корректирующих мероприятий и оценивания эффективности их проведения.

Автоматизированная система управления рисками, спроектированная на основе модели и реализующая процесс управления, включает следующие элементы:

– базу данных информации о производственных рисках;

– базу данных информации о корректирующих действиях, проводимых ответственными исполнителями судостроительного предприятия;
– блок анализа рисков, в котором реализуются методы идентификации и анализа рисков;
– администратора, выполняющего контроль системы;
– прикладную программу, выполняющую определённые методы и алгоритмы идентификации и анализа рисков;
– интерфейс взаимодействия пользователя с прикладной программой и администратора с базами данных.

Разрабатываемая на основе алгоритма модель должна обладать следующими функциями:
– работать под управлением широко использующейся операционной системы ОС Windows;
– иметь доступный и простой интерфейс пользователя;
– иметь гибкую систему настроек;
– серверная часть должна хранить базу данных пользователей, имеющих доступ к системе;
– серверная часть должна хранить базу данных производственных рисков и корректирующих мероприятий, доступных для пользователей;
– серверная часть должна поддерживать соединение до 50 пользователей одновременно.

Заключение

Управление производственными рисками является эффективным инструментом для повышения качества продукции судостроения, совершенствования производства и обеспечения конкурентоспособности верфей. Управление рисками должно основываться на концепции приемлемости риска, то есть на возможности воздействия на его уровень, доведения этого уровня до приемлемого значения и поддержания достигнутого уровня в допустимых пределах.

С учётом отмеченного, предложен разработанный авторами алгоритм системы управления производственными рисками на судостроительной верфи. Дано описание блоков алгоритма.

Представленный алгоритм обеспечивает условия для реализации сложного комплекса системы управления производственными рисками верфи, назначением которой является реализация нового подхода к управлению качеством на судостроительном предприятии.

Алгоритм является базой для разработки модели системы управления производственными рисками и интегрированного в АСУ верфи программного комплекса. В настоящее время авторами ведутся работы по созданию на базе описанного алгоритма специализированного программного продукта «Управление производственными рисками верфи», интегрируемого в Автоматизированную систему управления предприятием. Программный продукт будет предназначен для идентификации производственных рисков верфи, оценки, принятия и выполнения корректирующих мероприятий и оценивания эффективности их проведения.

.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 31000-2010 Менеджмент риска. Принципы и руководство.
2. Качалов Р.М. Управление хозяйственным риском / Р.М. Качалов – М.: Наука, 2002. – 192 с.
3. Паутова О.А. Методика количественной оценки производственных рисков на этапах жизненного цикла продукции судоверфей. Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. 17 мая 2017 года. Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017. – 624 с.
4. Паутова О.А. Методика управления производственными рисками на судостроительном предприятии / Паутова О.А., Лучков И.Н., Бурмистров Е.Г. // Судостроение. – 2018. – № 2. – С.52-57.

References

1. GOST R ISO 31000-2010 Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo.
2. Kachalov R.M. Upravleniye khozyaystvennym riskom [Economic risk management]. Moscow, 2002. 192 p.
3. Pautova O.A. Materialy VIII mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii aspirantov, studentov i kursantov “Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii”. SPb, 2017, pp. 145-149.
4. Pautova O.A., Luchkov I.N., Burmistrov E.G. (2018) Metodika upravleniya proizvodstvennymi riskami na sudostroitel’nom predpriyatii. Sudostroyeniye, 2, 52-57.

УДК 681.518: 159.93

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВАХТЕННОГО ПЕРСОНАЛА

Маргарита Макаровна Чиркова
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики,
систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5
e-mail: chirkova@vgavt-nn.ru
Алексей Александрович Мишин
студент
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5
e-mail: letalstrike@hotmail.com
Евгений Николаевич Поселенов
кандидат технических наук, доцент кафедры информатики,
систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5
e-mail: epos@vgavt-nn.ru

Аннотация

Анализ статистики аварий на транспорте и, в частности, на водном, показывает, что безопасность плавания судов находится в зависимости не только от состояния внешней среды, но и вахтенного персонала – его информационного обеспечения текущей обстановки, квалификации и состояния на момент несения вахты. Цель работы – разработать методику получения упреждающей информации для оценки усталости вахтенного начальника судна и возможного её прогрессирования во время несения вахты, что может привести к формированию внештатной ситуации.

Объект исследования и разработки – состояние вахтенного персонала судна, методов оценки его состояния и возможность передачи информации по локальным и глобальным сетям.

Разработка и внедрение на судне системы с упреждающим контролем состояния вахтенного персонала будет способствовать уменьшению катастроф, причиной которых является человеческий фактор.

В работе так же рассматривается возможность объединения системы контроля работы судовых механизмов и системы с упреждающим контролем состояния вахтенного персонала. Объединение данных этих систем позволит получить информационную базу необходимую судовладельческим компаниям для обоснованного принятия решений.

Ключевые слова: система безопасности, психофизиологическое состояние, тестирование, усталость, автоматизация систем контроля.

INFORMATION MEASUREMENT SYSTEM OF RECOGNITION OF WATCH CREW PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE

Margarita M. Chirkova
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Computer Informatics,
Control Systems and Telecommunications Department
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: chirkova@vgavt-nn.ru
Alexey A. Mishin
Student
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: letalstrike@hotmail.com
Evgeny N. Poselenov
PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Computer Informatics,
Control Systems and Telecommunications Department
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: epos@vgavt-nn.ru

Abstract

Analysis of the statistics of accidents on transport and, in particular, on water, shows that the safety of navigation of ships depends not only on the state of the external environment, but also on the watch personnel - their information support of the current situation, qualifications and condition at the time of the watch. The purpose of the work is to develop a method of obtaining proactive information for assessing the fatigue of the crew's chief of the watch and its possible progression during the shift on the watch, which may lead to the occurrence of an emergency situation.

The object of research and development is the state of the ship's watch crew, methods for assessing their state and the possibility of transmitting information over local and global networks.

Development and implementation of a system on the ship with proactive monitoring of the state of watchkeeping crew will help to reduce accidents induced by the human factor.

The work also considers the possibility of combining a system for monitoring the operation of shipboard equipment and a system with proactive monitoring of the state of watchkeeping crew. Combining the data of these systems will provide the information base necessary for shipowners to make well-founded decisions.

Keywords: safety system, psycho-physiological state, testing, fatigue, automation of control systems.

Введение

В настоящее время под флагами различных стран мира около 60 тыс. крупнотоннажных судов бороздят воды Мирового океана. Около 80% перевозок на земном шаре осуществляется водным транспортом. Постоянно задействованы около 25 тыс. судов, экипажи которых насчитывают 1 млн. человек. По данным Регистра судоходства Ллойда, ежегодно гибнет 350-400 судов, то есть ежедневно одно судно.

Все кораблекрушения и аварии с человеческими жертвами относят к катастрофам. Большинство крупных аварий и катастроф происходит не под воздействием сил стихии (ураганы, туманы, ...), а по вине людей. Ошибки людей разделяют на две группы: ошибки, допущенные при проектировании и строительстве судна, и ошибки, происшедшие в ходе его эксплуатации.

В основном причинами крупных аварий и катастроф являются ошибки второй группы. Аварии с человеческими жертвами и спасение людей на море являются международной проблемой. В связи с этим, в 1974 г принята и ратифицирована в СССР очередная Международная конвенция по охране человеческой жизни на море «СОЛАС 74».[1] и дополненная её версия – текст с поправками, измененный Протоколом 1988 года.

1. Методика распознавания психофизиологического состояния вахтенного персонала судна

Научно-технический прогресс, как правило, сопровождается заменой физического труда умственным и по этой причине возрастает нагрузка на психику. Длительная однообразная работа, или длительное нахождение в среде без получения информации, что возможно при несении вахты на морском судне и нередко вместе с факторами, усиливающими их действие, ведут к усталости и снижению работоспособности и психофизиологическому перенапряжению вахтенного. По статистике РОСРЕЧМОРФЛОТа в более половины случаев аварий причиной признан человеческий фактор и в 90 % из них является усталость вахтенного персонала. Когда ежедневно совершается одна и та же работа, то притупляется страх, отношение к некоторым «мелочам» становится пренебрежительным, а усталость и стрессы ведут к потере концентрации внимания. Возрастает риск переутомления человека и вероятность возникновения опасной ситуации.

Разработаны документы, в которых регламентируются требования безопасности не только к размещению оборудования, груза, ведению технологических процессов, в них также излагаются требования к персоналу, в том числе квалификационные, медицинские и требования к периодическому контролю в процессе трудовой деятельности. На сегодняшний момент психофизиологический отбор проводится лишь в отношении определенной группы работников: операторов, работающих на пультах управления АЭС, машинистов локомотивов и лётного состава. Однако, такое обследование ограничивается выявлением психофизиологических особенностей поведения оператора в нормальных условиях.

В работе рассматривается возможность создания системы и методика получения как текущей так и упреждающей информации с целью оценки усталости вахтенного начальника судна и возможного её прогрессирования во время несения вахты, что может привести к формированию внештатной ситуации.

Объектом исследования является состояние вахтенного персонала судна, методы оценки его состояния и возможность передачи информации по локальным и глобальным сетям. Включение данной системы в общесудовую систему контроля технического состояния судового оборудования [2] может снизить количество аварий на водном транспорте.

Задачи, выполняемые вахтенным персоналом, различные. При решении одних требуется переработка большого количества информации, и принятия решений при дефиците времени, при других – в течение длительного времени в спокойных внешних условиях требуется наблюдение за процессом проводки судна.

Таким образом, на психофизиологическое состояние оператора (сонливость, утомление, снижение внимания) влияет характер задач и условий, в которых они решаются, и это может снизить эффективность его деятельности.

Эмоциональное перенапряжение, даже у опытных операторов в непредвиденных и сложных ситуациях, может перейти допустимую границу, и это

может привести к значительным нарушениям психической деятельности, в частности, к нарушению адекватного восприятия действительности, принятию ошибочных решений, ослаблению внимания и памяти.

Работоспособность персонала – это набор качеств человека, которые влияют на его деятельность и зависят от:

- уравновешенности и подвижности нервных процессов;
- желание совершенствовать свое профессиональное мастерство и мотивации к операторской деятельности;
- способности (при возникновении стрессовых ситуаций) к значительному кратковременному напряжению;
- эмоционально-моторной и эмоционально-сенсорной устойчивости;
- скорости переключения на различные объекты внимания;
- точности и скорости двигательных реакций, координации движений;
- решительности и настойчивости в принятии решения в сочетании с инициативностью и самокритичностью.

На рисунке 1 даны виды и способы оценки усталости человека.

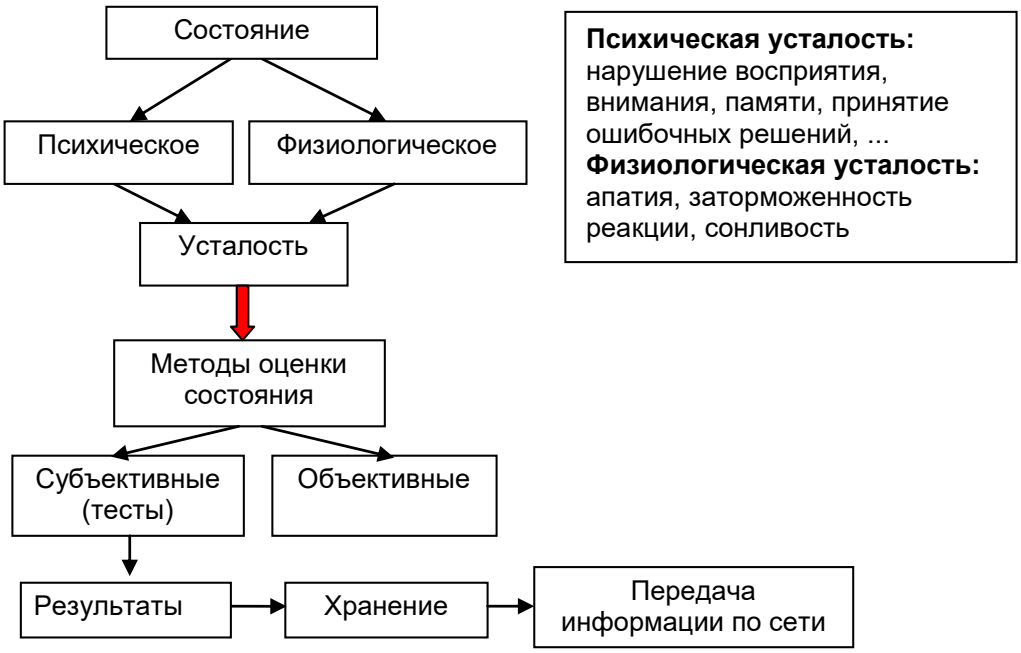


Рис. 1. Виды и способы оценки усталости.

Регистрация состояния может быть субъективной и объективной, полученной с помощью фотографирования, киносъемки, хронометража.

Субъективным методом оценки психического состояния является – тестирование, по которому можно достаточно быстро получить данные о самочувствии и активности оператора.

В данной работе используются субъективные методы оценки состояния и оцениваются психологические показатели, к которым относятся:

– внимание (концентрация, переключение, распределение);
– мышление;
– память;
– эмоционально-волевое напряжение.

Монотонность работы, связанная с длительным пассивным наблюдением, сказывается на психической усталости, что влечет за собой быстрое появление ощущения утомления, сонливости, апатии, скуки. Для тестирования состояния используется ряд тестов, разработанных психологами [3 – 6].

В качестве примера на рис. 2 приведен один из тестов для оценки усталости, в котором нужно оценить движение изображения.

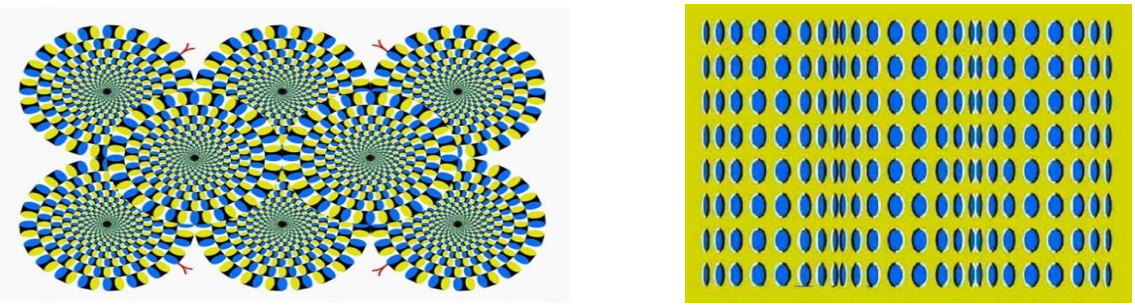


Рис. 2. Визуальные тесты оценки расстройства сенсорной области.

Разработанная программа позволяет не только регулярно проводить тестирования состояния вахтенного, но и делать прогноз о возможности ухудшения его состояния на ближайшее время. Тестирование проводится несколько раз в течение одной вахты. Оцениваются количество и время ответа. По совокупности этих параметров оценивается код состояния вахтенного. На рисунке 3 представлен возможный вид характеристики усталости. Код состояния оценивается по 3-х бальной шкале. Уменьшение кода ниже 1 говорит о невозможности несения вахты и требуется замена вахтенного. На рисунке: Sk(j) – код текущего состояния, Sk(j-1) – предыдущего и Pk(j+1) прогнозируемого состояния.

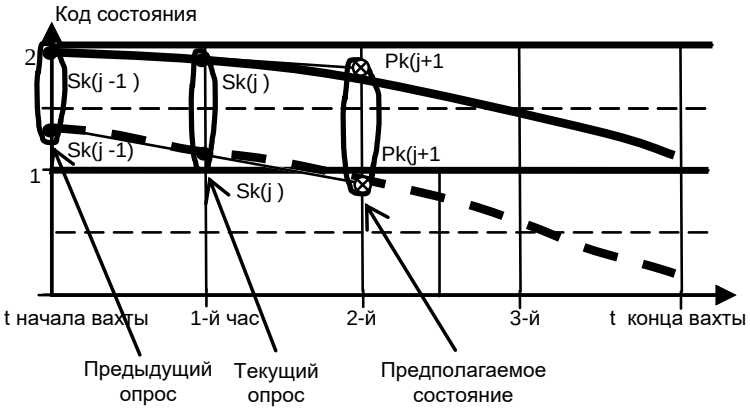


Рис. 3. Возможный вид характеристики усталости.

При возникновении на экране интерфейса (рисунок 4) вопроса оцениваются: точность ответа (accurasykod) по отношению к норме; время ответа (timekod) по отношению к норме.

Итоговая оценка рассчитывается по формуле:

outcomekod=Ca*accurasykod+ Ct *timekod,

где Ca=0.4, Ct=0.6 являются весовыми коэффициентами факторов, которые определяют значимость точности и времени ответа для данного вопроса и цели опроса.

Данные тестирования текущего и прогнозируемого состояния вахтенного записываются в «паспорт тестируемого», который формируется в виде таблицы (табл. 1).

2. Интерфейс системы тестирования

Для проведения тестирования разработан уникальный интерфейс, не требующий дополнительных устройств и использующий дисплей судовой ЭВМ, которая, например, используется для контроля состояния судового оборудования.

На рис. 4 представлен вид интерфейса, разрабатываемой системы. Интерфейс и порядок появления диалоговых окон отлаживался при тестировании сотрудников кафедры информатики, систем управления и телекоммуникаций Волжского государственного университета водного транспорта.

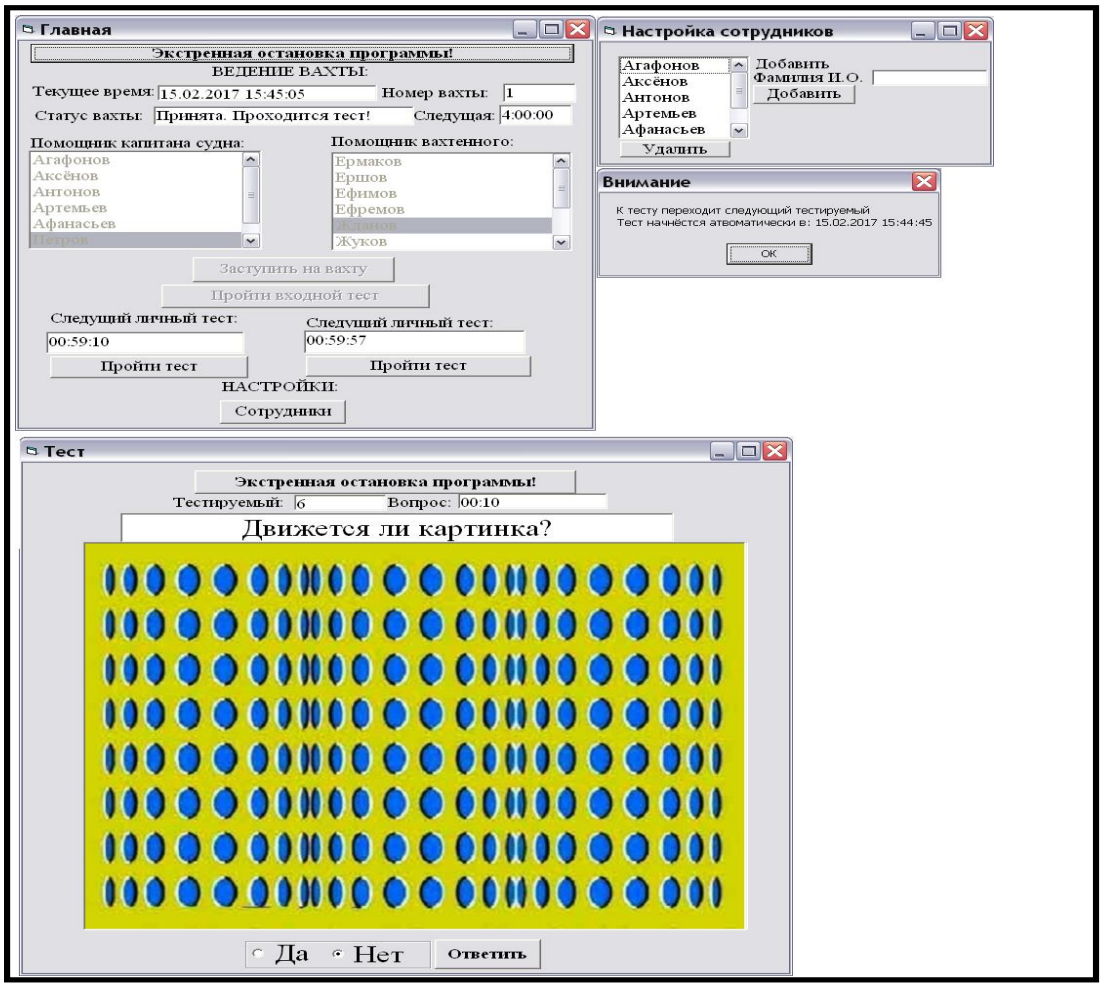


Рис. 6. Диалоговое окно программы тестирования.

«Паспорт тестируемого» *Таблица 1*

ФИО	Дата вахты	Время начала вахты	Время окончания вахты	Результат по точности ответов (accurasykod)	Результат по времени (timekod)	Итоговый результат (outcomekod)	Прогнозируемое состояние (predicted state код)
Иван Иванович Иванов	06.06.18	00.00	04.00	2	2	2	2
		12.00	15.00	2	1	1	1
	07.06.16	00,00	03,00	2	2	2	2
		12.00	15.00	2	1	1	1
Round(Σ/4)				2	2		

Паспорт тестируемого может быть дополнен информацией, полученной в момент тестирования, например, о месте нахождения судна, внешней обстановке, техническом состоянии движительно-рулевого комплекса и другой информацией, востребованной судовладельцем.

По информации, полученной о тестируемом за навигацию, можно определить и некоторые другие

данные, в частности, отношение к работе и уровень профессиональной подготовки судового персонала.

При решении поставленной задачи можно решить следующие проблемы:

- повысить ответственность и качество обслуживания судовой техники;
- оценить уровень подготовки персонала и его отношение к работе.

Это приведет к повышению качества управления судном, уменьшению экономических затрат и числа аварийных ситуаций, причиной которых является человеческий фактор.

Заключение

Результаты, которые могут быть получены в результате тестирования, позволяют в реальном времени оценить состояние вахтенного персонала и спрогнозировать вероятность его ухудшения. Введение на судне системы упреждающего и текущего контроля состояния вахтенного персонала будет способствовать более ответственному отношению к вахтенной службе, даст возможность более тщательного отбора кадров, что приведет к уменьшению числа аварий. Разрабатываемый интерфейс согласован с рядом капитанов наставников и специалистами в области физиологии и психологии.

В настоящее время наблюдается тенденция разработки и внедрения на судах системы контроля работы судовых механизмов. Объединение данных этих двух систем позволит получить информационную базу необходимую судовладельческим компаниям для обоснованного принятия решений.

Выражаем нашу благодарность за консультации по вопросам разработки тестов для оценки состояния вахтенного персонала:

- д.п.н., заведующему кафедрой прикладной психологии и педагогики Нижегородского государственного педагогического университета имени Козьмы Минина Казаковой Татьяне Николаевне;
- к.ф.н., доценту кафедры философии и социально правовых наук Волжского Государственного Университета Водного Транспорта Грибанову Сергею Владимировичу
- к.ф.н., доценту кафедры философии и социально правовых наук Волжского Государственного Университета Водного Транспорта Думаревскому Дмитрию Борисовичу

Литература

1. Аварии на водном транспорте: В настоящее время под флагами ... scibook.net/jiznedeyatelnosti-bjd-bezopasnost/avarii-vodnom-transporte-18197.h
2. Соловьёв, А. В. Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой. Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова, 2017. – Т 9. – № 5 – С. 1027—1039.
3. Бызов, С. А. Психология педагогической деятельности. Автореферат диссертации 1946
4. Климов, Е. À. Введение в психологию труда. М.:ЮНИТИ, 1998.─350 с.
5. Платонов, К. К. Вопросы психологии труда. Изд. 2-е. М., 1970
6. Зеер, Э. Ф. Психология профессий. Екатеринбург, 1997.─244 с
7. Дмитриева, М. À., Крылов À. À., Нафтульев À. И. Психология труда и инженерная психология: учебное пособие. Л. 1979.─220 с
8. Либерман, А.Н. Техногенная безопасность: Человеческий фактор Санкт-Петербург 2006. Электронный ресурс: [http://marinetec.com/ru/catalogue/product/view/161/394] (дата доступа: 20.05.2018).

References

1. Avarii na vodnom transp.orte: V nastoyaschee vremya pod flagami ... scibook.net/jiznedeyatelnosti-bjd-bezopasnost/avarii-vodnom-transporte-18197.h
2. Solovyov, A. V. Kontseptsiya edinogo tseleorientirovannogo upravleniya sudovoy energeticheskoy ustanovkoy. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S. O. Makarova, 2017. – T 9. – # 5 – S. 1027—1039.
3. Byizov, S. A. Psihologiya pedagogicheskoy deyatelnosti. Avtoreferat dissertatsii 1946
4. Klimov, E. À. Vvedenie v psihologiyu truda. M. : YUNITI, 1998.─350s.
5. Platonov. K. K. Voprosy psihologii truda. Izd. 2-e. M., 1970
6. Zeer EH. F.Psihologiya professij. Ekaterinburg, 1997.─244s
7. Dmitrieva M. À., Krylov À. À., Naftul'ev À. I. Psihologiya truda i inzhenernaya psihologiya : uchebnoe posobie. L., 1979.─220 s.
8. Liberman, A.N. Tekhnogennaya bezopasnost': CHelovecheskij faktor Sankt-Peterburg 2006. EHlektronnyj

УДК 656.62: 504.4.054

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Ольга Леонидовна Домнина
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru
Василий Николаевич Захаров
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: nauka@vgavt-nn.ru
Николай Станиславович Отделкин
доктор технических наук, профессор, проректор по конвенционной подготовке
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru
Андрей Евгеньевич Пластинин
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: plastininae@yandex.ru

Аннотация

В соответствии с международным законодательством в области экологической и транспортной безопасности оценка риска является необходимой для разработки систем реагирования на всех уровнях. Существующие в настоящее время модели позволяют рассчитать вероятности транспортных происшествий (например, столкновения и посадки на мель) или отдельные составляющие убытков, сопровождающихся экологическими последствиями.

Однако комплексные исследования в области построения математических моделей оценки экологического риска транспортных происшествий на объектах внутреннего водного транспорта до настоящего времени не проводились.

Целью нашего исследования является разработка математической модели оценки экологического риска транспортных происшествий на водных объектах и методики ее практической реализации, учитывающей специфику транспортных происшествий на акваториях речных портов, процессы возникновения и развития экологических последствий. В рамках реализации указанной цели был проведены: анализ статистических данных по транспортным происшествиям и оценены факторы, определяющие величину ущерба, предложены математическая модель оценки экологического риска транспортных происшествий на водных объектах и методика ее практической реализации.

В дальнейшем предполагается апробация предложенной модели и сравнение полученных результатов с заложенными в существующих законодательных актах лимитами.

Ключевые слова: транспортные происшествия; экологический риск; экологическая безопасность; экологический ущерб; водный транспорт.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISK OF TRAFFIC ACCIDENTS ON WATER BODIES

Olga L. Domnina
PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Vasily N. Zakharov
Dr.Sci.Tech, Professor, Chief Researcher
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Nikolai S. Otdelkin
Dr.Sci.Tech, Professor, Vice Rector for Conventional Training
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru

Andrey E. Plastinin
Dr.Sci.Tech, Associate Professor,
Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: plastininae@yandex.ru

Abstract

In accordance with international environmental and transport safety legislation, risk assessment is necessary to develop response systems at all levels. The current models allow us to calculate the probability of traffic accidents (for example, collisions and stranding) or individual components of losses with environmental consequences.

However, comprehensive studies in the field of developing mathematical models for assessing the environmental risk of traffic accidents on inland water transport bodies have not yet been carried out.

The aim of our study is to develop a mathematical model for assessing the environmental risk of accidents on water bodies and methods for its practical implementation, taking into account the specifics of accidents in the waters of river ports, the processes of occurrence and development of environmental consequences. In the scope of the implementation of this goal, the following was carried out: an analysis of traffic accident statistics and factors determining the magnitude of damage were assessed, a mathematical model was proposed for assessing the environmental risk of traffic accidents on water bodies and a method for its practical implementation.

In the future, it is proposed to test the proposed model and compare the results obtained with the limits specified in the existing legislation.

Keywords: traffic accidents; environmental risk; environmental safety; environmental damage; water transport.

Введение

В соответствии с международным законодательством в области экологической и транспортной безопасности оценка риска является необходимой для разработки систем реагирования на всех уровнях [1,2]. В России оценка риска возникновения транспортного происшествия выполняется в соответствии с Руководством по безопасности [3].

Исследованиям в области экологической безопасности водного транспорта и оценке экологических последствий транспортных происшествий (ТП) посвящены работы: Allen, 1988; Reed, 1989; Dixon, 1991; Yarlington, 1992; Tanden, 1993; Zatsepa, Ivchenko, & Ovsienko, 1993; Koike & Kako, 1996; Forsman, 1997; Bayoumi & Ghalwash, 1999; Reineke, 1999; Etkin, French-McCay, Whittier, Subbayya, & Jennings, 2002; Delgado, Kumzerova, Martynov, Mirny, & Shepelev, 2005; Reed, Emilsen, Hetland, Johansen, Buffington, & Hoverstad, 2006. В рамках оценки экологических рисков на морском транспорте в ряде работ авторов были получены результаты, в основе которых лежала оценка вероятности событий (модель IMO, правило 23 Приложение I MARPOL) или расчетные данные на основе статистики ТП [3]. Прежде всего, необходимо отметить модели разработанные Macduff, 1974; Pedersen, 1995; Fowler & Sørgard, 2000; Tuovinen, 2005. Указанные модели позволяют рассчитать вероятности транспортных происшествий (например, столкновения и посадки на мель), сопровождающихся экологическими последствиями [3,4,5].

Однако комплексные исследования в области построения математических моделей оценки экологического риска ТП в речных условиях на объектах внутреннего водного транспорта до настоящего времени не были проведены.

Цель нашего исследования: разработка математической модели оценки экологического риска транспортных происшествий (ТП) на водных объектах и методики ее практической реализации, учитывающей специфику транспортных происшествий на акваториях речных портов, процессы возникновения и развития экологических последствий.

Для реализации указанной цели нами были поставлены следующие задачи [6]:

- создание базы данных по ТП на водных объектах;
- анализ статистических данных по ТП и оценка факторов, определяющих величину ущерба;
- разработка математической модели и комплексной методики оценки экологического риска ТП на водных объектах;
- определение путей совершенствования и уточнения математической модели оценки экологического риска ТП и расширения функциональности разработанной методики.

1. Анализ статистических данных

На рис. 1-3 приведена характеристика базы данных по республике Татарстан за временной период с 2005 по 2015гг.

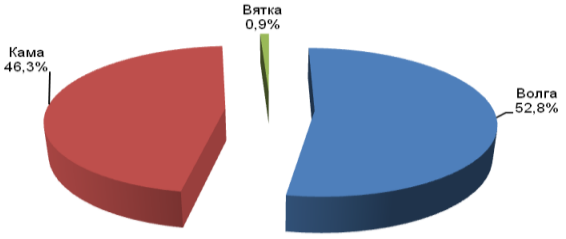


Рис. 1. Структура ТП по водным объектам

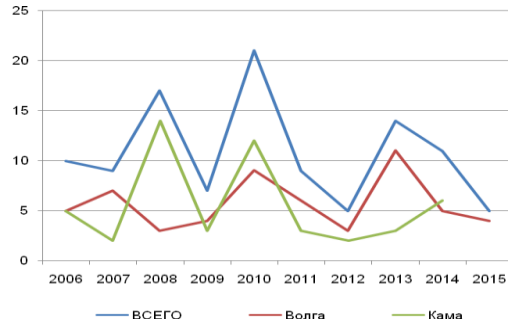


Рис. 2. Динамика ТП по водным объектам

Как видно из рис. 1, количество происшествий на реках Каме и Волге приблизительно равно с небольшим перевесом в сторону реки Волга. На реке Вятка было зарегистрировано только 1 происшествие за 10 лет. Вероятнее всего это связано с незначительной протяженностью этой реки в границах республики Татарстан.

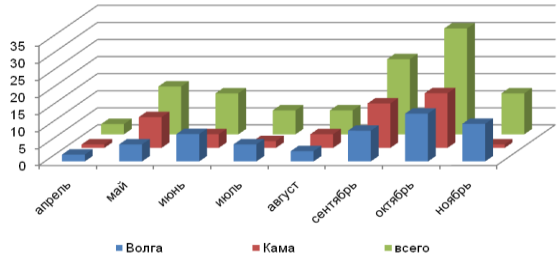


Рис. 3. Динамика происшествий по месяцам

Если посмотреть на число происшествий в динамике (рис.2), то можно увидеть, что:

- тенденции по количеству происшествий приблизительно совпадают на обеих реках
- скачки в количестве происшествий можно наблюдать с периодичностью раз в 3 года;
- наибольший количественный скачок произошел в 2010 году;
- в целом, количество происшествий на реке Волга имеет тенденцию роста в противовес реке Кама. Там можно наблюдать в среднем небольшие тенденции снижения аварийности.

При этом основная масса происшествий приходится на весенне-осенний период (май и октябрь). Причем, такая тенденция наблюдалась и на Волге, и на Каме (рис.3). На наш взгляд, это может быть связано с погодными условиями при наличии достаточно интенсивного судоходства.

Как видно из структуры происшествий (рис.4), то основная их масса приходится на посадку на мель (64%). Около 15% - приходится на различные столкновения. 5% приходится на пожары. В 3% случаев суда затонули.

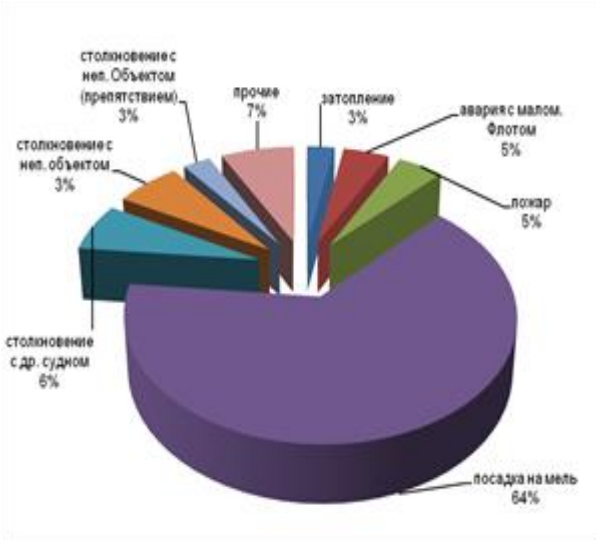


Рис. 4. Структура транспортных происшествий

На рис.5 и 6 показано распределение ТП по участками концентрации. И здесь ситуация на реке Волга отличается от ситуации на реке Кама. Так, на реке Волга есть ярко выраженный участок повышенной аварийности. На реке Кама таких участков несколько. Проиллюстрируем анализ одного из выявленных участков повышенной аварийности на реке Волга (рис.7).

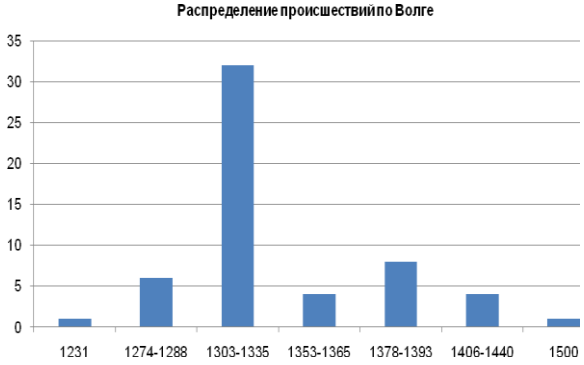


Рис. 5. Распределение ТП по р. Волге

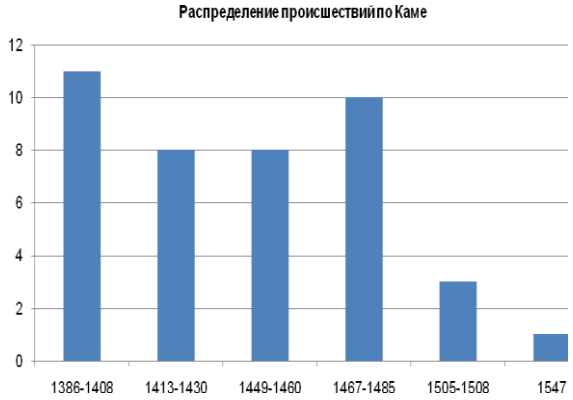


Рис. 6. Распределение ТП по р. Каме

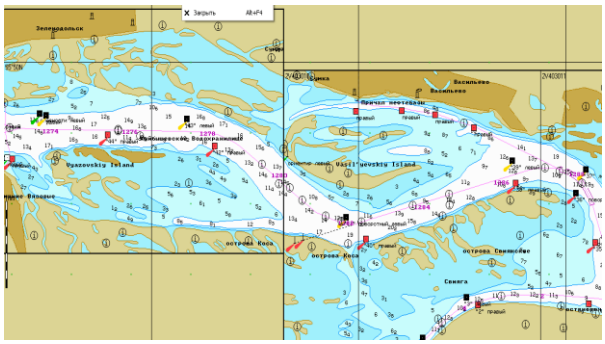


Рис. 7. Участок концентрации транспортных происшествий. Река Волга 1274-1288 км

Из картографической схемы участка можно сделать вывод, что его аварийность вызвана извилистостью судового хода и наличием значительного количества островов и мелей, наличием интенсивного судоходства и мест проведения грузовых операций (нефтебазы).

На рис. 8 показана структура происшествий по виду флота. Как видно, чуть больше половины транспортных происшествий (54,6%) приходится на несамоходный флот и буксиры. Еще около четверти происшествий приходится на самоходные сухогрузы. Оставшаяся четверть происшествий приходится на все оставшиеся виды флота.

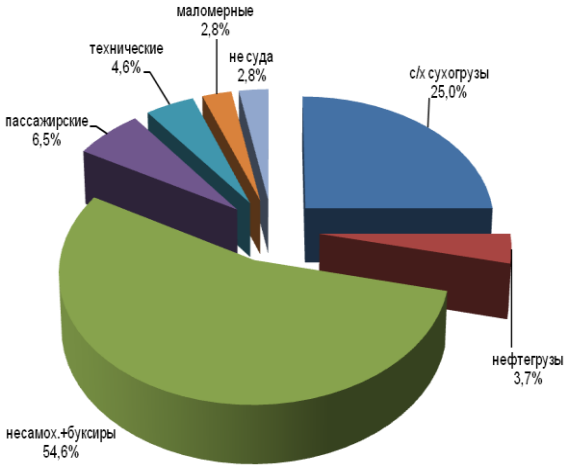


Рис. 10. Структура ТП по виду флота

2. Методы и материалы

Математическая модель оценки экологического риска ТП на водных объектах была разработана на основе следующих положений [5, 7]:

1) Экологический риск ТП на речном транспорте в России представляет собой сумму рисков в границах отдельных субъектов РФ.

2) Сосредоточение риска на участках концентрации обусловлено действием двух групп факторов: *а)* условиями окружающей среды (например, содержанием водного пути, навигационного оборудования, гидротехнических сооружений, перекатами, мелями, пересечениями судовых ходов и пр.) и *б)* факторами интенсивности использования водных путей (например, наличием портов, нефтепричалов, интенсивность судоходства).

3) Вероятность и тяжесть экологических последствий ТП зависят от периода года, вида флота, характеристик водного объекта.

4) Причинение вреда на участках концентрации зависит от следующих событий: возникновения ТП, участия в ТП определенного вида судна, и наличия факта причинения вреда.

5) Оценка экологического риска ТП на водных объектах должна выполняться на основе статистических данных репрезентативного периода наблюдения (не менее 10 лет).

6) Основными источниками экологических убытков от судоходства являются:

- нефть (груз, топливо и нефтесодержащие воды);
- грузы (при авариях сухогрузов);
- хозяйственно-бытовые сточные воды;
- мусор с судов;
- части судна при его затоплении в результате аварии.

3. Результаты

На основе теоремы сложения независимых событий экологический риск ТП (ожидаемый экологический ущерб) будет определяться по следующей формуле:

$$R_{ЭРТП}^{РФ} = \sum_{i=1}^{85} R_{ЭРТПi}^{СРФ}, \qquad (1)$$

где i – номер субъекта РФ,

$R_{РНi}^{АБ}$ – ожидаемый экологический ущерб от ТП в границах i –го субъекта РФ, млн. руб./год.

При этом выражение для $R_{ЭРТПi}^{СРФ}$ следует записать в следующем виде:

$$R_{ЭРТПi}^{СРФ} = \sum_{j=1}^{L} R_{ЭРТПj}^{УК} \qquad (2)$$

где $R_{ЭРТПj}^{УК}$ – ожидаемый экологический ущерб от ТП, сконцентрированный на j-ом участке концентрации происшествий в границах i –го субъекта РФ, млн. руб./год;

L – количество участков концентрации происшествий в границах i –го субъекта РФ.

Так как вероятность экологического ущерба ТП зависит от того, какой используется вид флота, то экологический ущерб на участке концентрации $R_{ЭРТПj}^{УК}$ можно определить по формуле:

$$R_{ЭРТПj}^{УК} = \sum_{k=1}^{F} R_{ЭРТПВФjk}^{УК} \qquad (3)$$

где $R_{ЭРТПВФjk}^{УК}$ – прогнозируемый ущерб от судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в границах i –го субъекта РФ, млн. руб./год;

F – количество видов флота, работающих на j-ом укрупненном участке в границах i –го субъекта РФ.

$$R_{ЭРТПВФjk}^{УК} = P_{ЭРТПВФjk}^{УК} \cdot R_{УСЛЭРТПВФjk}^{УК} \qquad (4)$$

где $P_{ЭРТПВФjk}^{УК}$ –вероятность нанесения вреда при ТП от судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке, 1/год;

$R^{УК}_{УСЛЭРТПВФjk}$ – прогнозируемый экологический ущерб от ТП от использования судов k-ого вида на j-ом укрупненном участке, млн. руб.

Формулу для вероятности причинения вреда на j-ом укрупненном участке следует записать в следующим образом:

$$P^{УК}_{ЭРТПВФjk} = P^{УК}_{ТПj} \cdot P^{УК}_{ТПВФjk} \cdot P^{УК}_{ТПВФЭРjk}, \quad (5)$$

где $P^{УК}_{ТПj}$ –вероятность ТП на j-ом укрупненном участке;

$P^{УК}_{ТПВФjk}$ –вероятность участия в ТП k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке;

$P^{УК}_{ТПВФРНjk}$ –вероятность причинения вреда k-ым видом флота на j-ом укрупненном участке.

Для расчета вероятностей $P^{УК}_{ТПВФjk}$, $P^{УК}_{ТПВФjk}$ и $P^{УК}_{ТПВФЭРjk}$ используются статистические данные по ТП.

$$P^{УК}_{ТПj} = \frac{n_{ТПj}}{T} \quad (6)$$

где $n_{ТПj}$ – количество зарегистрированных ТП на j-ом укрупненном участке;

T – период наблюдения, лет;

$$P^{УК}_{ТПВФjk} = \frac{n_{ВФjk}}{N_j}, \quad (7)$$

где $n_{ВФjk}$ – количество ТП с участием k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке;

N_j – количество ТП на j-ом укрупненном участке.

$$P^{УК}_{ТПВФЭРjk} = \frac{n_{ВФЭРjk}}{N_{jk}}, \quad (8)$$

где $n_{ВФЭРjk}$ – количество ТП с участием судов k-ого вида флота и с причинением вреда окружающей среде на j-ом укрупненном участке;

N_{jk} –количество ТП с участием судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке.

Прогнозируемый экологический ущерб при ТП будет включать следующие составляющие:

$$R^{УК}_{УСЛЭРТПВФjk} = R^{УК}_{УСЛРНВФjk} + R^{УК}_{УСЛГВФjk} + R^{УК}_{УСЛНВВФjk} + R^{УК}_{УСЛСВВФjk} + R^{УК}_{УСЛМВФjk} + R^{УК}_{УСЛСВФjk}, \quad (9)$$

где $R^{УК}_{УСЛРНВФjk}$ – прогнозируемый экологический ущерб от разлива нефти и нефтепродуктов при ТП с k-ым видом флота на j-ом укрупненном в границах i –го субъекта РФ, млн. руб;

$R^{УК}_{УСЛГВФjk}$ – прогнозируемый ущерб от потери груза с судов k-ого вида флота при ТП на j-ом укрупненном участке в границах i –го субъекта РФ, млн. руб;

$R^{УК}_{УСЛНВВФjk}$ – прогнозируемый экологический ущерб от сброса нефтесодержащих вод при ТП на j-ом укрупненном участке с судов, относящихся к k-ому виду флота, в границах i –го субъекта РФ, млн. руб;

$R^{УК}_{УСЛСВВФjk}$ – прогнозируемый экологический ущерб от сброса сточных вод при ТП на j-ом укрупненном участке с судов k-ого вида флота в границах i –го субъекта РФ, млн. руб;

$R^{УК}_{УСЛСВФjk}$ – прогнозируемый экологический ущерб от затопления судов k-ого вида флота и их частей при ТП на j-ом укрупненном участке в границах i –го субъекта РФ, млн. руб.

Прогнозируемые ущербы от разлива нефти и потери груза $R^{УК}_{УСЛРНВФjk}$ и $R^{УК}_{УСЛГВФjk}$ зависят от времени года ТП и массы разлива (массы груза):

$$R^{УК}_{УСЛРНВФjk} = R^{УК}_{УСЛГВФjk} = \sum_{z=1}^{3} \sum_{d=1}^{W} P^{УК}_{ВГjkz} \cdot P^{УК}_{МРjkd} \cdot У_{zd}, \quad (10)$$

где $P^{УК}_{ВГjkz}$ –вероятность разлива нефти с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в z - е время года;

$P^{УК}_{МРjkd}$ –вероятность разлива нефти массой, входящей в интервал d, с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке;

$У_{zd}$ – размер ущерба, причиненный водному объекту от разлива нефти массой, входящей в интервал d, с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в z - е время года, млн. руб.;

W – количество интервалов масс разлива нефти, определяется в соответствии с [7] с учетом статистических данных по массам разливов;

z – время года (весна, лето, осень).

Для расчета вероятностей $P^{УА}_{ВГjkz}$ и $P^{УА}_{МРjkd}$ применим следующие формулы:

$$P^{УК}_{ВГjkz} = \frac{n_{ВГjkz}}{N_{jk}} \quad (11)$$

где $n_{ВГ\,jkz}$ – количество ТП с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в z - е время года;

N_{jk} – количество ТП с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке.

$$P^{УК}_{MP\,jk\,d} = \frac{n_{MP\,jk\,d}}{N_{jk}} \qquad (12)$$

где $n_{MP\,jk\,d}$ – количество ТП с разливом нефтью массой, входящей в интервал d, с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке;

$N_{PH\,jk}$ – количество ТП с разливом нефтью на с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке.

Размер ущерба водному объекту $У_{zd}$ рассчитывается в соответствии с методикой расчета размера вреда, причиненного водным объектам следствии нарушения водного законодательства [8].

$$У_{zd} = K_{ВГz} \cdot K_{В} \cdot K_{ИН} \cdot K_{ДЛ} \cdot H_{d} \qquad (13)$$

где $K_{ВГz}$ – коэффициент, учитывающий z–ое время года в зависимости от климатических условий:

весной $K_{ВГ1}$ равен 1,25, летом - $K_{ВГ2}$ =1,10, осень - $K_{ВГ3}$ =1,15;

$K_{В}$ – коэффициент, учитывающий состояние водных объектов, (для реки Волга составляет 1,41);

$K_{ИН}$ – коэффициент, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития (в 2016 году составил 1,8 [7]);

$K_{ДЛ}$ – коэффициент, учитывающий длительность периода воздействия нефтепродукта на водный объект при непринятии мер по его ликвидации; $K_{ДЛ}$ = 1,1 (до 6 часов включительно);

H_{d} – такса для расчета размера убытка от сброса нефтепродуктов массой, входящей в интервал d.

Прогнозируемые ущербы при сбросе сточных и нефтесодержащих вод, мусора и затопления судов (или их частей) зависят от времени года наступления ТП:

$$R^{УК}_{УСЛНВВФ\,jk} = R^{УК}_{УСЛСВВФ\,jk} = R^{УК}_{УСЛМВФ\,jk} = R^{УК}_{УСЛСВФ\,jk} = \sum_{z=1}^{3} P^{УК}_{ВГ\,jkz} \cdot У_{z}, \qquad (14)$$

где $P^{УК}_{ВГ\,jkz}$ –вероятность сброса сточных и нефтесодержащих вод, мусора или затопления судов с судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в z - е время года;

$У_{z}$ – размер убытка, причиненный водному объекту сточными и нефтесодержащими водами, мусором и затоплением судна для судов k-ого вида флота на j-ом укрупненном участке в z - е время года, млн. руб.;

При сбросе нефтесодержащих вод ущерб составит:

$$У_{z} = K_{ВГz} \cdot K_{В} \cdot K_{ИН} \cdot H_{НВ} \cdot M_{НВ} \cdot K_{ИЗ} \qquad (15)$$

где $H_{НВ}$ – такса для расчета размера убытка от сброса нефтепродуктов из нефтесодержащих вод в водные объекты, $H_{НВ}$ =0,67млн.р./т;

$M_{НВ}$ – масса сброшенного нефтепродукта из нефтесодержащих вод в водный объект, т;

$K_{ИЗ}$ – коэффициент интенсивности воздействия нефтепродуктов на водный объект, $K_{ИЗ}$ =5, так как концентрация нефтепродуктов в нефтесодержащих водах больше предельно допустимой концентрации, принятой для рыбохозяйственных водоемов, и превышает ее более, чем в 50 раз.

Масса сброшенного в водный объект нефтепродукта в нефтесодержащих водах, $M_{НВ}$, т, рассчитывается по формуле:

$$M_{НВ} = V^{НВ}_{Ц} \bullet (C_{Ф} - C_{Д}) \bullet 10^{-6} \qquad (16)$$

где $V^{НВ}_{Ц}$ – объем цистерны для накопления нефтесодержащих вод, м^3;

$C_{Ф}$ – средняя концентрация нефтепродуктов в нефтесодержащих водах, мг/л, $C_{Ф}$ =45000мг/л;

$C_{Д}$ – предельно-допустимая концентрация нефтепродуктов в воде ($C_{Д}$ =0,05мг/л) [7];

10^{-6} – коэффициент пересчета концентрации нефтепродукта из мг/л в т/м^3.

При сбросе сточных вод:

$$У_{z} = K_{ВГz} \cdot K_{В} \cdot K_{ИН} \cdot H_{СВ} \qquad (17)$$

где $H_{СВ}$ – такса для расчета убытка от сброса сточных вод в водные объекты (в большинстве случаев $H_{СВ}$ =0,01 млн.руб.)

При загрязнении водных объектов мусором размер убытка находится по формуле:

$$У_{z} = K_{ВГz} \cdot K_{В} \cdot K_{ИН} \cdot K_{ЗАГР} \cdot H_{М} \cdot S_{М} \qquad (18)$$

где $K_{ЗАГР}$ – коэффициент загрязненности акватории водного объекта мусором, баллы (для судового мусора принимается равным 3);

$H_{М}$ – такса для расчета убытка водным объектам от загрязнения мусором (принимаем равной 0,0008 млн. руб./м^2);

$S_{М}$ – площадь акватории водного объекта, загрязненная мусором, м^2 (она зависит от объема накопительных судовых емкостей для сбора мусора и в среднем равна от 20 до 50 м^2).

При затоплении судов и/или их частей ущерб составит:

$$У_z = К_{ВГz} \cdot К_В \cdot К_{ИН} \cdot Н_С \cdot В \qquad (19)$$

где $Н_С$ – такса для исчисления размера убытка от затопления судов и/или их частей, (принимается 0,04 млн. руб./т);

$В$ – тоннаж затопленных судов и/или их частей, т.

3. Методика оценки экологических рисков

Совокупность формул (1) - (19) представляет собой математическую модель оценки экологического риска ТП, с помощью которой можно оценить риски возникновения ТП и причинения от них вреда.

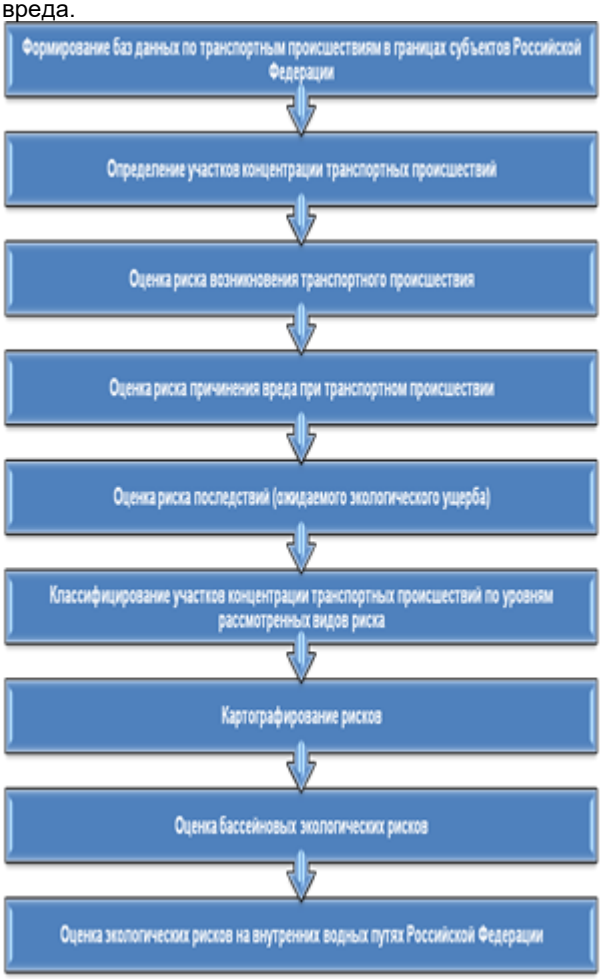


Рис. 8. Методика оценки экологических рисков транспортных происшествий.

В соответствии с этим, предлагается следующая последовательность оценки экологических рисков (рис. 8)

Заключение

Таким образом, в данной работе был проведен анализ статистических данных по ТП и оценены факторы, определяющие величину ущерба, предложены математическая модель оценки экологического риска транспортных происшествий на водных объектах и методика ее практической реализации.

Своими дальнейшими задачами мы видим:

- апробирование предложенной модели;
- разработку организационных и технических мероприятий по снижению уровня экологического риска;
- разработку методики оценки стоимости человеческой жизни;
- сравнение полученных результатов с заложенными в законодательных актах лимитах ответственности транспортных предприятий;
- разработку предложений по совершенствованию правовой базы по оценке экологических рисков от транспортных происшествий.

Литература

1. Алешин И.В., Гончаров В.К., Зуева Е.С., Портной А.С. Безопасность морских технологий: обеспечение экологической безопасности морских технологий. Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. № 2 (36). С. 11-16.
2. Корнев А.Б., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Пути развития экологической безопасности региона. В сборнике: Великие реки'2016 Труды научного конгресса 18-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; ответственный редактор А. А. Лапшин. 2016. С. 90-92.
3. Дмитриев В.Г. Оценка экологического риска. Аналитический обзор публикаций. Арктика и Север. 2014. № 14. С. 126-147.

4. Пластинин А. Е. Идентификация событий при разливах нефти с судов. Речной транспорт (XXI век). 2016. №1(77). С.52-56.
5. Наумов В.С., Пластинин А.Е. Определение вероятных районов разливов нефти в Цимлянском водохранилище. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 53. С. 75-81.
6. Пластинин А.Е., Домнина О.Л. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах в республике Татарстан. В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума: в 3 томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2017. С. 322-325.
7. Пластинин А. Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013.№ 1 (20). С. 97-104
8. Приказ Минприроды России от 13.04.2009 N 87 (ред. от 26.08.2015) "Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства" (Зарегистрировано в Минюсте России 25.05.2009 N 13989)

References

1. Aleshin I.V., Goncharov V.K., Zueva E.S., Portnoy A.S. Bezopasnost' morskikh tekhnologiy: obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti morskikh tekhnologiy. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. T. 1. № 2 (36). p. 11-16.
2. Kornev A.B., Domnina O.L., Plastinin A.E. Puti razvitiya ekologicheskoy bezopasnosti regiona. V sbornike: Velikie reki'2016 Trudy nauchnogo kongressa 18-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3-kh tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet; otvetstvennyy redaktor A. A. Lapshin. 2016. p. 90-92.
3. Dmitriev V.G. Otsenka ekologicheskogo riska. Analiticheskiy obzor publikatsiy. Arktika i Sever. 2014. № 14. p. 126-147.
4. Plastinin A. E. Identifikatsiya sobytiy pri razlivakh nefti s sudov. Rechnoy transport (XXI vek). 2016. №1(77). – p.52-56.
5. Naumov V.S., Plastinin A.E. Opredelenie veroyatnykh rayonov razlivov nefti v Tsimlyanskom vodokhranilishche. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2017. № 53. p. 75-81.
6. Plastinin A.E., Domnina O.L. Otsenka ekologicheskogo riska transportnykh proisshestviy na vodnykh ob"ektakh v respublike Tatarstan. V sbornike: VELIKIE REKI' 2017 trudy nauchnogo kongressa 19-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3 tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. 2017. p. 322-325.
7. Plastinin A. E. Otsenka ozhidaemogo ushcherba vodnym ob"ektam pri razlivakh nefti Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2013.№ 1 (20). p. 97-104
8. Prikaz Minprirody Rossii ot 13.04.2009 N 87 (red. ot 26.08.2015) "Ob utverzhdenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo vodnym ob"ektam vsledstvie narusheniya vodnogo zakonodatel'stva" (Zaregistrirovano v Minyuste Rossii 25.05.2009 N 13989)

УДК 502.1/2:656

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПЛЫТИЯ НЕФТИ ОТ ПОДВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Виктор Степанович Наумов
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности
Волжский государственный университет водного транспорта
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru
Андрей Евгеньевич Пластинин
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности
Волжский государственный университет водного транспорта
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: plastininae@yandex.ru
Александр Николаевич Каленков
кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности
Волжский государственный университет водного транспорта
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: parahinaa@vgavt-nn.ru
Николай Станиславович Отделкин
доктор технических наук, профессор, проректор по конвенционной подготовке
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru

Аннотация

При разливах нефти от подводных источников в ледовых условиях существует необходимость оценки времени всплытия, координат и параметров области нефтяного загрязнения, которые в дальнейшем применяются для расчета сил и средств ликвидации в ледовых условиях, а также для оценки ущерба окружающей среде.

Существующие математические прогнозные модели всплытия нефти основываются на уравнении Стокса, не учитывают объем (массу) и конфигурацию нефтяного загрязнения, что влияет на точность прогноза.

Новизна работы заключается в разработке оригинальной регрессионной модели прогноза подводного движения разлива нефти при всплытии под лед, которая позволяет выполнять оценку параметров области всплытия нефти по лед с одновременным учетом процессов растекания и перемещения под действием глубинных течений.

Совместное применение методов вычислительной гидродинамики и математической статистики обеспечивает возможность получения прогноза в ускоренном временном режиме, что является важным требованием для функционирования современных систем прогнозирования.

Ключевые слова: разлив нефти, подводные источники, ледовые условия, область всплытия нефти, время всплытия нефти, координаты всплытия нефти, процессы растекания, действие глубинных течений.

MODELING OF OIL FLOATING FROM UNDERWATER SOURCES, IN ICE CONDITIONS

Victor S. Naumov
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volzhsky State University of Water Transport
603951, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: naumov1 @ vgavt-nn.ru
Andrey E. Plastinin
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volzhsky State University of Water Transport
603951, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: plastininae@yandex.ru
Alexander N. Kalenkov
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial
Volzhsky State University of Water Transport
603951, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: parahinaa@vgavt-nn.ru

Nikolai S. Otdelkin
Dr.Sci.Tech, Professor, Vice Rector for Conventional Training
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru

Abstract

In case of oil spills from underwater sources in ice conditions, there is a need to estimate the time of floating, coordinates and parameters of the area of oil pollution, which are further used to calculate the forces and means of elimination in ice conditions, as well as to assess damage to the environment.

Existing mathematical forecast models of oil floating are based on the Stokes equation, do not take into account the volume (mass) and the configuration of oil pollution, which affects the accuracy of the forecast.

The novelty of the work lies in the development of an original regression model for forecasting the underwater movement of an oil spill during floating under ice, which allows estimating the parameters of the oil floating area under ice while simultaneously taking into account the processes of spreading and relocation under the influence of deep currents.

The combined use of methods of computational fluid dynamics and mathematical statistics provides the possibility of obtaining a forecast in an accelerated time mode, which is an important requirement for the functioning of modern forecasting systems.

Keywords: oil spill, underwater sources, ice conditions, oil floating area, oil floating time, oil floating coordinates, spreading processes, influence of deep currents.

Введение

К подводным источникам нефтяного загрязнения относятся: затонувшие суда и магистральные нефтепроводы, буровые установки и суда, платформы и другая морская техника, применяемая для разведки и добычи нефти на континентальном шельфе [1].

Планирование эффективных мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти основано на прогнозировании процессов загрязнения компонентов окружающей среды (береговой зоны, воздушной среды, биологических ресурсов и собственно водных объектов) и определении границ зон загрязнения.

Для оценки характеристик нефтяного загрязнения в ледовых условиях используются прогнозные модели, созданные следующими учеными: Измайлов В.В. (1988) [2]; Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А. (2007) [3]; Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S. (1993) [4]; Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R. (1974) [5]; Bobra A.M., Fingas M.F. (1986) [6]; Clark R.C., Finley J.S. (1982) [7]; Reed M., Aamo O.M. (1994) [8]; Fingas M.F., Hollebone B.P. (2002-2003) [9], [10]; Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R. (1990) [11]; Yapa P.D., Chowdlmry T. (1990) [12]. В этих работах на базе представительного количества экспериментов по определению взаимодействия нефтепродуктов и льда, разработаны математические модели для оценки перемещения разливов нефти на ледовых поверхностях, в подледном слое воды и перемещения нефти дрейфующим льдом. Анализ перечисленных работ показал, что ни одна из рассмотренных нефтяных моделей не обеспечивает прогнозирование процесса всплытия нефти из подводных источников под лед. Для оценки времени всплытия нефти применяется уравнение Стокса, при этом не учитываются массовые, объемные и пространственные характеристики нефтяного разлива, что негативно сказывается на достоверности прогноза.

Поэтому целью данной работы является разработка специальной математической модели для прогноза подводного движения разлива нефти, обеспечивающей одновременно точность прогноза и сокращение времени на проведение процедуры оценки характеристик области всплытия нефти (ОВН), учет процессов перемещения и растекания под действием морских глубинных течений.

Достижение этой цели может быть получено путем построения системы уравнений регрессии на основе результатов численного моделирования, связывающих характеристики области всплытия нефтепродукта и параметры нефтяного загрязнения.

1. Планирование численного эксперимента

В качестве района моделирования выбрано Кравцовское месторождение нефти в бассейне Балтийского моря, где производится активная разведка и добыча шельфовой нефти в непосредственной близости от особо охраняемой природной территории «Куршская коса», а в качестве независимых факторов на основе рекомендаций [1] рассмотрены следующие характеристики: тип нефтепродукта (через плотность), объем (масса) разлива, скорость течения и глубина моря.

Рассматриваемому географическому району соответствуют следующие экстремальные значения факторов: плотность нефтепродукта 205 – 860 кг/м^3, масса нефтепродукта 1 – 10 т, скорость морского течения 0,05 – 0,3 м/с, глубина моря 5 – 20 м.

Для сокращения количества опытов и обеспечения репрезентативности выборки в работе применялось планирование эксперимента в математической системе STATISTICA 8.0 и дробный двухуровневый план Бокса и Хантера, представленный в таблице 1. Рассматриваемый план представляет собой ½ реплику от полного плана четырехфакторного эксперимента.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента для дробного двухуровневого плана Бокса и Хантера

N / N	Независимые факторы			
	Плотность, т/м^3	Масса, т	Скорость течения, м/с	Глубина, м
1.	860,0	10,0	0,3	20,0
2.	860,0	1,0	0,05	20,0
3.	205,0	10,0	0,05	20,0
4.	860,0	10,0	0,05	5,0
5.	205,0	1,0	0,3	20,0
6.	205,0	10,0	0,3	5,0
7.	205,0	1,0	0,05	5,0
8.	860,0	1,0	0,3	5,0

2. Результаты численного эксперимента

Моделирование всплытия нефти выполнялось с использованием программного продукта FlowVision на разработанной расчётной области согласно полученной матрице планирования эксперимента.

Выполненные в работе [13] исследования позволяют утверждать, что программный комплекс FlowVision может быть использован для моделирования процесса всплытия нефтяного загрязнения от подводных источников и обеспечивает необходимую точность при уменьшении расчетного времени. Для этого было выполнено сравнение результатов модельного эксперимента выполненного корейскими учеными Lee C.M., Kang K.H., Cho N.S. [14] и результатов аналогичного численного эксперимента выполненного учеными ВГУВТ с использованием программного комплекса FlowVision. Сравнительный анализ с использованием статистических критериев показал, что точки траекторий при использовании стандартной k-ε модели принадлежат одной совокупности с точностью, превышающей 0,98.

На рис. 1 и 2 приведено графическое описание сценария 1 - плотность нефти 860 кг/м^3, масса разлива 10т, скорость течения 0,3 м/с, глубина 20 м.

Рис. 1. Положение пятна нефти на расстоянии 5м от дна водоёма (вертикальный разрез)

На рис. 3 и 4 приведено графическое описание сценария всплытия нефти в момент касания поверхности льда (постоянное истечение, плотность нефти 205 кг/м^3, скорость течения 0,3 м/с, глубина 10 м).

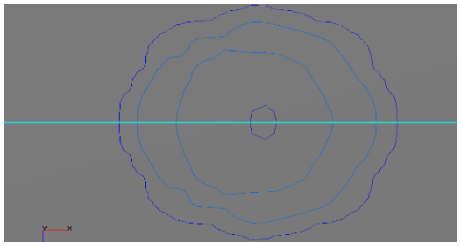


Рис. 2. Положение пятна нефти на расстоянии 5м от дна водоёма (вид сверху)

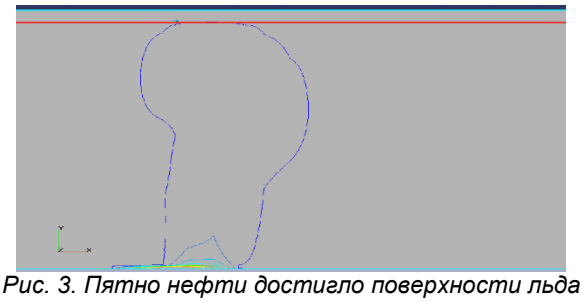


Рис. 3. Пятно нефти достигло поверхности льда (вертикальный разрез)

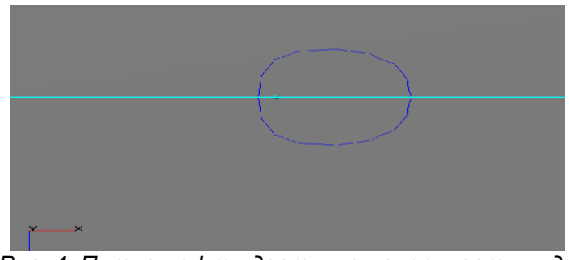


Рис. 4. Пятно нефти достигло поверхности льда (вид сверху)

В ходе численного моделирования сценариев всплытия нефти под лед определялись следующие параметры ОВН под лед: площадь, время всплытия, длина, ширина, координаты центра.

Результаты численного эксперимента представлены в таблице 2.

На основе полученных данных разработаны следующие уравнения связи для оценки параметров ОВН под лед:

$$t_B = 0{,}034\rho + 0{,}314M + 2{,}6v + 0{,}734H - 9{,}746$$

$$X_Ц = 0{,}006\rho + 0{,}151M + 19{,}35v + 0{,}191H - 6{,}365$$

$$L = -0{,}003\rho + 1{,}647M + 2{,}3v + 1{,}222H + 1{,}851$$

$$B = -0{,}002\rho + 1{,}944M - 3{,}2v + 0{,}987H + 2{,}689$$

$$S = -0{,}047\rho + 92{,}712M - 40{,}72v + 58{,}245H - 488{,}23$$

где t_B – время всплытия нефтепродуктов, с; $X_Ц$, L, B, S – параметры нефтяного пятна, соответственно координаты центра (м), длины (м), ширины (м) и площади (м^2); ρ – плотность нефтепродукта, г/см^3; M – масса нефтепродукта, т; v – скорость морского глубинного течения, м/с; H – глубина моря, м.

Таблица 2

Результаты численного эксперимента

N/ N	Характеристики области всплытия нефти				
	время всплытия, $t_в$, с	координата центра ОВН, Хц, м	длина ОВН, L, м	ширина ОВН, В, м	Площадь ОВН, S, м^2
1.	40,12	13,25	43,5	42,0	1827,0
2.	34,20	1,60	21,2	20,6	436,7
3.	13,25	0,10	42,6	42,0	1789,2
4.	25,49	1,50	23,0	23,6	542,8
5.	12,34	4,05	29,1	21,4	622,7
6.	4,69	1,15	20,3	23,8	483,1
7.	3,66	0,40	11,8	11,8	139,2
8.	22,05	4,50	8,0	7,6	60,8

Для разработанных уравнений связи коэффициенты множественной корреляции

составили более 0,80, что позволило сделать вывод о возможности применения полученных результатов для решения задач оперативного прогнозирования.

На основе анализа значимости факторов, входящих в состав полученных регрессионных уравнений, показано, что значительное влияние на координату центра области всплытия оказывает скорость течения и плотность нефти, на длину, ширину и площадь ОВН – глубина водоёма и масса нефти.

На рис. 5 показана карта Парето для времени всплытия под лед, из которой следует, что максимальное влияние на время всплытия оказывает плотность разлившегося нефтепродукта и также существенно влияние глубины моря, что согласуется с уравнением Стокса.

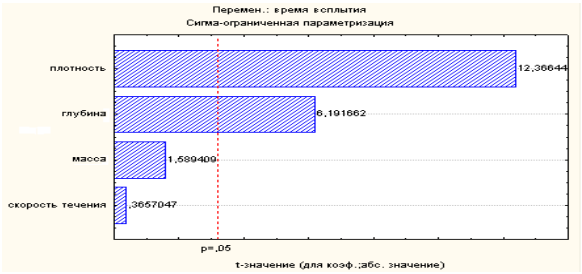


Рис. 5. Карта Парето для времени всплытия под лед

Заключение

1. В целом решаемые задачи являются новыми в области исследований распространения нефтяного загрязнения в водной среде. Модели, разработанные корейскими учеными Lee C.M., Kang K.H., Cho N.S. [14] справедливы для небольших глубин, а математические модели всплытия нефти, основанные на уравнении Стокса, не учитывают массовые, объемные и пространственные характеристики нефтяного разлива, что негативно сказывается на достоверности прогноза. Все указанные модели описывают процесс всплытия нефтяного загрязнения в виде совокупности частиц, а не как целого объекта, плавучесть которого очевидна выше, чем отдельных нефтяных частиц, что особенно актуально для решения задач прогнозирования нефтяного загрязнения от подводных источников на шельфе и на трубопроводном транспорте.

2. На основе результатов численного моделирования разработана система уравнений регрессии, связывающих характеристики области всплытия нефтепродукта и параметры нефтяного загрязнения.

Разработанная модель описывает процесс всплытия нефтяного загрязнения под лед как целого объекта, а не совокупности частиц.

3. Для обеспечения возможности получения оперативных прогнозов во временном масштабе не менее 1:500 в работе предложено использовать методы факторно-регрессионного анализа, поскольку численный эксперимент длится до 10 суток и временной масштаб составляет 1:0,01.

При этом для разработанных уравнений связи коэффициенты множественной корреляции составили более 0,80, что позволило сделать вывод о возможности применения полученных результатов для решения задач оперативного прогнозирования.

4. В целях совершенствования и уточнения математической (регрессионной) модели оценки параметров ОВН под лед целесообразно выполнить следующие исследования:

а. Численное моделирование сценариев всплытия нефти в ледовых условиях на сетке более высокого уровня.

б. Уточнение регрессионной модели оценки параметров ОВН по результатам численного моделирования.

в. Рассмотреть более широкие диапазоны изменения независимых факторов – плотность более 900 кг/м^3. (тяжелые нефти), скорость течения более 0,5 м/с, глубина водоема до 150 м. Необходимость этого обусловлена неоднородностью нефтегазоносных провинций Российской Федерации.

г. Проведение полнофакторного эксперимента, что положительно скажется на точности создаваемых моделей (приближения коэффициента множественной корреляции к значению $R^2 > 0,95$.

Литература

1. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н. Оценка нефтяного загрязнения от подводных источников // Журнал университета водных коммуникаций. 2013. №17(1). С.90-94.
2. Измайлов В.В. Трансформация нефтяных пленок в системе океан–лед–атмосфера // Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 9. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 145 с.
3. Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях. Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, вып. 77, с. 7-16.
4. Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S. Mathematical modeling of oil behaviour in ice: Proc. Of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions, National Board of Waters and the Environment. Helsinki, Finland, 1993. P. 175–184.
5. Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R. Spreading of crude oil on an ice surface // Can. J. of Chemical Eng. 1974. Vol. 52. P. 71–74.
6. Bobra A.M., Fingas M.F. The behaviour and fate of arctic oil spills // Wat. Sci. Tech. 1986. Vol. 18. P. 13–23..
7. Clark R.C., Finley J.S. Occurrence and impact of petroleum on Arctic environments // The Arctic Ocean. The hydrographic environment and the fate of pollutants. New-York: Wiley-Interscience, 1982. P. 295–341.
8. Reed M., Aamo O.M. Real time oil spill forecasting during an experimental oil spill in the Arctic ice // Spill science and Technology Bulletin. 1994. Vol. 1. № 1. P. 69–77.
9. Fingas M.F., Hollebone B.P. Behaviour of Oil in Freezing Environments // Literature Review. In Proceedings of the 25th Artie and Marine Oil Spill Program (AMOP). Technical Seminar. 2002. V. 2.
10. Fingas M.F., Hollebone B.P. Review of Behaviour of Oil in Freezing Environments // Marine Pollution Bull. 2003. V. 47.

11. Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R. Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters // Atmosphere-Ocean. 1990. Vol. 28 № 3. P. 303–329
12. Yapa P.D., Chowdlmry T. Spreading of Oil Spilled under Ice Journal of Hydraulic Eng /7 ASCE. 1990. V. 116. N. 12.
13. Смирнова М.Л., Чебан Е.Ю Применение модуля лагранжевых частиц программного комплекса FLOW VISION при моделировании обтекания технических средств локализации и ликвидации разливов нефти//Электрон. дан. Режим доступа URL: http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es09_vgavt.pdf (дата обращения 05.09.2018).
14. Chang-Fa An. Case study: CFD analysis helps develop up to 4X faster oil containment boom, Journal articles by fluent software users, JA127, DaimlerChrysler Technology Center, Auburn Hills, MI, 2001.

References

1. Naumov V.S., Plastinin A.E., Kalenkov A.N. Ocenka neftjanogo zagrjaznenija ot podvodnyh istochnikov, Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij. 2013. №17(1). S.90-94.
2. Izmajlov V.V. Transformacija neftjanyh plenok v sisteme okean–led–atmosfera, Problemy hi-micheskogo zagrjaznenija vod Mirovogo okeana. T. 9. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 145 s.
3. Stanovoj V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A. Sistema modelirovanija razlivov nefti v ledovityh morjah. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2007, vyp. 77, s. 7-16.
4. Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S. Mathematical modeling of oil behaviour in ice: Proc. Of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions, National Board of Waters and the Environment. Helsinki, Finland, 1993. P. 175–184.
5. Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R. Spreading of crude oil on an ice surface // Can. J. of Chemical Eng. 1974. Vol. 52. P. 71–74.
6. Bobra A.M., Fingas M.F. The behaviour and fate of arctic oil spills // Wat. Sci. Tech. 1986. Vol. 18. P. 13–23..
7. Clark R.C., Finley J.S. Occurrence and impact of petroleum on Arctic environments // The Arctic Ocean. The hydrographic environment and the fate of pollutants. New-York: Wiley-Interscience, 1982. P. 295–341.
8. Reed M., Aamo O.M. Real time oil spill forecasting during an experimental oil spill in the Arctic ice // Spill science and Technology Bulletin. 1994. Vol. 1. № 1. P. 69–77.
9. Fingas M.F., Hollebone B.P. Behaviour of Oil in Freezing Environments // Literature Review. In Proceedings of the 25th Artie and Marine Oil Spill Program (AMOP). Technical Seminar. 2002. V. 2.
10. Fingas M.F., Hollebone B.P. Review of Behaviour of Oil in Freezing Environments // Marine Pollution Bull. 2003. V. 47.
11. Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R. Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters // Atmosphere-Ocean. 1990. Vol. 28 № 3. P. 303–329
12. Yapa P.D., Chowdlmry T. Spreading of Oil Spilled under Ice Journal of Hydraulic Eng /7 ASCE. 1990. V. 116. N. 12.
13. Smirnova M.L., Cheban E.Ju Primenenie modulja lagranzhevyh chastic programmnogo kompleksa FLOW VISION pri modelirovanii obtekanija tehnicheskih sredstv lokalizacii i likvidacii razlivov nefti//Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es09_vgavt.pdf (data obrashhenija 05.09.2018).
14. Chang-Fa An. Case study: CFD analysis helps develop up to 4X faster oil containment boom, Journal articles by fluent software users, JA127, DaimlerChrysler Technology Center, Auburn Hills, MI, 2001.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 629.122/.123.004.67(083)

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СУДОРЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Евгений Геннадьевич Бурмистров
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru
Олег Константинович Зяблов
Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: zyablov_ok@mail.ru
Евгений Павлович Роннов
Профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой проектирования и технологии постройки судов
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, Нестерова ул., 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы автоматизации технологической подготовки производства в части обеспечения информационной поддержки проектирования технологических процессов судоремонта, формирования, учёта, контроля движения и корректировки ремонтной документации. Указывается, что в общей системе подготовки производства к ремонту судна технологическая подготовка является наибольшей по объёму выполняемых работ и представляет собой совокупность мероприятий по определению объёма и состава ремонтных работ и обеспечению технологической готовности производства. Это длительный и трудоёмкий процесс. При этом лишь незначительная часть времени (менее 15%) затрачивается на разработку собственно технологии ремонта и принятие организационных и технологических решений, а остальное – на поиск требуемой информации и оформление ремонтной документации. Поэтому приоритетным направлением развития судоремонта является автоматизация технологической подготовки производства.

С учётом отмеченного в статье приводятся промежуточные результаты разрабатываемой авторами комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонтного производства. В частности, приводится разработанная авторами структура комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонтного производства.

Ключевые слова: автоматизация, ремонтная документация, технологическая подготовка, типовые обобщенные модели технологии ремонта.

INTEGRATED COMPUTER-AID SYSTEM OF SHIP REPAIR PRE-PRODUCTION ENGINEERING

Evgeny G. Burmistrov
Professor, Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru
Oleg K. Zyablov
Associate Professor, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: zyablov_ok@mail.ru
Evgeny P. Ronnov
Professor, Dr.Sci.Tech, Head of the Department of Design and Technology of Building Ships
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova 5
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Abstract

The article deals with the automation of pre-production engineering in terms of providing information support for the design of ship repair engineering procedures, repair documentation generation, registration, turnover, and updating. It is indicated that in the common system of production planning for ship repair, pre-production engineering is the largest in terms of scope of work performed and is a set of measures to determine the scope and composition of repair work and ensure technological production availability. This is a long and labor-intensive process. At the same time, only an insignificant part of time (less than 15%) is spent on development of repair process technology itself and adoption of organizational and process decisions, and the rest is spent on search for required information and preparing repair documentation. Therefore, the priority for the development of ship repair is the automation of pre-production engineering.

Taking into account the noted, the interim results of integrated computer-aid system of ship repair pre-production engineering, being developed by the authors, are presented in the article. In particular, developed by the authors structure of integrated computer-aid system of ship repair pre-production engineering, is given.

Keywords: automation, repair documentation , pre-production engineering, typical principal models of repair process technology.

Введение

В общей системе подготовки производства к ремонту судна технологическая подготовка является наибольшей по объёму выполняемых работ и представляет собой совокупность мероприятий по определению объёма и состава ремонтных работ и обеспечению технологической готовности производства. Это длительный и трудоёмкий процесс. В общем виде он включает в себя анализ актов дефектации, проектирование технологии ремонта, разработку ремонтных ведомостей, определение объёма и стоимости ремонта, разработку средств технологического оснащения и проч. При этом лишь незначительная часть времени (менее 15%) затрачивается на разработку собственно технологии ремонта и принятие организационных и технологических решений, а остальное – на поиск требуемой информации и оформление ремонтной документации.

Поэтому одним из приоритетных направлений развития судоремонта является автоматизация технологической подготовки производства в части обеспечения информационной поддержки при проектировании технологических процессов ремонта, формирования, учёта, контроля движения и корректировки ремонтной документации.

Ниже излагаются основные аспекты первой очереди разрабатываемой авторами Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонтного производства.

1. Общая характеристика. Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонта

Данная система предназначена для ускорения процессов оценки трудоёмкости и себестоимости предполагаемого объёма ремонта и автоматического составления всех видов ремонтной документации. Она позволяет интегрировать данную информационную технологию в информационную среду предприятия [1], поддерживающую все основные этапы жизненного цикла судна.

В отличие от машиностроительных предприятий с серийным производством и сложными технологическими процессами судоремонтные заводы работают преимущественно с максимально упрощенными технологическими маршрутами ремонта. Технологические карты на ремонт при этом не разрабатываются. На производственные участки и рабочие места передаются технические распоряжения либо наряд-заказы, которые составляются на основании ремонтной ведомости, или же собственно ведомости. Отсутствие технологических карт негативно влияет на качество судоремонта. Как правило, оно полностью зависит от опыта и умений производственного мастера и рабочих-исполнителей.

С учётом реальных условий судоремонта и его специфики Комплексная автоматизированная система технологической подготовки производства включает два основных блока [2]:

1) программное обеспечение подготовки ремонтной документации – актов дефектации, ремонтных ведомостей, смет, ведомостей материалов, наряд-заказов и т.д. на основе создания и использования баз данных;

2) автоматизация проектирования технологических процессов судоремонта.

Структура Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонтного производства представлена на рис. 1.

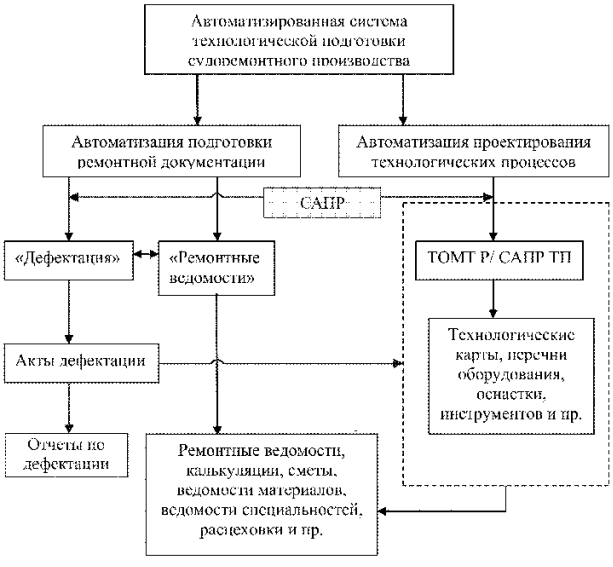


Рис. 1. Структура Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонта

В рамках первого блока авторами были поставлены и решены следующие задачи:

- создана унифицированная база данных в системе ACCESS [3] по элементам судна, типовым поверхностям, дефектам, видам ремонтных работ, способам ремонта, рабочим профессиям и материалам и пр.;
- созданы электронные формы актов заводской дефектации, ведомостей ремонта и прочей ремонтной документации;
- разработаны реляционные модели баз данных по дефектации и способам ремонта;
- созданы графические модели объектов ремонта и разработаны электронные карты обмера для перехода к автоматизированному проектированию технологических процессов;
- разработаны обобщенные электронные модели технологической подготовки судоремонта.

2. Работа с блоками Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонта

2.1 Работа с базовыми блоками

Работа с базой начинается в «Форме входа», которая позволяет открыть блоки «Дефектация» либо «Ведомости ремонта».

Оба раздела могут работать как автономно, так и в связке. Это позволяет формировать предварительную ведомость ремонта при работе с актами дефектации, а при формировании пакета ремонтных ведомостей использовать уже введённые на этапе дефектации виды работ.

Электронные формы актов дефектации содержат полное описание технического состояния связей корпуса и других элементов судна с указанием дефектов и способов их устранения, и приложения (таблицы замеров остаточных толщин, контроля параметров деталей механизмов и проч.). Формирование актов происходит в автоматическом режиме после введения оператором (технологом) сведений по дефектации.

В блоке «Ведомости ремонта» выполняется калькуляция работ, уточняется стоимость работ, при необходимости вводятся дополнительные работы, формируются плановые и исполнительные ремонтные ведомости, ведомости материалов и комплектующих, ведомости профессий, расцеховки работ, материалов и др.

2.2. Разработка графической модели объекта ремонта с экспликацией дефектов

Следующим этапом является создание графической модели объектов ремонта с указанием характерных дефектов для основных элементов судна (составляются как приложения к акту дефектации. Для корпуса такой графической моделью является растяжка наружной обшивки [4].

Создание модели растяжки является весьма трудоёмким процессом. Она должна иметь электронную базу, способную передавать необходимую информацию для дальнейшей обработки в другие системы, и быть максимально информативной. Кроме того, принятые обозначения дефектов должны быть унифицированы.

Для «возрастных» судов задача создания электронной модели растяжки не менее актуальна. Для её разработки необходимо иметь исходный (бумажный) чертёж, преобразованный в электронный формат. Перевод бумажного чертежа в растровый формат выполняется без каких-либо проблем и может быть осуществлён даже с помощью мобильного телефона. Дальнейший перевод его в векторный формат может быть осуществлён одной из следующих программ: Seris2; Algolab Photo Vector; Easy Trace; RasterVect; Vector Magic DE, Aide pdf to dxf converter, Sportlight и др.

В качестве примера ниже поэтапно описан процесс создания элемента растяжки наружной обшивки судна с использованием Sportlight.

1) Сканирование или фотографирование бумажного чертежа. Результат – фотография весьма посредственного качества.

2) Устранение перекосов чертежа, выравнивание его по осям.

2) Фильтрация чертежа. Очистка фотографии от «шумов», заливка «дырок» и т.д.

3) Автоматическое создание векторной копии чертежа.

В любом случае после подобных преобразований пользователь получит лишь подобие качественного чертежа. Характерные его недостатки (штриховая линия из отдельных элементов, текстовые обозначения в виде линий и т.п.) усложняют дальнейшее создание модели растяжки.

Данный способ можно рекомендовать только при наличии качественного сканированного рисунка со сверхвысоким разрешением, с минимальным количеством побочных элементов (следов от сломов чертежа, пометок и т.п.).

Ограничиваясь этапами 1 и 2 подобным же образом можно осуществлять формирование электронного архива конструкторской документации для информационного обеспечения жизненного цикла судна и планирования его техобслуживания и ремонта.

Учитывая, что растяжка наружной обшивки, состоит из линейных примитивов (отрезки различных типов – сплошная, пунктирная, штрихпунктирная линии), для создания качественной модели можно использовать более удобный способ – обводка с использованием любого электронного инструментария (AutoCad, Компас и др.) подложенного растрового рисунка. Следует иметь в виду, однако, что такой подход требует длительного кропотливого труда, что при сжатых сроках на проведение подготовительных работ при судоремонте не всегда приемлемо.

Отечественные классификационные общества в составе Отчета по дефектации допускают предъявление не классической растяжки с экспликацией дефектов и износов, а схем поверхностей корпуса, выполненных с соблюдением примерных пропорций и с учётом их изменений после предыдущих ремонтов. Такие схемы могут быть выполнены любым графическим редактором, вплоть до стандартного Paint.

Автоматизированное создание максимально информативной модели (растяжки), в данных программных продуктах возможно с использованием стандартных модулей, (специальный блок в AutoCAD, библиотека фрагментов модели в Компасе). Или, путём написания пользовательских

подпрограмм с применением языков программирования VBA или AutoLisp.

Во всех случаях необходимо определиться с номенклатурой износов, деформаций и повреждений, которые должны быть отражены на растяжке и позже переданы в другие приложения для обработки и формирования ремонтной документации.

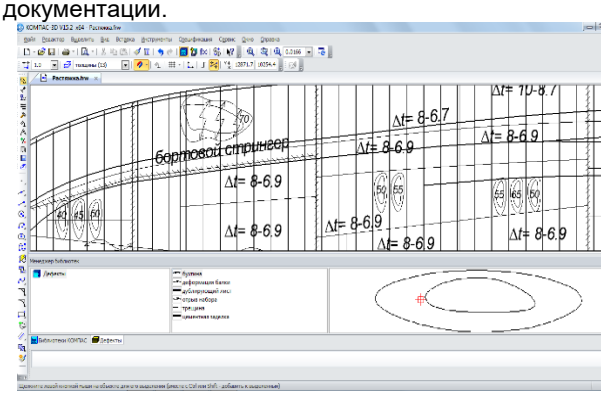


Рис. 2. Пользовательская библиотека дефектов

Рассмотрим подробнее изложенные способы.

Для формирования растяжки в среде Компас-3D создается библиотека, содержащая дефекты обшивки корпуса (рисунок 2). Её необходимо подключить к файлу растяжки наружной обшивки, а затем переместить объекты на поле чертежа. Созданные элементы фрагментов имеют средства параметризации, которые при вставке, запрашивают необходимые значения.

Другой способ создания растяжки, это написание пользовательского приложения в среде Autodesk AutoCAD с использованием языка AutoLisp / VisualLisp. В стандартную панель инструментов добавляется панель «Дефекты корпуса» и пункт меню с аналогичным названием.

При нажатии на примитив программой запрашиваются параметры соответствующего дефекта: габаритные размеры, стрелка прогиба, количество бухтин в гофрировке, координаты местонахождения и т.д. После введения необходимой информации выполняется программный код, позволяющий изобразить по введенным параметрам дефект на растяжке корпуса. Одновременно создаются текстовые файлы, в которых описываются изображаемые дефекты. Такие программы разработаны авторами и адаптированы для работы в AutoCad, в версиях с 2007 по 2018 для всех основных дефектов.

2.3. Обработка результатов измерений

На этапе дефектации на растяжку должны быть нанесены дефекты и износы связей, подразумевающие большое количество измерений и фиксацию их численных данных на её поле. Обработку больших объёмов измерений целесообразно выполнять в электронных таблицах (например, MS Excel). В таблицу, в качестве подложки, может быть внедрена разработанная одним из описанных методов, схема-растяжка или подвергнутый очистке и преобразованию чертёж (рисунок 3). При этом значения замеренных износов и положения дефектов, занесённые в ячейки таблицы, соответствуют листам наружной обшивки.

В дальнейшем информация передается в шаблоны, в которых она обсчитывается, и выдаются готовые к печати формы таблиц (рисунок 4).

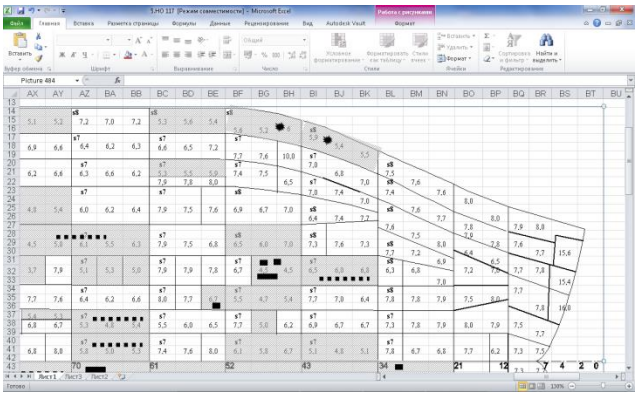


Рис. 3. Растяжка наружной обшивки в MS Excel

Рассмотренные выше способы применимы, когда первым этапом является составление растяжки, а его продолжением – акт дефектации. Использование программирования и «связей» позволяет, при необходимости, выполнять задачу и в обратной последовательности: по существующим таблицам данных дефектации формировать растяжку наружной обшивки.

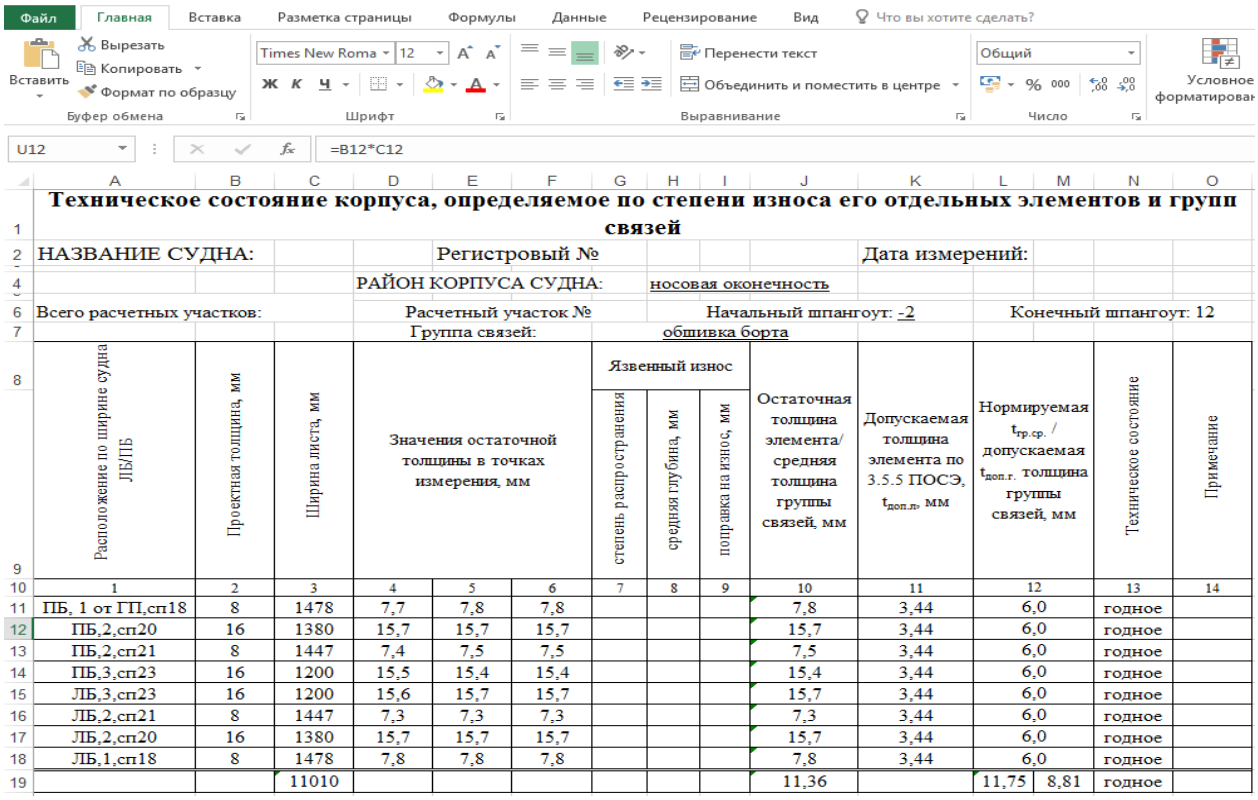
Подобные приложения могут быть использованы не только при ремонте судна, но и при его модернизации, реновации на основе элементов судна донора и т.д.

2.4. Интеграция блоков Комплексной автоматизированной системы технологической подготовки судоремонта

Предлагаемое авторами решение позволяет значительно снизить трудовые и временные затраты на выпуск полного комплекта ремонтной документации.

Интеграция графических моделей в блок «Дефектация» обеспечивает переход из формы акта дефектации по тому или иному элементу судна (корпус, электрооборудование, ДРК и др.) к графическим моделям объектов ремонта [5]. Интерфейсы блока дефектации по корпусу и ДРК с интегрированными графическими моделями представлены на рисунке 5.

Параметры дефектов, вводимые в процессе графического моделирования, одновременно автоматически фиксируются в актах дефектации. Полученные графические модели можно просмотреть и распечатать как непосредственно из программы, так и из формы акта дефектации с панели «Отчёты».



Техническое состояние корпуса, определяемое по степени износа его отдельных элементов и групп связей

НАЗВАНИЕ СУДНА: Регистровый №: Дата измерений:

РАЙОН КОРПУСА СУДНА: носовая оконечность

Всего расчетных участков: Расчетный участок №: Начальный шпангоут: -2: Конечный шпангоут: 12

Группа связей: обшивка борта

Расположение по ширине судна ЛБ/ПБ	Проектная толщина, мм	Ширина листа, мм	Значения остаточной толщины в точках измерения, мм			Язвенный износ: степень распространения	Язвенный износ: средняя глубина, мм	Язвенный износ: поправка на износ, мм	Остаточная толщина элемента/ средняя толщина группы связей, мм	Допускаемая толщина элемента по 3.5.5 ПОСЭ, $t_{доп.л}$, мм	Нормируемая $t_{тр.ср.}$ / допускаемая $t_{доп.г.}$ толщина группы связей, мм		Техническое состояние	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13	14
ПБ, 1 от ГП,сп18	8	1478	7,7	7,8	7,8				7,8	3,44	6,0		годное	
ПБ,2,сп20	16	1380	15,7	15,7	15,7				15,7	3,44	6,0		годное	
ПБ,2,сп21	8	1447	7,4	7,5	7,5				7,5	3,44	6,0		годное	
ПБ,3,сп23	16	1200	15,5	15,4	15,4				15,4	3,44	6,0		годное	
ЛБ,3,сп23	16	1200	15,6	15,7	15,7				15,7	3,44	6,0		годное	
ЛБ,2,сп21	8	1447	7,3	7,3	7,3				7,3	3,44	6,0		годное	
ЛБ,2,сп20	16	1380	15,7	15,7	15,7				15,7	3,44	6,0		годное	
ЛБ,1,сп18	8	1478	7,8	7,8	7,8				7,8	3,44	6,0		годное	
		11010							11,36		11,75	8,81	годное	

Рис. 4. Таблица замеров износов связей

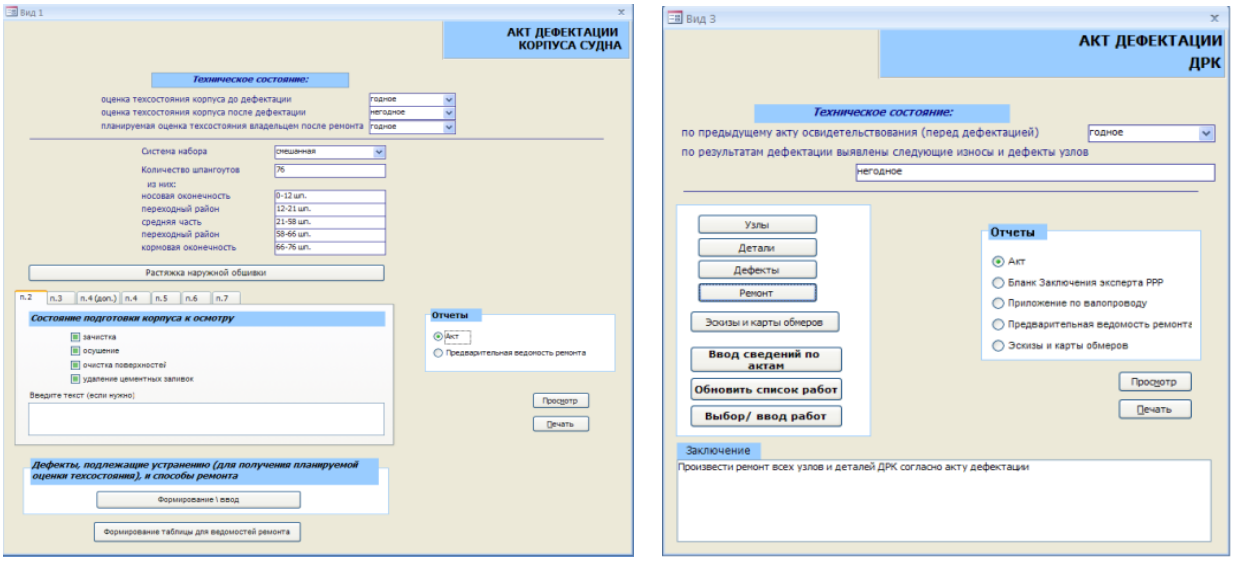


Рис. 5. Интерфейсы блока дефектации по корпусу и ДРК

Заключение

Данная работа направлена на создание единой интегрированной информационной среды в сфере судостроения и судоремонта. В результате проработана общая структура Комплексной автоматизированной системы подготовки судоремонтного производства, включающей 2 блока:

1) автоматизация подготовки технологической документации;

2) автоматизация проектирования технологических процессов судоремонта.

В рамках первого блока для ремонта корпуса судна и движительно-рулевого комплекса разработано программное обеспечение подготовки технологической документации – актов дефектации, ремонтных ведомостей, смет, ведомостей материалов, технических распоряжений, наряд-заказов и т. д. Графические модели объектов ремонта интегрированы в блок «Дефектация». Сформированные базы данных могут актуализироваться в соответствии с состоянием элементов судна, оснащенностью судоремонтных заводов, пополняться сведениям по существующим

и новым проектам судов, новым технологическим методам, способам и приёмам ремонта.

Данная часть работы успешно апробирована на ОАО «Чкаловская судоверфь»,.при ремонте судов ЗАО СК «БашВолготанкер» и ООО «Средневолжская судоходная компания».

В рамках второго блока, на основе проведённого анализа существующих программных продуктов отвечающих CALS стандартам выбран Комплекс Askon, включающий системы: КОМПАС-3D, КОМПАС-График, ВЕРТИКАЛЬ, ЛОЦМАН: PLM. Существующие отраслевые справочники позволяют генерировать и аккумулировать производственную, организационную и управленческую информацию, предоставлять её техническим службам, обеспечивать обмен заданиями между различными бюро и отдельными специалистами, управляя таким образом проектом ремонта судна. Данный комплекс может быть адаптирован для конкретного судоремонтного завода.

Изложенное позволяет значительно (на 70-80%) ускорить технологическую подготовку производства, повысить качество ремонтных работ, конкурентоспособность судоремонтных предприятий, внедривших данную систему.

Литература

1. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; Е.В. Судов, А.И. Левин. – М., 2002.
2. Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Структура системы комплексной автоматизации технологической подготовки судоремонтного производства / Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2010»: Труды конгресса: в 2 т. - НГАСУ, 2011. – Т.2 – С. 291–293.
3. Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Создание унифицированной базы данных в составе программного обеспечения автоматизированной подготовки ремонтной документации Вестник ВГАВТ. - Н.Новгород: изд. ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010, - Вып. 28. – С. 21–23.
4. Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Графическое моделирование объектов ремонта в составе электронных актов дефектации по корпусу и ДРК судна / О.К. Зяблов, Е.В. Фунтикова // Вестник ВГАВТ. Выпуск 31. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – С. 57–59.
5. Зяблов О.К. Интеграция графических моделей объектов ремонта в систему автоматизированной подготовки ремонтной документации / О.К. Зяблов, Е.В. Фунтикова, Ю.А. Кочнев // Труды 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2014». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «проблемы использования инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2014. – С. 297–300.

References

1. Koncepciya razvitiya CALS-tekhnologij v promyshlennosti Rossiiю. NIC CALS-tekhnologij «Prikladnaya logistika»; E.V. Sudov, A.I. Levin. M., 2002.
2. Zyablov O.K., Funtikova E.V. Struktura sistemy kompleksnoj avtomatizacii tekhnologiche-skoj podgotovki sudoremontnogo proizvodstva. Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki–2010»: Trudy kongressa: v 2 t, NGASU, 2011, T.2, S. 291-293.
3. Zyablov O.K., Funtikova E.V. Sozdanie unificirovannoj bazy dannyh v sostave programm-nogo obespecheniya avtomatizirovannoj podgotovki remontnoj dokumentacii Vestnik VGAVT. N.Novgorod: izd. FGOU VPO «VGAVT», 2010, Vyp. 28, S. 21-23.
4. Zyablov O.K., Funtikova E.V. Graficheskoe modelirovanie ob"ektov remonta v sostave elektronnyh aktov defektacii po korpusu i DRK sudna. O.K. Zyablov, E.V. Funtikova // Vestnik VGAVT. Vypusk 31, N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2012, S. 57-59.
5. Zyablov O.K. Integraciya graficheskih modelej ob"ektov remonta v sistemu avtomatiziro-vannoj podgotovki remontnoj dokumentacii, O.K. Zyablov, E.V. Funtikova, Yu.A. Kochnev // Trudy 16-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki – 2014». Mate-rialy nauchno-metodicheskoj konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspi-rantov, specialistov i studentov «problemy ispol'zovaniya innovacionnogo razvitiya vnut-rennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Tom 1, N.Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGAVT», 2014, S. 297-300.

УДК 629.5.061.11

ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ШВАРТОВКИ СУДНА В РАМКАХ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ

Валерий Иванович Плющаев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники,
Волжский государственный университет водного транспорта
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Игорь Константинович Кузьмичев
доктор технических наук, профессор, ректор
Волжский государственный университет водного транспорта
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru

Аннотация

В России ведется строительство судов с уникальным колесным движительно - рулевым комплексом, включающим в свой состав два гребных колеса в кормовой части и азимутальное подруливающего устройство. Основной целью работы является поиск безопасных режимов управления, позволяющих обеспечить движение судна по произвольной траектории с заданным положением корпуса (в т. ч. автоматическую швартовку), а также путей реализации информационного обмена судна с береговыми центрами управления при выполнении подобных операций.

Предложен алгоритм управления, позволяющий осуществлять движение судна по произвольной траектории с заданным положением корпуса. Приведена математическая модель с использованием которой проведено моделирование динамики судна при реализации предложенного алгоритма. Представлены результаты моделирования, доказывающие эффективность алгоритма.

Реализация технологии безэкипажного судовождения (в т.ч. и автоматической швартовки) требует наличие надежных каналов связи между судами и береговыми центрами управления. В работе рассмотрена возможность реализации канала связи для передачи технологической и управленческой информации по сетям на базе автоматических идентификационных систем (АИС). Предложенная структура судовых сообщений позволяет проводить отправку в диспетчерские пункты и судовладельцам больших объемов дополнительной информации по каналам АИС без затрат на организацию и оплату дополнительных каналов связи. Приведены результаты экспериментальной проверки макета системы передачи данных на базе АИС.

Ключевые слова: судно, алгоритмы управления, автоматическая швартовка, каналы передачи данных, АИС, безэкипажное судовождение.

WAYS FOR IMPLEMENTATION OF SHIP'S AUTOMATIC MOORING WITHIN THE FRAMEWORK OF TECHNOLOGY DESIGN FOR UNMANNED NAVIGATION

Valery I. Plyushchaev
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Radio Electronics Department,
Volga State University of Water Transport
603005, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Igor K. Kuzmichev
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of University
Volga State University of Water Transport
603005, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru

Abstract

Russia builds ships with unique wheeled propulsion and steering unit, which includes two paddle wheels in the stern and an azimuth thruster. The main goal of the work is to search for safe control modes that allow a ship to move along an arbitrary trajectory with a given hull position (including automatic mooring), as well as ways to implement the ship’s communication with coastal control centers when performing such operations.

A control algorithm is proposed that allows a ship to move along an arbitrary trajectory with a given hull position. A mathematical model is given, with the use of which simulation of dynamics of a ship during implementation of the proposed algorithm was performed. Simulation results that prove the efficiency of the algorithm are presented.

The implementation of unmanned navigation technology (including automatic mooring) requires availability of reliable communication channels between ships and coastal control centers. The paper reviews possibility of implementing a communication channel for transfer of technological and control information over networks based on automatic identification systems (AIS). The proposed structure of ship reports allows high-volume additional information transfer to automated control centers and ship-owners via AIS channels without the costs of arranging and paying for additional communication channels. The results of experimental verification of the data transmission system model based on AIS are given.

Keywords: ship, control algorithms, automatic mooring, data transmission channels, AIS, unmanned navigation.

Введение

В России впервые в мире появились суда с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК), у которых отсутствует традиционный руль. Два гребных колеса расположены по бортам судна в кормовой части. Величина и направление вектора тяги определяется соотношением числа оборотов и направлением вращения гребных колёс, имеющих независимые электроприводы (включающие в свой состав преобразователи частоты и асинхронные электродвигатели).

В настоящее время в эксплуатации находятся три судна проекта ПКС-40, имеющие сравнительно небольшие габариты (примерно 35 м * 10м * 8.5 м). Ведется строительство крупного пассажирского судна с КДРК проекта ПКС-180, имеющего габаритные размеры 81,6 * 13,8 * 9,5 м, осадку всего 1.2 м, пассажировместимость 180 человек. Суда обладают малой осадкой, хорошей маневренностью, очень низким расходом топлива. В то же время, конструктивные особенности судов (малая осадка, большая парусность, управление за счет изменения соотношения частот вращения гребных колес) предъявляют к судоводителю повышенные требования для обеспечения высоких качественных показателей процесса управления. При эксплуатации судов с КДРК также встала задача обеспечения эффективной и безопасной швартовки, являющейся сложным и ответственным элементом рейса. Разработанная для судов с КДРК компьютеризированная система управления позволяет существенно поднять эффективность управления, в частности обеспечивая автоматический выбор соотношения частот вращения гребных колес при изменении курса [1].

Цель данной статьи – поиск безопасных режимов управления судна с КДРК, позволяющих обеспечить движение судна по произвольной траектории с заданным положением корпуса, а также путей реализации информационного обмена судна с береговыми центрами управления при выполнении подобных операций.

1. Специфические особенности колесного движительно-рулевого комплекса

Гребные колеса судов с КДРК имеют принципиальное отличие от гребных колес традиционного типа. Плицы колес судна с КДРК имеют аксиально-винтовую форму, в результате вектор тяги гребных колес оказывается направленным под углом α к диаметральной плоскости (ДП) судна (для проекта ПКС-40 угол $\alpha = 15^0$).

Это приводит к увеличению составляющей вектора тяги P'_{k1}, создающей вращающий момент (рис.1).

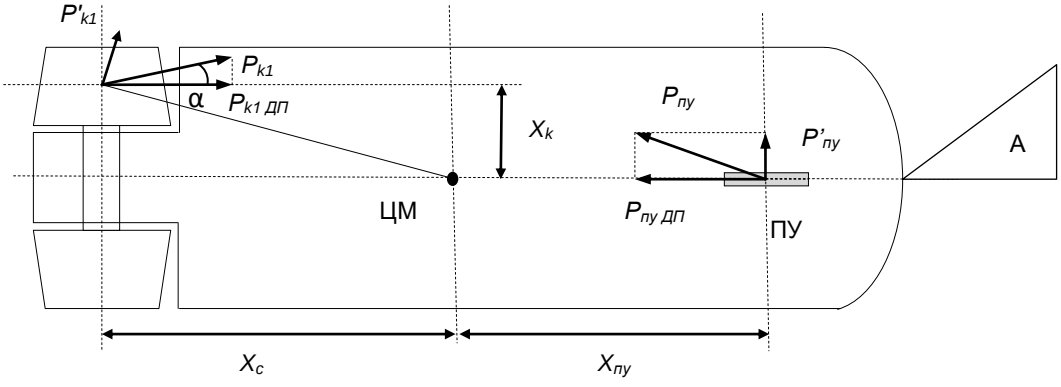


Рис. 1. Судно с КДРК, оборудованное ПУ

Для теплоходов проекта ПКС-40 вращающий момент такого колеса в 2,3 превышает вращающий момент классического колеса (при одинаковой тяге колес), что существенно повышает управляемость судна. Влияние величины угла α на P_{k1} наиболее заметно с уменьшением отношения ширины корпуса к его длине. При этом снижение $P_{k1\ дп}$ (составляющая упора гребного колеса вдоль ДП, которая определяет скорость судна) весьма незначительно. Так для судна проекта ПКС-180, имеющего длину около 80 м, вращающий момент при изменении направления вектора тяги гребных колес от 5^0 до 15^0 и составляющая силы, формирующей

вращающий момент, увеличивается примерно в 1.3 раза.

Но у судов с КДРК есть и существенный недостаток – невозможно обеспечить движение судна лагом, что затрудняет выполнение швартовых операций. Решить эту проблему можно оборудовав судно с КДРК подруливающим устройством (ПУ на рис. 1). Традиционные ПУ обеспечивают создание дополнительной тяги $P_{пу}$, приложенной к носовой части судна в направлении перпендикулярном ДП судна.

При одном работающем колесе, вращающий момент, создаваемый составляющей тяги колеса P'_{k1}, может быть уравновешен моментом, создаваемым тягой ПУ $P_{пу}$, что позволяет стабилизировать положение корпуса в плоскости xy. Движение вперед определяется составляющей $P_{k1ДП}$. Поскольку у тяги традиционного ПУ нет составляющей, направленной вдоль ДП, судно может передвигаться лагом по направлениям в пределах некоторого сектора А (рис.1). Принципиально невозможно при данном типе ПУ осуществить движение лагом под углом близким к 90^0 .

При смене направления вектора тяги ПУ и соответствующем направлении вращения гребных колес можно осуществлять движение лагом и в противоположных направлениях (вперед вправо, назад влево и вправо). Для движения лагом в направлениях близких к 90^0 и 180^0 необходимо иметь ПУ с поворотным вектором тяги. Такими устройствами являются носовые азимутальные ПУ (АПУ), позволяющие менять как величину тяги, так и ее направление.

При одном работающем колесе вращающий момент, создаваемый составляющей тяги P'_{k1},может быть уравновешен вращающим моментом, создаваемым составляющей силы тяги ПУ $P'_{пу}$ (тем самым будет обеспечена стабилизация ДП судна под определенным углом). Сумма составляющих тяги гребного колеса $P_{k1ДП}$ и ПУ $P_{пу\ ДП}$ вдоль ДП обеспечит поступательное движение судна вперед или назад.

Алгоритм работы можно представить следующим образом:

– при движении судна вперед с заданной скоростью выключается правое гребное колесо и включается азимутальное подруливающее устройство;

– выключается правое колесо и включается АПУ;

– за счет $P_{пу\ ДП}$ происходит торможение судна (полученная скорость определяется соотношением ($P_{k1ДП}$ - $P_{пу\ ДП}$) и может быть как положительной, так и отрицательной);

– за счет P'_{k1} и $P'_{пу}$ выравниваются вращающие моменты, что позволяет стабилизировать положение корпуса судна и его движение лагом в заданном направлении под углом от 0^0 до 180^0;

– при работе правого колеса и азимутального подруливающего устройства обеспечивается движение лагом под углами от 180^0 до 360^0.

Перемещение лагом можно осуществить и при работе одного из колес назад.

Таким образом, дооснащения судна с КДРК азимутальным подруливающим устройством существенно повышает маневренность и управляемость судна, в том числе обеспечивает возможность перемещения лагом в любом выбранном направлении.

2. Математическая модель судна с КДРК

Для исследования динамических характеристик судна с КДРК и азимутальным подруливающим устройством, в том числе при изменении условий плавания, отработки алгоритмов управления создана его математическая модель [2].

В уравнениях приняты следующие обозначения: n_1 – частота вращения левого гребного колеса; n_2 – частота вращения правого гребного колеса; n_{max} – максимальная частота вращения колеса; f_{pr} (т, U), $f_{ny}(t, U_{ny})$ – кривые разгона частотных приводов двигателей гребных колес (программируется при его настройке) и подруливающего устройства; V , V_p , V_0 – линейная, поперечная и результирующая скорости движения судна; P_{ny} – мощность подруливающего устройства; γ_{ny} , γ_{ny_c} , $\gamma_{ny_н}$ – угол поворота подруливающего устройства (текущее, старое и новое значения, $t_{пн}$, $t_{пк}$ – моменты начала и окончания поворота ПУ); m – масса судна; J – момент инерции судна с учетом присоединенных масс воды относительно центра масс; $X_{пу}$– расстояние от места установки ПУ до центра масс судна; α – угол между вектором тяги, создаваемым шевронными плицами гребных колес, и ДП судна; M_R – момент силы сопротивления воды; ω – угловая скорость поворота судна относительно центра масс; U_1, U_2,$U_{пу}$ – управляющие воздействия; $\Omega см$ – площадь смоченной поверхности корпуса судна; ζ – коэффициент сопротивления; ρ – плотность воды; Cp (n, V) – коэффициент упора (вычисляется по результатам натурных испытаний модели судна); A, B – коэффициенты, зависящие от конструкции и размеров гребных колес и корпуса судна; ψ – угол курса судна; ψ_{V_0} – угол направления результирующей скорости относительно неподвижной системы координат.

$$
\begin{cases}
\tau_p \cdot \dfrac{dn_1}{dt} + n_1 = f_{p}(t, U_1) \cdot n_{max}; \\
\tau_p \cdot \dfrac{dn_2}{dt} + n_2 = f_{p}(t, U_2) \cdot n_{max}; \\
\tau_{пу} \cdot \dfrac{dP_{пу}}{dt} + P_{пу} = P_{пу\,ст}; \\
\tau_{пу} \dfrac{d\gamma_{пу}}{dt} + \gamma_{пу} = \begin{cases} \gamma_{пу_c}, \text{ при } t < t_{пн}; \\ \gamma_{пу_c} + \dfrac{t - t_{пн}}{14} sign(\gamma_{пу_н} - \gamma_{пу_c})\, 2\pi, \text{ при } t_{пн} \le t \le t_{пк}; \\ \gamma_{пу_н}, \text{ при } t > t_{пк}, \end{cases} \\
m\dfrac{dV}{dt} = A \cdot \left[C_{\beta}(n_1, V_0) \cdot n_1^2 \cdot sign(n_1) + C_{\beta}(n_2, V_0) \cdot n_2^2 \cdot sign(n_2)\right] \cos\alpha - P_{пу} \cos\gamma_{пу} - \zeta \dfrac{\rho V_0^2}{2} \Omega_{см} \cdot sign(V); \\
m\dfrac{dV_p}{dt} = A \cdot \left[C_{\beta}(n_1, V_0) \cdot n_1^2 \cdot sign(n_1) - C_{\beta}(n_2, V_0) \cdot n_2^2 \cdot sign(n_2)\right] \sin\alpha - P_{пу} \sin\gamma_{пу} - \zeta_1 \dfrac{\rho V_p^2}{2} \Omega_{см1} \cdot sign(V_p); \\
J\dfrac{d\omega}{dt} = B \cdot \left[C_{\beta}(n_2, V_0) \cdot n_2^2 \cdot sign(n_2) - C_{\beta}(n_1, V_0) \cdot n_1^2 \cdot sign(n_1)\right] - P_{пу} \sin\gamma_{пу} X_{пу} - M_R \cdot sign(\omega); \\
\dfrac{d\psi}{dt} = \omega; \\
\dfrac{dy}{dt} = V_0 \cos(\psi + \psi_{V_0}); \\
\dfrac{dx}{dt} = V_0 \sin(\psi + \psi_{V_0});
\end{cases}
$$

$$
V_0 = \sqrt{V^2 + V_p^2}; \qquad \psi_{V_0} = Z\,\pi + sign\,(V \bullet V_P)\, arc\sin\frac{|V_P|}{V_0}; \qquad Z = \begin{cases} 0 & при\ V \ge 0; \\ 1 & при\ V < 0; \end{cases}
$$

$$
P_{пу\,ст} = \begin{cases} -917.3V_0 + 8200\, f_{пу}(t, U_{пу}) \text{ при } P_{пу\,ст} \ge 0; \\ 0 \quad при\ P_{пу\,ст} < 0, \end{cases}
$$

3. Алгоритм управления

Задачу обеспечения движения судна с КДРК лагом можно условно разбить на две составляющие:

– стабилизацию ДП судна в заданном направлении;

–перемещение судна лагом в заданном направлении.

Результаты расчетов с использованием модели приведены на рис. 2 (представлены возможные траектории движения судна лагом при различных частотах вращения гребного колеса *n* и заданном направлении движения $\varphi_{зад} = \pi/2$).

Линиями показано положение ДП судна в пространстве (кружок – корма, крестик – нос судна). Длина линии не связана с его геометрическими размерами. При увеличении частоты вращения гребного колеса растет поперечная скорость и пройденное по оси *y* расстояние.

Рассмотренный алгоритм позволяет осуществлять движение лагом с заданным положением ДП судна (*φзад*) в пространстве.

Управление судном можно осуществлять одним органом - 4-х координатным джойстиком (задается курс, скорость движения и положение ДП судна). На рис. 3 приведены результаты расчетов при управлении судна джойстиком. Положение джойстика изменяется через 200 с (положению 1 соответствует 1 участок траектории движения, положению 2 – 2 участок и т.д.).

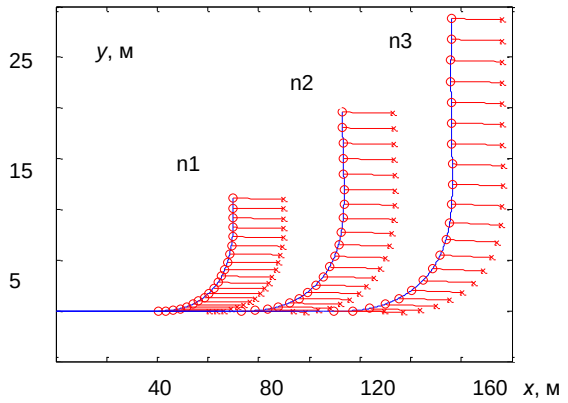


Рис. 2. Траектория движения судна при различных частотах вращения колеса (n1 = 0,05 1/с, n2 = 0,075 1/с, n3 = 0,1 1/с) и $\psi_{зад}$ = π/2)

4. Каналы обмена информацией

Использование компьютеризированных судовых систем управления, интеллектуальных алгоритмов позволяют реализовать перспективную концепцию безэкипажного судовождения. Но для реализации концепции безэкипажного судовождения кроме создания систем управления, которые обеспечат диагностику узлов системы, мониторинг систем корабля, реализацию алгоритмов и т. д., требуется наличие надежного

информационного канала связи с наземными центрами управления (например, для реализации автоматической швартовки).

Известны попытки создания систем передачи технологической информации с судов в береговые центры, использующие для передачи данных различные каналы связи – судовые станции спутниковой связи Inmarsat , Globalstar, Iridium, сети GSM/CDMA или сети транкинговой связи. Существенный недостаток рассмотренных систем – высокие расходы на обслуживание линий передачи данных (аренда существующих каналов у сторонних операторов или организация собственной дополнительной сети).

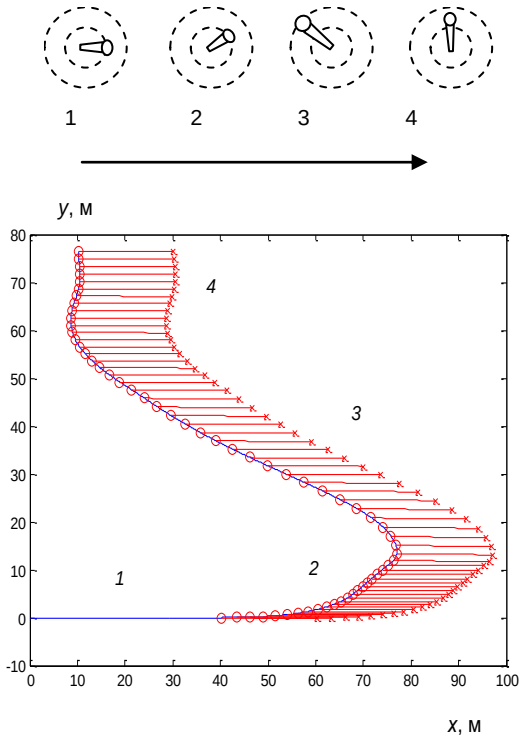


Рис. 3. Траектория движения судна при управлении джойстиком

В тоже время, на внутренних водных путях с помощью АИС технологий созданы системы непрерывного контроля за перемещениями судов и их техническим состоянием. Береговые диспетчерские пункты имеют возможность не только идентифицировать флот, находящийся в зоне их ответственности, но и получать динамические, статистические и рейсовые параметры, автоматически передаваемые АИС с судов.

Передаваемую информацию в направлениях судно – берег и берег - судно можно разделить на основные группы:

– данные по обеспечению безопасности и организации движения;

– технологическая информация – параметры судовых систем, агрегатов и механизмов, корпуса, расход топлива и т. д.;

–навигационные данные (статические и динамические параметры судна и окружающих объектов);

–данные береговых центров управления;

–данные для судоходных компаний;

–текстовые сообщения, связанные с жизнедеятельностью судна и экипажа и пр.

Перечисленные выше группы данных не включены в перечень стандартных сообщений АИС, имеющих жестко заданную структуру и предназначенных для передачи строго определенного набора информации. Всего определено 26 типов сообщений. Среди них 6 видов, обеспечивающих отправку двоичных данных [3]: тип 6 (адресное двоичное), тип 8 (двоичное широковещательное), тип 12 (адресное, связанное с безопасностью), тип 14 (широковещательное, связанное с безопасностью), тип 25 (однослотовое двоичное), тип 26 (многослотовое двоичное). Передачу данных, не утвержденных стандартами АИС, целесообразно осуществлять с помощью адресного бинарного сообщения № 6 (Addressed Binary Message), объемом до 920 бит [3].

Согласно Рекомендации МСЭ ITU-R M.1371-1, каждое двоичное сообщение должно иметь идентификатор области применения (Application Identifier – AI), указываемый в заголовке поля двоичных данных. Идентификатор области применения содержит два параметра: код обозначенного района DAC (Designated Area Code) и функциональный идентификатор FI (Function Identifier). Дунайской комиссией был принят стандарт для систем обнаружения и отслеживания судов на ВВП, где рекомендуется использовать код обозначения района DAC для ВВП, равный 200 [4]. На национальном уровне возможно введение дополнительных идентификаторов, например FI=30,31,32.

Предложенная структура судовых сообщений позволяет реализовать отправку в диспетчерские пункты и судовладельцам больших объемов дополнительной информации по каналам АИС без затрат на организацию и оплату дополнительных каналов связи.

В Волжском государственном университете водного транспорта был создан специальный лабораторный образец системы сбора и передачи информации по каналам АИС, реализующий описанный подход [5]. В его функции входит контроль параметров дизеля судна и обмен с диспетчерским пунктом технологическими данными, а также сведениями по обеспечению безопасности и оперативному управлению. Программное обеспечение судового модуля системы позволяет реализовать прием и передачу информации по каналам АИС в ручном и автоматическом режиме; ввод данных по безопасности судоходства в специализированные таблицы; отчетных документов и сообщений для судовладельцев; отображение текстовых сообщений, принятых с береговых диспетчерских пунктов.

На рис. 4 приведены некоторые рабочие окна судового модуля системы передачи данных и наземного диспетчерского пункта.

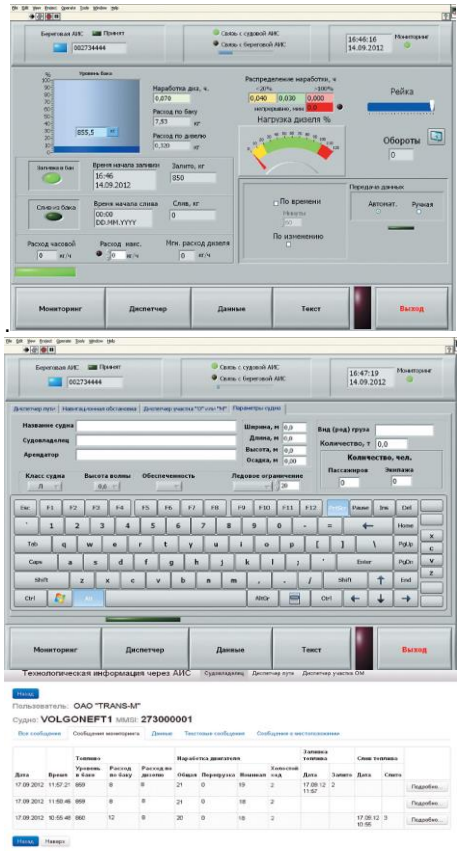


Рис. 4. Рабочие окна судового модуля системы передачи данных и наземного диспетчерского пункта

Проблема перегрузки основных частот AIS1 и AIS2 при отправке дополнительных сведений не является критичной для условий плавания, сложившихся на ВВП.

Заключение

Таким образом, применение комплекса инновационных технологий, а именно:

– сочетание на судне колесного движительно - рулевого комплекса и азимутального подруливающего устройства;

– компьютеризированной системы управления (объединяющей функции контроля, диагностики, управления и обмена информации с береговыми пунктами управления) и алгоритмического обеспечения;

–доступного и надежного канала обмена информацией,

позволяют реализовать отдельные составляющие технологии безэкипажного судовождения.

Литература

1. Плющаев В.И., Галкин Д.Н., Итальянцев С.А. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом. Речной транспорт (XXI век). 2014. № 6(71), с. 35-37.
2. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Управление судном с колесным движительно-рулевым комплексом при выполнении швартовых операций. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология . 2017. №4, с.21-30.
3. ITU1371. – Recommendation ITU-R M.1371-3, International Telecommunication Union. June 2006.
4. Стандарт для систем обнаружения и отслеживания судов на внутренних водных путях. Дунайская комиссия Будапешт, 2006.
5. Корнев А.Б., Плющаев В.И. Пути повышения эффективности использования АИС на внутренних водных путях за счет организации передачи по ее каналам дополнительной информации. Речной транспорт (XXI век), 2012. №5, с.38-42

References

1. Plyushchaev V.I., Galkin D.N., Ital'yantsev S.A. Komp'yuterizovannaya sistema upravleniya passazhirskim kolesnym teplokhodom. Rechnoy transport (XXI vek). 2014. № 6(71), s. 35-37.
2. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Upravlenie sudnom s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom pri vypolnenii shvartovykh operatsiy. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya . 2017. №4, s.21-30.
3. ITU1371. – Recommendation ITU-R M.1371-3, International Telecommunication Union. June 2006.
4. Standart dlya sistem obnaruzheniya i otslezhivaniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh. Dunayskaya komissiya Budapesht, 2006.
5. Kornev A.B., Plyushchaev V.I. Puti povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya AIS na vnutrennikh vodnykh putyakh za schet organizatsii peredachi po ee kanalam dopolnitel'noy informatsii. Rechnoy transport (XXI vek), 2012. №5, s.38-42

УДК 656.615.071.4:681.3

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ШВАРТОВНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА НА МОРСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЕРМИНАЛА

Сергей Иванович Биденко
доктор технических наук, профессор,
проректор по материально-техническому развитию
Тверской государственный университет
170100, Тверская область, г. Тверь, ул. Желябова, д.33
e-mail: sibidenko@mail.ru
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
Виктор Викторович Устинов
кандидат технических наук,
доцент кафедры системный анализ и управления процессами на водном транспорте
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: ustinovnvrsk@mail.ru
Евгений Владимирович Хекерт
доктор технических наук, профессор, проректор
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова
353918, Новороссийск, 93, пр. Ленина
e-mail: zheny71@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты авторов по исследованию технологии, организации и управления вспомогательными эксплуатационными процессами перегрузки в портах на морской составляющей, в частности организация и выполнение лоцманского и буксирного обеспечения транспортным судам, прибывшим в порт под грузообработку.

Областью исследования являются организация системы управления транспортным процессом в морском порту, транспортная логистика на водном транспорте, технологические процессы работы порта, как единого перегрузочного комплекса в рамках «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 12 августа 2010г. № 620 (далее по тексту Технологический регламент), включая вспомогательные процессы швартовных операций (работа лоцманов, буксиров, швартовщиков), в целях:

- обеспечения безопасности объектов инфраструктуры морского порта;
- неразрывности технологического процесса ПРР на морской составляющей;
- влияния конкуренции на эффективность и безопасность эксплуатации объектов инфраструктуры морского порта.
- выявить «узкие места» на морской составляющей влияющие на пропускную способность причала, терминала и порта в целом.

Ключевые слова: математическая модель процесса швартовных операций, сохранность гидротехнических сооружений порта, определение потребности в тяговом усилии, угловая скорость и скорость сближения судна с причалом.

MONITORING AND MANAGEMENT SYSTEM OF MOORING OPERATIONS WITHIN ENGINEERING OPERATION PROCEDURE OF A TRANSSHIPMENT TERMINAL AT AN OFF-SHORE PART OF THE TERMINAL

Sergey I. Bidenko
Dr.Sci.Tech, professor
Vice Principal for Material and Technical Development
Tver State University
170100, Tver region, Tver, st. Zhelyabova, 33
e-mail: sibidenko@mail.ru

Gennady A. Zelenkov
Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor,
Professor of the Department of System Analysis and Process Management on Water Transport
State Marine University named after admiral F.F. Ushakov
353918, Novorossiysk, pr. Lenin, 93
e-mail: mathshell@mail.ru
Viktor V.Ustinov
PhD in Engineering Science,
Associate Professor of the Department of System Analysis and Process Management on Water Transport, Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov
353918, Novorossiysk, pr. Lenin, 93
e-mail: ustinovnvrsk@mail.ru
Evgeniy V. Khekert
Dr.Sci.Tech, Professor, Vice-Principal of University
State Marine University named after admiral F.F. Ushakov
353918, Novorossiysk, 93, pr. Lenin
e-mail: zheny71@mail.ru

Abstract

The article presents the results of the authors on the study of technology, organization and management of auxiliary operational processes of transshipment in ports on the marine component, in particular the organization and implementation of pilot and towing support for transport vessels arriving at the port for cargo handling.

The area of research is the organization of the transport process management system in the seaport, transport logistics in water transport, technological processes of the ports as a single transshipment complex in the framework of the" Technical regulations on the safety of Maritime transport facilities", approved by the government Of the Russian Federation on August 12, 2010. No. 620 (hereinafter referred to as the Technological regulations), including auxiliary processes of mooring operations (work of pilots, tugs, mooring), in order to:

- ensuring the security of seaport infrastructure facilities;
- continuity of the process of PRR on the marine component;
- the impact of competition on the efficiency and safety of the operation of the seaport infrastructure.
- identify bottlenecks in the Maritime component affecting the capacity of the berth, terminal and port as a whole.

Key words: mathematical model of the process of mooring operations, the safety of hydraulic structures of the port, determining the need for traction force, angular velocity, and the rate of convergence of the ship with the dock.

Введение

Исследования вопросов пропускной способности морских российских портов и, в частности, портов Новороссийск и Приморск [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] показывают, что значительное эксплуатационное время причалов теряется на морской составляющей из-за разорванности и несогласованности в выполнении технологического процесса погрузо-разгрузочных работ (ПРР) различными структурами портовой деятельности (буксирными и лоцманскими компаниями) не подконтрольными менеджменту перегрузочного комплекса, увеличивается технологический простой причалов во время швартовных операций.

Это негативно отражается на пропускной способности причалов и порта в целом, а также на вопросах плана охраны безопасности ГТС, а также на навигационной безопасности в морских портах. Статистика аварийных случаев и аварий, в портах Приморск и Новороссийск показывает, что имеются аварийные случаи от навалов танкеров на причалы с последующим повреждением швартовных палов и выводом причалов из эксплуатации. Так в порту Новороссийск, в 2000 году, в результате ошибочных действий капитана танкера т/х «Эко Европа» в технологии расстановки буксиров произошёл навал танкера на причал № 1 НГ Шесхарис с повреждением швартовного пала.

В настоящее время:

- в операционную акваторию причалов, находящихся в собственности Российской Федерации, могут быть допущены любые буксирные суда, назначенные судовыми агентами исходя из коммерческих интересов для оказания услуг судам, следующим к причалам стивидорных компаний под ПРР;
- капитан транспортного судна и лоцман в процессе подвода буксирами судна к причалу, не получают прогноз скорости сближения с причалом на момент касания борта судна причальных палов, и принимают решения управляя тяговым усилием портовых буксиров исходя из фактической скорости;
- капитан судна и лоцман не владеют в реальном времени точной информацией о скоростных режимах угловых скоростей носовой и кормовой оконечностей судна и вследствие этого велика вероятность касания причального пала только носовой или кормой оконечностью судна, так как придание ускорения или гашения ускорения оконечностей судна происходит без математического анализа и имитации на упреждение, а по факту исходя из визуального наблюдения за скоростным режимом;
- система контроля мониторинга и управления за швартовными операциями в портах РФ отсутствует. В этой связи вероятность навалов транспортных судов на отбойные палы причалов с превышением скоростных режимов очень велика, что

влечёт за собой повреждения различного рода с выводом из эксплуатации причала на ремонт.

Совершенствование технологии, организации и управления швартовной операцией в подготовительном процессе ПРР, управление режимом угловой скоростью оконечностей судна в целях удержания ДП корпуса судна параллельно к причальной линии в целях безопасного касания причальных палов наружной обшивкой судна и является научным фундаментом в системе мониторинга и контроля за швартовными операциями в морских портах.

1. Состояние проблемы мониторинга и управления швартовными операциями

Сначала рассмотрим, как понимается швартовка судна в морском порту к причальному сооружению (см.п.1 - 2), итак:

1. Швартовка, это совокупность действий по подходу и креплению судна к причалу, пирсу или др. судну. Для подтягивания и удержания судна у причала используются механизмы судового швартовного устройства: шпили, брашпили, кнехты, каповые планки, клюзы и т. п. Многие суда оборудуются автоматическими швартовными лебёдками, которые удерживают судно у причала с постоянным, заранее заданным тяговым усилием. Швартовка состоит из следующих манёвров: подход к причалу с разворотом в требуемом направлении; подвод его в определённое положение по отношению к причалу (иногда буксирами) и удержание в этом положении на время подачи швартовов; подтягивание судна к причалу. Во избежание навала на причал допускается скорость подхода к причалу для судов водоизмещением порядка 10 тыс. т не более 0.13 м/с, а для судов 100 тыс. т не более 0,08 м/с. При этих скоростях подхода к причалу деформация отбойных приспособлений и самого причального сооружения остаётся в пределах допустимых значений [12]. В технических паспортах каждого причала указываются нагрузочные характеристики, воспринимаемые отбойными палами/устройствами от расчётного судна при его касании с этими отбойными устройствами.

2. Швартовка — процесс подхода судна и его крепление к причальной стенке, пирсу или другому судну. Необходимые манёвры: выбор направления и скорости движения судна для предотвращения навала; подход судна к причалу с разворотом в выбранном направлении; подвод в выбранное положение по отношению к причалу (может использоваться буксир); удержание на месте на время подачи швартовов; подтягивание к причалу (для небольших судов — с помощью тягловой силы, в т. ч. ручной и механической; для крупных — с помощью двигателей самого судна).

Общими правилами плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним [12] установлена прямая обязанность взаимодействия владельца терминала с капитаном швартующегося судна. Из пункта 98 Общих правил плавания следует, что «Перед швартовкой наливных судов к причальным устройствам, предназначенным для погрузки и выгрузки нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа, включая выносные причальные устройства, оператор морского терминала должен согласовать с капитаном судна план проведения швартовых операций».

Таким образом, швартовные операции с судами, прибывшими в порт под погрузку/выгрузку, функционально относятся к процессу ПРР, так как в течение своего времени проведения швартовных операций, включая вспомогательные элементы - лоцманскую проводку, буксирное обеспечение (сопровождение, кантовка судна и подвод к причалу) и услуги швартовщиков, постановка/снятие боновых заграждений, причал находится в режиме технологического простоя.

Из всех субъектов портовой деятельности, принимающих участие в ПРР у причалов терминала, только стивидорная компания (далее Терминал) имеет прямую заинтересованность в сокращении технологических простев причалов. Кроме этого, каждое судно осуществляет заход в порт с определённой целью, которая является основной. В данном случае судозаходы осуществляются с целью выполнения перегрузки грузов, следовательно, все остальные работы/услуги выполнение/оказание которых направлено для осуществления основной цели судозахода, являются вспомогательными и должны быть управляемы оператором терминала и выполняться в минимально короткое время без ущерба безопасности основным и вспомогательным процессам перегрузки. В настоящее время, в портах где Терминал не имеет собственных буксиров и лоцманов процесс швартовных операций не управляем Терминалом, так как:

1) Лоцманскую проводку осуществляют сторонние хозяйствующие структуры, не имеющие договорных отношений с Терминалом на участие в швартовных операциях, но на основании нормативных публичных документов наделены полномочиями и обязанностями, реализация которых затрагивает интересы владельца терминала по вопросам охраны портового средства и технического регламента о безопасности ГТС;

2) В портах, в которых лоцманскую проводку осуществляют не лоцманские службы Терминалов, а самостоятельные юридические лица, представитель Терминала соответственно не находится на швартующемся судне до начала швартовой операции и до представления судна государственной комиссии, так как по подниматься на борт могут только лоцманы и члены госкомиссии. В связи с этим Терминал лишён возможности:

2.1. Перед швартовкой согласовать с капитаном судна план проведения швартовых операций (п. 98 Общих правил плавания в портах РФ и на подходах к ним) и соответственно известить капитана об особенностях швартовки судна, в ом числе и о допустимой скорости сближения судна с причалом;

2.2. В целях выполнения процедур плана охраны портового средства и технического регламента о безопасности ГТС, контролировать на ходовом мостике судна процесс выполнения субъектами порта швартовных операций начиная с момента начала движения судна к причалу от ТВЛ и от причала до ТВЛ или до места якорной стоянки, в том числе контроль взаимодействия лоцмана и капитана судна в части:

– выдачи лоцманом рекомендаций капитану обслуживаемого судна по работе с буксирами при осуществлении всех видов буксировочных и

швартовных операций, применяемых в районе лоцманской проводки судов;

– обмена информацией между лоцманом и капитаном судна включающей: информацию о швартовке, использовании и числе, и характеристиках буксиров, швартовых катеров, прочих внешних услугах; информацию о швартовых концах; подтверждение используемого языка для общения на мостике и с внешними участниками лоцманской проводки судна.

Вместе с перечисленными выше организационными вопросами выполнения процедур охраны портового средства и технического регламента о безопасности ГТС, функционал лоцмана, а для Терминалов у которых нет лоцманской службы, функционал представителя Терминала в качестве мастера по швартовным и грузовым операциям, заключается в согласовании с капитаном судна условий подхода судна к операционной акватории причала, управления буксирами при подводе судна к причалу в пределах безопасных скоростей сближения с причалом.

2. Модель швартовных операций

Для того, чтобы обеспечить выполнение требований, установленных техническим регламентом о безопасности объектов морского транспорта, утверждённого постановлением Правительства № 620 (далее Технический регламент) и взять под контроль все процессы швартовных операций вне зависимости от того имеется у терминала лоцманская служба или нет. Так пунктом 198 Технического регламента установлено, что «Объекты инфраструктуры морского транспорта, на которых осуществляется перегрузка опасных грузов, в том числе нефтепродуктов, должны быть оснащены техническими средствами мониторинга и документирования швартовных и грузовых операций». Данное требование реализуется с внедрением математической модели процесса швартовных операций, влияющих на безопасность, на сохранность гидротехнических сооружений порта с определением потребности в тяговом усилии в зависимости от характеристик швартующегося судна и при различной скорости ветра (далее Модель швартовных операций). Использование Модели швартовных операций и технических средств мониторинга и документирования швартовных операций, в совокупности позволит в реальном времени (п.1-5):

1. Определять риск и вероятность безопасности швартовной операции при маневрировании судов в операционной акватории причала.
2. Фиксировать наличие хорошей морской практики у судоводителей портовых буксиров, определять степень риска в аварийных ситуациях;
3. Применительно к конкретной ситуации выдавать рекомендации по выбору тягового усилия буксиров для приведения скоростного режима сближения судна с причалом в соответствие с установленными требованиями.
4. Осуществлять мониторинг скорости сближения судна с причалом, включая мониторинг и управление угловой скоростью оконечностей судна;
5. В случаях превышения установленных скоростных режимов сближения, выдавать предупреждение о наличии опасной скорости сближения.

В целях формализации рассмотрим указанные выше основные составляющие Модели швартовных операций, включая: человеческий фактор; риск и вероятность безопасности швартовной операции; наличие хорошей морской практики судоводителей буксиров; выбор буксиров по количеству и тяговому усилию; управление угловой скоростью при сближении судна с причалом и выдачу соответствующих голосовых рекомендаций капитану транспортного судна, так:

«Вероятность безопасности — это вероятность того, что неблагоприятное событие не наступит» [19]. Следовательно, вероятность безопасности швартовной операции находится в прямой зависимости от безопасности маневрирования транспортных судов в операционной акватории причала, которая обеспечивается следующими основными факторами (п.1 – п.4):

1. Человеческий фактор – опасение членами экипажей Буксиров причинить вред своему здоровью, жизни при осуществлении производственной деятельности в реальных условиях повышенного риска. Коэффициент человеческого фактора для Судоводителей Буксиров может составлять от 0 до 1 ($K_{чф} \leq 1$).
2. Хорошая морская практика - способность поддерживать высокую степень готовности экипажа и Буксира к моментальному действию, способность обеспечивать надёжность технических систем, уверенность в своих действиях по управлению Буксиром и исключительно быстрая перестройка психической деятельности на фоне возникшего эмоционального напряжения, устойчивая эмоционально-волевая сфера, ответственность и высокая активизация мышления в экстремальной ситуации. Коэффициент хорошей морской практики для Судоводителей Буксиров может составлять от 0 до 1 ($K_{мп} \leq 1$).
3. Уровень оснащённости порта по составу и количеству современными техническими средствами, предназначенными для буксирного обеспечения, проводки судов и документирования швартовных операций.
4. Исполнительская дисциплина субъектов порта (служба капитана порта, капитаны транспортных судов, судовые агенты, стивидорные и экспедиторские компании, лоцманы) по выполнению Обязательных постановлений по порту.

2.1 Риск и вероятность безопасности швартовной операции

«Период безопасности — это количественная характеристика временного интервала между двумя неблагоприятными событиями» [19]. Под периодом безопасности понимается время начала и окончания работы буксиров с транспортными судами во время швартовных операций. Интервалом между двумя неблагоприятными событиями в морском порту на основании третьего абзаца пункта 4 статьи 284 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации можно охарактеризовать время, в течение которого «Судно не подвергается общей опасности вместе с другим судном или другими судами, если в результате

простого отсоединения от другого судна или других судов оно находится в безопасности. В случае если отсоединение представляет собой акт общей аварии, общее морское предприятие продолжается» [13], т.е. пока транспортное судно маневрирует в операционной акватории причала с помощью буксиров, присоединённых к нему буксирными канатами, оно находится в безопасности. Деятельность буксиров в морском порту на основании первого абзаца пункта 4 статьи 284 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации можно отнести к общему морскому предприятию, так как «Общее морское предприятие имеет также место в случае, если одно или несколько судов буксируют, либо толкают другое судно или другие суда при условии, если они все участвуют в коммерческой деятельности, но не в спасательной операции» [13].

Данное определение периода безопасности приемлемо для пожарной, экологической безопасности и безопасности причалов, так как необеспечение безопасности швартовных операций, приводит к неблагоприятным событиям, могущим повлечь повреждения конструкций причалов, пожары, аварийные разливы нефти и продуктов её переработки.

По определению [19] «Риск — это величина, которая вычисляется как произведение стоимости потерь от неблагоприятного события на вероятность возникновения этого события». Рассмотрим условия плавания транспортных судов в портовых водах, так как в стеснённых условиях суда наиболее часто подвергаются риску и имеют наибольшую частоту неблагоприятных событий.

Приняв вероятность возникновения неблагоприятного события как разницу между единицей и коэффициентом вероятности безопасности швартовной операции, можно предположить, что риск будет близок нулю только в том случае, если коэффициент безопасности швартовной операции (p) будет близок к единице, таким образом, формула риска имеет вид:

$$R = cq = c(1 - p) \quad (1)$$

где c - стоимость потерь от неблагоприятного события,

q - вероятность возникновения неблагоприятного события,

p - коэффициент вероятности безопасности швартовной операции.

Такое предположение допустимо при обязательных следующих условиях (п.1-п.5):

1. Принятие командным и рядовым составом Буксиров алогичного решения пойти на риск причинения вреда своему здоровью, жизни, на риск получения повреждений конструкций Буксиров, выражающегося в отключении устройства автоматической отдачи буксирного каната, предотвращающего Буксир от опрокидывания при выполнении портовой буксировки, кантовочных работ, особенно в штормовых, экстремальных условиях и пойти на выполнение Швартовной операции;

2. При выполнении швартовной операции в штормовых, экстремальных условиях с отключённым устройством автоматической отдачи буксирного каната судоводитель буксира, владеющий хорошей морской практикой, обеспечивает и контролирует безопасное положение Буксира по отношению к направлению движения буксируемого судна, направлению ветра и волнению моря, контролирует действия рядового состава на открытой палубе при приёме и отдачи буксирного каната, выполнении других работ, востребованных в таких ситуациях;

3. Поданные команды капитаном буксируемого судна судоводителям буксиров, соответствуют окружающей обстановке и направлены на продолжение периода безопасности (времени не наступления неблагоприятного события);

4. Безотказность работы судовых технических средств и конструкций буксиров;

5. Исключительной исполнительской дисциплины по выполнению портовых правил всеми субъектами порта, капитанами транспортных судов, агентскими, стивидорными, экспедиторскими компаниями и их диспетчерскими службами.

Из перечисленных условий вероятности безопасности швартовных операций ключевым является первое, так как, если экипажи буксиров не примут алогичного решения выполнять буксировочные работы с явным риском для своего здоровья, жизни, то остальные условия могут не рассматриваться в виду их ничтожности. Так, в результате реализации экипажами буксиров законного права не принимать алогичного решения (не рисковать своим здоровьем, жизнью, целостностью конструкций судов и ГТС), получим эффективность, равную нулю, и формула риска примет вид:

$$R = cq = c(1 - 0) \quad (2)$$

что в свою очередь влечёт максимальный риск, выражающийся в миллиардах рублей, что соизмеримо с суммой стоимости спасательных операций, стоимости судна, груза, стоимости капитального ремонта ГТС.

Только при выполнении первого условия коэффициент вероятности безопасности швартовной операции не будет равен нулю, так как начинает работать второе условие - хорошая морская практика судоводителей буксиров, увеличивающая вероятность безопасности швартовной операции процесса ПРР до величины близкой к единице, и уменьшая величину риска. Следовательно, величина риска в получении повреждений судами и ГТС порта, в первую очередь, зависит от следующих факторов:

- от человеческого фактора судоводителей и рядового состава буксиров;
- от хорошей морской практики судоводителей и рядового состава буксиров;
- от оперативности действий субъектов порта, являющихся участниками портовой деятельности;
- от своевременного выполнения капитанами транспортных судов требований правил плавания и стоянки в порту по переходу судов от места погрузки/выгрузки в зону убежища;
- от расположения причалов, ширины подходного канала, силы ветра и высоты волнения, температуры воздуха.

Для реализации математической Модели швартовной операции необходима формализация человеческого фактора.

Как было определено выше, преодоление экипажами буксиров человеческого фактора является основополагающим и находится в прямой

зависимости с вероятностью безопасности швартовных операций в порту. Службе капитана порта, применяя административно-властные полномочия, такие данные необходимы в выборе компании, плавсредства в случае их привлечения к аварийно-спасательным работам. Для этого необходимо знать степень готовности и способности конкретных судоводителей буксиров, принять алогичное решение для осуществления производственной деятельности в реальных условиях повышенного риска причинения вреда своему здоровью, жизни, риска повреждения буксиров. Выявление такой степени готовности обеспечивается диспетчерской службой путём фиксации предложенных и принятых к исполнению работ. Так, например, в декабре судоводителю буксира было предложено выполнить буксировочные работы по буксирному обеспечению в определённом количестве швартовных операций (*m*), из них часть работ в метеоусловиях, превышающих рекомендованные параметры портовыми властями. По факту были приняты к исполнению все швартовные операции (*n*). Следовательно, коэффициент человеческого фактора ($K_{чф}$) данного судоводителя будет равен единице:

$$K_{\text{чф}} = \frac{m}{n} = 1{,}0 \qquad (3)$$

Если отказов нет, то показатель коэффициента человеческого фактора ($K_{чф}$) = 1, что свидетельствует об исключительной готовности и способности экипажа принимать алогичное решение идти на выполнение буксирного обеспечения швартовной операции процесса ПРР с риском причинения вреда своему здоровью, жизни. Следует различать разницу между принятием судоводителем Буксира производственного задания к выполнению, следованием к месту оказания услуг и началом выполнения швартовной операции, её безопасности, так как:

- приём к выполнению такого задания к выполнению и следование к месту оказания услуг говорит о том, что судоводителем буксира принято алогичное решение готовности к работе в условиях повышенного риска;

- начало выполнения швартовной операции процесса ПРР и её безопасность – это следующий этап, который находится в прямой зависимости от уровня (коэффициента) хорошей морской практики судоводителей буксиров.

Формализация хорошей морской практики. Коэффициент хорошей морской практики — это качественный показатель, необходимый для выявления у судоводителей профессиональных навыков и способностей в управлении Буксирами и обеспечения безопасности швартовной операции процесса ПРР, уменьшения риска повреждений судов, ГТС и увеличения эффективности процессов ПРР и пропускной способности порта.

Представим, что в декабре судоводителем буксира были выполнены все Швартовные операции ($n_в$) без каких-либо повреждений конструкций своего и транспортного судна, без травматизма членов экипажей буксира. Следовательно, его коэффициент хорошей морской практики ($K_{мп}$) в декабре будет равен единице:

$$K_{\text{мп}} = \frac{n_{\text{бв}}}{n_{\text{в}}} = 1{,}0 \qquad (4)$$

Показатель, равный единице, будет свидетельствовать о том, что риск повреждений за отчётный период был близок к нулю. Служба капитана порта может применять такую формализацию хорошей морской практики к каждому судоводителю, к конкретному буксиру, группе буксиров. Следовательно, коэффициент хорошей морской практики, его определение и учёт по каждому судоводителю буксира необходим как для менеджмента буксирного подразделения Терминала, так и для службы капитана порта в вопросах оказания помощи судам в портах.

2.2 Факторы безопасности швартовной операции

Таким образом представляются следующие показатели факторов безопасности швартовных операций (п.1-п.4):

1. Человеческий фактор – опасение причинить вред своему здоровью, жизни при осуществлении производственной деятельности в реальных условиях повышенного риска;

1.1. Способы преодоления негативного и приобретение позитивного факторов - преодолевается экипажами буксиров благодаря хорошей морской практики в управлении буксирами, умению сопротивляться различным внешним и внутренним стрессовым факторам;

1.2. Показатель человеческого фактора - коэффициент $K_{чф}$ от 0 до 1 - отношение количества услуг, работ принятых и начатых к выполнению (*m*) на количество услуг, работ, предложенных к выполнению (*n*):

$$K_{\text{чф}} \leq 1{,}0 \qquad \text{(см. формулу (3))}$$

2. Хорошая морская практика - способность поддерживать высокую степень готовности экипажа и судна к моментальному действию, способность обеспечивать надёжность технических систем, уверенность в своих действиях по управлению судном и исключительно быстрая перестройка психической деятельности на фоне возникшего эмоционального напряжения, устойчивая эмоционально-волевая сфера, ответственность и высокая активизация мышления в экстремальной ситуации;

2.1. Способы преодоления негативного и приобретение позитивного факторов - приобретается в процессе профессиональной деятельности и передачей ветеранами накопленного опыта;

2.2. Показатель хорошей морской практики - коэффициент $K_{мп}$ от 0 до 1 – соотношение количества эффективно выполненных услуг, работ ($n_{бв}$), к общему количеству выполненных услуг, работ ($n_в$).

$$K_{\text{мп}} \leq 1{,}0 \qquad \text{(см. формулу (4))}$$

3. Диспетчеризация процесса ПРР - своевременная передача службой капитана порта и приём диспетчерскими службами участников портовой деятельности штормового предупреждения и требования отойти судам в зону убежища из мест подверженных штормовым явлениям;

3.1. Достигается административными требованиями капитана порта к компаниям – хозяйствующим субъектам портовой деятельности;

3.2. Временной показатель, измеряется в минутах, не должен превышать 15 минут, в том числе время на подтверждение получения предупреждения о наступлении неблагоприятного события для судна.

4. Оснащённость аварийным и швартовным

снабжением - наличие на транспортных судах годных к эксплуатации швартовных канатов, разрывным усилием достаточным для буксировки конкретного судна, в том числе с учётом «минимального разрывного усилия швартовных линий, определяемого в соответствии с рекомендацией МАКО № 10, для судов с характеристикой снабжения EN> 2000»;

4.1. Достигается установлением требований в портовых правилах и применением штрафных санкций за неисполнение.

4.2. Акт осмотра судна ИГНП без замечаний присваивается значение 1;

4.3. Акт осмотра судна ИГНП с замечанием присваивается значение 0;

Невыполнение по каким-либо причинам показателей факторов под номерами 3, 4 приводит к увеличению периода безопасности, т.е. к увеличению времени буксирного обеспечения швартовной операции процесса ПРР и к снижению вероятности безопасности данной швартовной операции вследствие ухудшения метеоусловий.

На базе исследований вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, «Универсальные оценки безопасности» [19] можно определить коэффициент безопасности швартовной операции, показывающий, какая доля периода безопасности швартовной операции может приходиться на единицу стоимости возможного ущерба, в случае его нанесения неблагоприятным событием. Величины таких коэффициентов показаны в таблице 1 по группам судов и определены по формуле.

$$S = t/c \qquad (5)$$

где

t – время периода безопасности, время буксирного обеспечения (час);

c – стоимость возможного ущерба (руб.)

В таблице 1 стоимость возможного ущерба (с) определена исходя из средней стоимости ремонта эксплуатационных повреждений корпусных конструкций транспортных судов и буксиров, а также повреждений капитального характера, в том числе и причалов, обычно получаемых во время маневрирования при выполнении кантовочных и швартовных работ в метеоусловиях, превышающих рекомендованные параметры.

Такими повреждениями, как правило, бывают вмятины и (или) поломки фальшбортов и леерного ограждения, крепления спасательных плотов, обрыв кранцевой защиты на судах и причалах, поломка буксирных устройств (гаков) от перегрузок в штормовых условиях, обрыв буксирных канатов, вмятины наружной обшивки корпуса судов, получаемые от плавания в ледовых условиях и в процессе постоянного контакта с другими кантуемыми судами, объектами. А также некоторые неисправности топливных и газотурбинных систем главных двигателей и вспомогательных механизмов вследствие их эксплуатации в режимах перегрузки.

Таблица 1

Коэффициенты безопасности швартовной операции по группам судов в метеоусловиях, превышающих рекомендованные значения

№ группы судов	Водоизмещение в грузу, (т)	Период безоп. шварт. операц. час (t)	Стоим. ущерба – в тыс. руб. (с)	Коэф. безоп. шварт. операц. ($S=t/cx10^5$)
1	2	3	4	5
I - III	3300	1,5	300	0,500
IV - VI	15000	2,5	450	0,556
VII	60000	3,5	600	0,583
VIII - IX	150000	5,0	1200	0,417

Учитывая интересы грузовладельцев и судовладельцев выполнить ПРР с наименьшими затратами, т.е. за одну постановку судна к причалу с минимальным временем нахождения судна в порту (а интерес стивидорной компании в увеличении пропускной способности причала, терминала, порта), становится актуальным вопрос оценки безопасности швартовных операций процесса ПРР в операционных акваториях причалов [14].

Иными словами, *с какой вероятностью безопасности и какой величиной риска* будет проведена, например, отшвартовка судна для выхода судна из порта после окончания погрузки/выгрузки или для перехода в зону убежища, если неблагоприятный прогноз станет оправдываться, и фактическая погода будет превышать рекомендованные значения по скорости ветра. Такие ситуации в портах будут иметь место всегда по объективной причине невозможности спрогнозировать точное время наступления неблагоприятных метеоусловий. Поэтому целесообразно поддерживать и использовать хорошую морскую практику судоводителей в управлении буксирами в целях поддержания эффективности циклических операций ПРР (швартовка/отшвартовка) и всего процесса ПРР с наибольшей вероятностью безопасности швартовных операций и наименьшим риском причинения ущерба судну, грузу, гидротехническим сооружениям (ГТС) и буксирам. Для этих целей предлагается алгоритм и модель оценки вероятности безопасности швартовной операции процесса ПРР (6).

Вероятность безопасности швартовной операции (*p*) определяется как разность между средним коэффициентом хорошей морской практики судоводителей, стоящих на вахте на привлечённых буксирах, и понижающим коэффициентом сложности (K_c) в зависимости от скорости ветра. Коэффициент сложности с повышением скорости ветра увеличивается на 0,02 через каждые 5 м/с начиная с 15-20 м/с – 0,02, 20-25 м/с – 0,04, 25-30 м/с – 0,06, 30-35 м/с – 0,08, 35-40 м/с – 0,1.

Таким образом, *вероятность безопасности швартовной операции имеет вид:*

$$p = \left(\sum K^i_{\text{мп}}/n\right) - K_c \quad (6)$$

где:

$\sum K^i_{\text{мп}}$ - сумма коэффициентов хорошей морской практики судоводителей, стоящих на вахте на буксирах, выбранных моделью;

n – количество судоводителей, стоящих на вахте на буксирах выбранных моделью;

K_c - коэффициент сложности.

Риск возможного ущерба, который определяется по формуле

$R = C(1 - k_{\text{безоп}})$,

где C - стоимость возможного ущерба, которая определяется по группе, к которой принадлежит судно,

$k_{\text{безоп}}$ – коэффициент безопасности, который определяется по формуле:

$k_{\text{безоп}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} k_{\text{мп},i} - k_c$,

где n – количество буксиров и соответственно количество капитанов буксиров,

$k_{\text{мп},i}$ – коэффициент морской практики, зависящий от опыта и уровня развития навыков судоводителя управляющего буксиром под номером $B_{\text{т}_i}$ (процедура выбора буксиров описана ниже),

k_c – коэффициент сложности управления буксиром в зависимости от скорости ветра и определяется по таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты сложности по категориям в зависимости от скорости ветра.

k_c	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Диапазон скоростей ветра, м/с	0-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40

2.3 Расчёт буксирного обеспечения швартовных операций.

Множество требуемых буксиров $B_{\text{т}}$ для выполнения швартовной операции при данной скорости ветра определяется по формуле

$B_{\text{т}} = \{b | b \in B_j \subset B, \sum_{i=1}^{n_j} F_{b_i} \leq F, \sum_{i=1}^{n_j} F_{b_i} \to min\}$, (7)

где

j – номер группы судов согласно классификации по группам на основе РД 31.3.01.01-93,

n_j – количество буксиров, необходимых для швартовки судов группы j,

B_j – состав буксиров, подходящих для швартовки судов группы j,

B – полный состав буксирного парка Терминала, определённого на основании РД 31.3.01.01-93.

Т.е. буксиры выбираются таким образом, чтобы суммарная тяга буксиров, подходящих для буксировки данной группы судов, превышала требуемое суммарное тяговое усилие буксиров F, но при этом была наименьшей, т.к. должно быть задействовано минимально требуемое количество буксиров с учётом технологических особенностей швартовки крупнотоннажных судов.

Расчёт требуемого суммарного тягового усилия буксиров F определяется по формуле:

$F = F_1 + F_3$ (8)

$F_1 = k_A \times p_1 \times v_1^2 \times S_1/10000$ тс (9)

v_1 - скорость ветра, м/с

p_1 - плотность воздуха, кг/м^3, зависящая от его влажности, температуры и атмосферного давления

k_A – аэродинамический коэффициент сопротивления (обтекания) буксируемого/кантуемого судна.

S_1 – площадь парусности судна из расчёта произведения наибольшей длины судна на высоту надводного борта с учётом палубного груза и надстроек.

$F_3 = 0{,}5 \times m_3 \times \frac{v_3^2}{s}/10000$ тс. (10)

m_3 – масса судна (определяется как массовое водоизмещение),

v_3 – скорость движения судна,

s – тормозной путь судна, который ему надо пройти для погашения кинетической энергии.

2.4 Расчёт требуемого тягового усилия буксиров

Судно — это тело на границе 2-х сред: воздух и вода. Отсюда требуемая тяга буксиров определяется следующим образом:

$F = F_1 + F_2 + F_3$, (11)

где,

F_1 – сила сопротивления ветру, F_2 – сила сопротивления воды, F_3 – сила, необходимая для разгона/торможения судна.

Сила сопротивления ветру приближённо определяется по формуле [15]:

$F_{1\text{н}} = k_A \times p_1 \times v_1^2 \times S_1$ (12)

где:

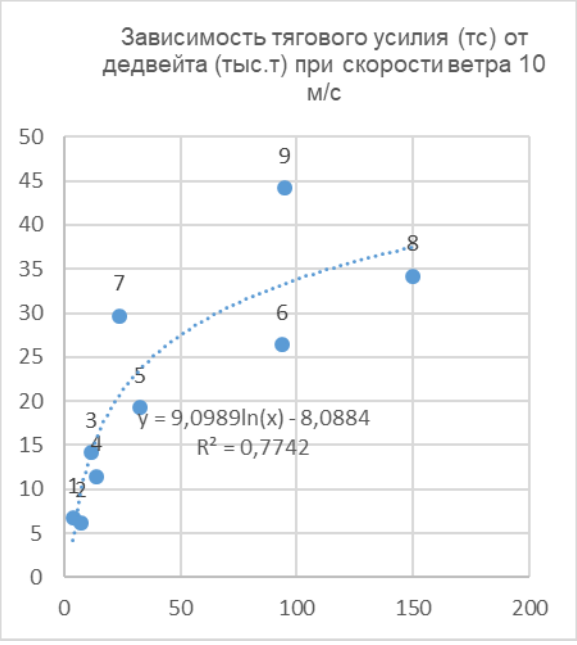


Рисунок 1

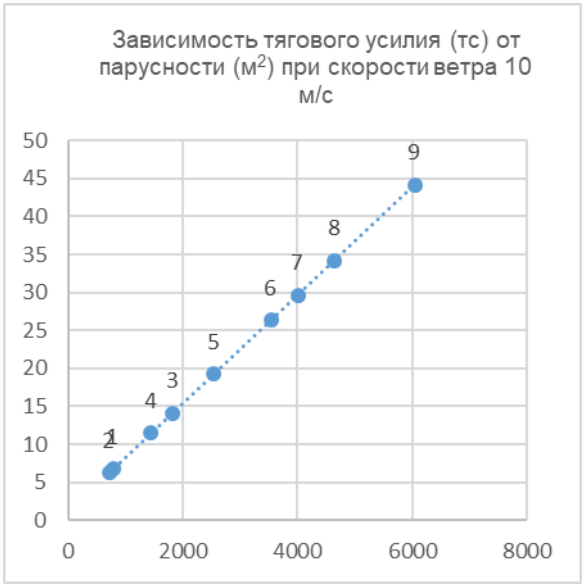


Рисунок 2

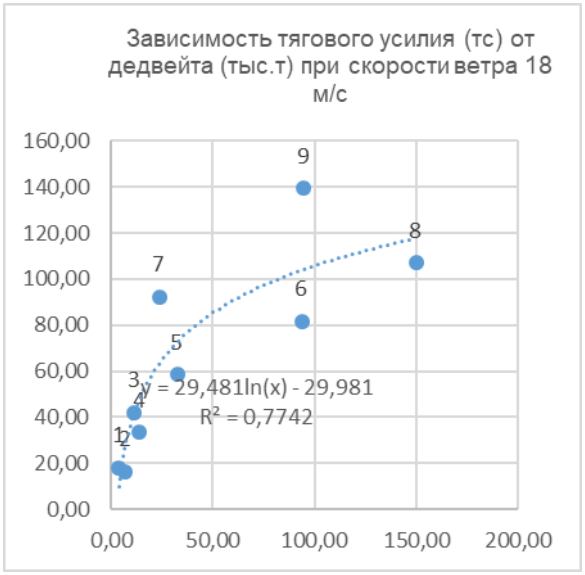


Рисунок 3

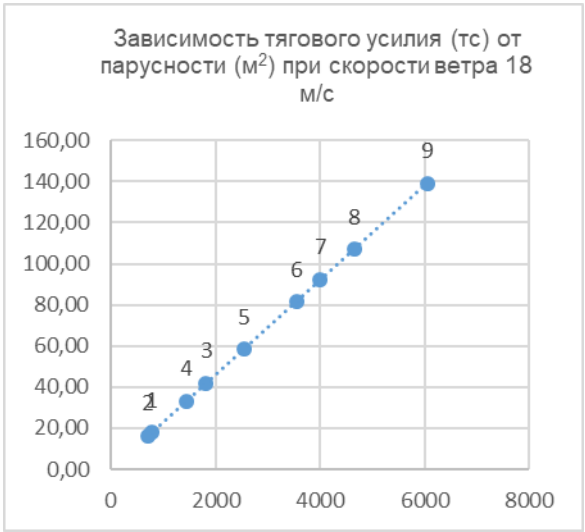


Рисунок 4

v_1 - скорость ветра, м/с

p_1 - плотность воздуха, кг/м^3, зависящая от его влажности, температуры и атмосферного давления

k_A – аэродинамический коэффициент сопротивления (обтекания) буксируемого/кантуемого судна.

S_1 – площадь парусности судна из расчёта произведения наибольшей длины судна на высоту надводного борта с учётом палубного груза и надстроек.

Для расчёта используются следующий порядок величин коэффициентов:

$p_1 = 1{,}4224$ кг/м^3 как предельный случай при температуре −25°*C*, т.к. плотность воздуха максимальная при −25 °*C* на отрезке [+40 -25] °C.

$k_A = 0{,}5$ [15].

Формула (12) даёт значения в Ньютонах, в пересчёте на тонна-силы получим формулу (13):

$$F_1 = k_A \times p_1 \times v_1^2 \times S_1/10000 \quad (13)$$

Сопротивление воды движению судов - результирующая гидродинамическая сила, действующая на корпус судна при его движении. Усилия создаваемые при данной скорости уравновешиваются силой сопротивления воды движению судна. По своей физической основе горизонтальная составляющая слагается из сопротивления трения и волнового сопротивления (которое определяется скоростью поверхностного течения).

Сила сопротивления воды приближённо определяется по формуле [16]:

$$F_{2н} = k_г \times p_2 \times v_2^2 \times S_2 \quad (14)$$

где v_2 – скорость движения судна с учётом встречного течения, м/с

p_2 - плотность воды (кг/м^3) зависящая от её температуры и солёности

$k_г$ – гидродинамический коэффициент сопротивления (обтекания) кантуемого судна.

Формула (14) даёт значения в Ньютонах, в пересчёте на тонна-силы получим формулу (15):

$$F_2 = k_г \times p_2 \times v_2^2 \times S_2/10000, \quad (15)$$

$$k_г = k_о + k_с + k_к \quad (16)$$

где:

$k_о$ – коэффициент остаточного сопротивления;

$k_с$ - коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины;

$k_к$ - корреляционная надбавка.

Согласно рекомендациям [17] $k_к$ = 0,0001.

Для расчёта используются следующий порядок величин коэффициентов:

p_2 = 1028,13 кг/м^3 как предельный случай при температуре 0 °C и солёности 35 промилле (тысячных частей, *ppt*$_w$), т.к. плотность воды максимальная при 0 °C на отрезке температур [0 ÷ +35] °C, формула (14).

$k_о \leq 1{,}7 \times 10^{-3}$ согласно расчётным данным [16]

Согласно формуле Прандля-Шлихтинга

$$k_с = 0{,}455/(lgRe)^{2{,}58} \quad (17)$$

$$Re = v_2 \times L/v_в \quad (18)$$

$v_в$ – коэффициент кинематической вязкости, который приближённо равен:

$v_в = 1{,}57 \times 10^{-6}$– по справочным данным [16]

Расчёт площади смоченной поверхности S_2 по формуле Семеки для коэффициента полноты водоизмещения $\delta = 0{,}8$:

$$S_2 = L \times T \times (1{,}36 + 1{,}13 \times \delta \times B/T) \quad (19)$$

L – длина судна,

B – ширина,

T – осадка.

При разрешённой скорости сближения крупнотоннажного судна с причалом (0,08 м/с) величина сопротивления воды F_2 меньше среднего значения величины силы ветра F_1, более чем на 3 порядка. В сравнении скоростного режима, превышающего разрешённый 0,08 м/с, например при скорости судна 1 м/с, величина сопротивления воды F_2 составит 8,0469 тс, что также значительно меньше силы ветра F_1. Поэтому F_2 в расчётах не учитывается в силу малой значимости.

F_3 – сила, необходимая для кантовочных манёвров в операционной акватории причала, разгона/торможения судна определяется в (тс) по формуле (21)

$$F_{3н} = \frac{E_к}{s} = 0{,}5 \times m_3 \times v_3^2/s. \quad (20)$$

$$F_3 = \frac{E_к}{s} = 0{,}5 \times m_3 \times \frac{v_3^2}{s}/10000 \text{ тс}. \quad (21)$$

где $E_к$ – кинетическая энергия судна, которую надо погасить при прохождении тормозного пути s,

m_3 – масса судна (определяется как массовое водоизмещение).

v_3 – скорость движения судна.

Оценим величину требуемой силы, необходимой для гашения кинетической энергии судна при скорости ветра 10 м/с.

Для танкера группы VIII с дедвейтом 149999 тонн, водоизмещение оценивается в пределах 182010 тонн (182010000 кг) по аналогии с танкером т/х «Кубань» по РД 31.03.01-90, при нормативной скорости 0,08 м/с и величине тормозного пути 50м до причала суммарная буксирная тяга определяется по формуле (22):

$F_3 = 0{,}5 \times 182010000 \times 0{,}08^2/50/10000 = 1{,}1649$ тс при отсутствии ветра.

При ветре 10 м/с получим следующую тягу буксиров:

$$F = F_3 + F_1 \quad (22)$$

$\mathrm{F} = 1{,}1649 + 33 = 34{,}1649$ тс

Аналогично Модель швартовных операций рассчитывает требуемую тягу при различных скоростях ветра.

Для выполнения кантовочных работ с судами VII – IX групп и гашения инерционных сил на безопасной дистанции от причала необходимо наличие минимум четырёх буксиров с тяговым усилием каждого не менее 38,5 тс и мощностью около 2700 кВт [18]. При этом каждый из четырёх буксиров будет иметь запас мощности около 30% на случай внештатных ситуации.

При скорости судна 0,2 м/с

$F_3 = 0{,}5 \times 182010000 \times 0{,}2^2/50/10000 = 36{,}4$ тс

$\mathrm{F} = 36{,}4 + 107 = 143{,}4$ тс

При такой скорости судна 4 буксира будут иметь запас мощности около 6%, следовательно, чем меньше резерв мощности (тяги), тем выше вероятность ситуаций при которой они не смогут погасить скорость судна даже когда двигательная установка каждого буксира будет работать на полную мощность.

Заключение

Ключевым моментом в управлении швартовной операцией является управление угловой скоростью носовой и кормовой оконечностей судна, так как этим обеспечивается параллельное положение судна к причалу и допустимая скорость сближения судна с причалом. Модель швартовных операций в совокупности с системой мониторинга положения судна относительно причала определяет угловую скорость носовой и кормой оконечностей судна в режиме реального времени и учитывая ускорение на упреждение выдаёт голосовые рекомендации по тяговому усилию буксиров исходя из того какое усилие надо приложить буксиру на удерживание оконечности судна от причала и/или на прижим к причалу. В любом случае основными скоростными параметрами, контролируемыми Моделью швартовных операций, являются угловая скорость, скорость сближения и дистанция 0,5 – 1,0 метр от отбойных устройств при которой судно должно остановиться и вывести ДП (диаметральную плоскость) судна в параллельное положение к причалу и после этого с приложением самой малой нагрузки буксиров коснуться отбойных устройств..

Литература

1. Устинов В.В., Зеленков Г.А. Системный анализ технологических процессов погрузо-разгрузочных работ в порту на примере эксплуатации нефтеналивного причала // Транспортное дело России. 2012. № 3. С.58-62.
2. Устинов В.В., Попов В.В. Формирование портового рынка вспомогательных услуг во вновь образовываемых портах на примере порта Тамань (в сравнении с портами Новороссийск и Одесса) // Транспортное дело России. 2012. № 3. С.40-47.
3. Устинов В.В., Попов В.В. Имитационная модель техносферы порта // Транспортное дело России. 2012. № 3. С.75-82.
4. Устинов В.В. Совершенствование мер, обеспечивающих навигационную безопасность в морских портах // Транспортное дело России. 2011. № 6. С.171-175.
5. Устинов В.В. Моделирование технологии, организации и управления процессами в портах // Транспортное дело России. 2010. № 11. С.108-109.
6. Устинов В.В. Взаимодействие морских портов со смежными видами транспорта // Транспортное дело России. 2010. № 11. С.122-124.
7. Королев В.И., Устинов В.В. Реинжиниринг бизнес-процессов в морских и речных портах // Транспортное дело России. 2010. № 9. С.206-207.
8. Устинов В.В., Кондратьев С.И. Обеспечение безопасности плавания транспортных судов в порту при маневрировании в операционной акватории причала // Транспортное дело России. 2012. № 6. С. 196-197.
9. Устинов В.В. Модели оптимизации использования буксирного парка порта и вероятности безопасности швартовной операции // Транспортное дело России. 2012. № 5. С. 215-220.
10. Устинов В.В. Совершенствование организации и управления технологическими перегрузочными процессами морского порта : дис. … к-та тех. наук. ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова».

Новороссийск, 2013. 139 С.
11. Морской энциклопедический справочник : электрон. справ. Режим доступа к справ. URL : https://www.sea_enc_reference.academic.ru (дата обращения: 15.09.2018)
12. Общие правила плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним
13. ФЗ РФ «Кодекс торгового мореплавания»
14. Устинов В.В. Модели оптимизации использования буксирного парка порта и вероятности безопасности швартовной операции // Транспортное дело России. 2012. № 5. С. 215-220.
15. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения // Издательство литературы по строительству, 1972
16. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна Изд. Речной транспорт. Ленинград 1961
17. Справочник по теории корабля: В трёх томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители // Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
18. Руководство по обработке судов на терминалах ПАО «НМТП» // локальный акт. 2018.

Материалы конференций:

19. Дивеев А.И., Северцев Н.А. (вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН), «Универсальные оценки безопасности»: «Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта», // Мат. Конф./Четвертая региональная научно-техн. Конф. – Новороссийск: РИО ФГОУ ВПО «МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 2005.

Монографии:

20. Устинов В.В., Эглит Я.Я., Эглите К.Я.; под ред. Я.Я. Эглита. Методика управления перегрузочными процессами морского торгового порта. Монография // СПб.: «Феникс», 2014. -138с.

References

1. Ustinov V.V., Zelenkov G.A. (2012). Sistemnyj analiz tehnologicheskih processov pogruzo-razgruzochnyh rabot v portu na primere jekspluatacii neftenalivnogo prichala. Transportnoe delo Rossii, 3, 58-62.
2. Ustinov V.V., Popov V.V. (2012). Formirovanie portovogo rynka vspomogatel'nyh uslug vo vnov' obrazovyvaemyh portah na primere porta Taman' (v sravnenii s portami Novorossijsk i Odessa). Transportnoe delo Rossii, 3, 40-47.
3. Ustinov V.V., Popov V.V. (2012). Imitacionnaja model' tehnosfery porta. Transportnoe delo Rossii, 3, 75-82.
4. Ustinov V.V. (2011). Sovershenstvovanie mer, obespechivajushhih navigacionnuju bezopasnost' v morskih portah. Transportnoe delo Rossii, 6, 171-175.
5. Ustinov V.V. (2010). Modelirovanie tehnologii, organizacii i upravlenija processami v portah. Transportnoe delo Rossii, 11, 108-109.
6. Ustinov V.V. (2010). Vzaimodejstvie morskih portov so smezhnymi vidami transporta. Transportnoe delo Rossii, 11, 122-124.
7. Korolev V.I., Ustinov V.V. (2010). Reinzhiniring biznes-processov v morskih i rechnyh portah. Transportnoe delo Rossii, 9, 206-207.
8. Ustinov V.V., Kondrat'ev S.I. (2012). Obespechenie bezopasnosti plavanija transportnyh sudov v portu pri manevrirovanii v operacionnoj akvatorii prichala. Transportnoe delo Rossii, 6, 196-197.
9. Ustinov V.V. (2012). Modeli optimizacii ispol'zovanija buksirnogo parka porta i verojatnosti bezopasnosti shvartovnoj operacii. Transportnoe delo Rossii, 5, 215-220.
10. Ustinov V.V. (2013). Sovershenstvovanie organizacii i upravlenija tehnologicheskimi peregruzochnymi processami morskogo porta : dis. … k-ta teh. nauk. FGBOU VO «GMU imeni admirala F.F. Ushakova». Novorossijsk, 139.
11. Morskoj jenciklopedicheskij spravochnik : jelektron. sprav. Rezhim dostupa k sprav. URL : https://www.sea_enc_reference.academic.ru (data obrashhenija: 15.09.2018)
12. Obshhie pravila plavanija i stojanki sudov v morskih portah Rossijskoj Federacii i na podhodah k nim
13. FZ RF «Kodeks torgovogo moreplavanija»
14. Ustinov V.V. (2012). Modeli optimizacii ispol'zovanija buksirnogo parka porta i verojatnosti bezopasnosti shvartovnoj operacii. Transportnoe delo Rossii, 5, 215-220.
15. Savickij G.A. Vetrovaja nagruzka na sooruzhenija. Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1972
16. Basin A.M., Anfimov V.N. Gidrodinamika sudna Izd. Rechnoj transport. Leningrad 1961
17. Spravochnik po teorii korablja: V trjoh tomah. Tom 1. Gidromehanika. Soprotivlenie dvizheniju sudov. Sudovye dvizhiteli. Pod red. Ja.I. Vojtkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985.
18. Rukovodstvo po obrabotke sudov na terminalah PAO «NMTP». lokal'nyj akt. 2018.

Conference proceedings:

19. Diveev A.I., Severcev N.A. (vychislitel'nyj centr im. A.A. Dorodnicyna RAN), «Universal'nye ocenki bezopasnosti»: «Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tehnicheskoj i kommercheskoj jekspluatacii morskogo transporta», Mat. Konf. Chetvertaja regional'naja nauchno-tehn. Konf, Novorossijsk: RIO FGOU VPO «MGA imeni admirala F.F. Ushakova», 2005

Monographs

20. Ustinov V.V., Jeglit Ja.Ja., Jeglite K.Ja.; pod red. Ja.Ja. Jeglita (2014). Metodika upravlenija peregruzochnymi processami morskogo torgovogo porta. Monografija, SPb.: «Feniks», 138.

УДК629.5.015.3

УПРАВЛЕНИЕ СУДНОМ С КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ ПРИ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Людмила Серафимовна Грошева
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники,
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vim@vgavt-nn.ru
Валерий Иванович Плющаев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники,
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Вадим Иванович Тихонов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vitnn12@mail.ru

Аннотация

Суда с колесным-движительно рулевым комплексом, обладающие рядом специфических особенностей (отсутствие традиционного руля, малая осадка, большая парусность), предъявляют повышенные требования к квалификации судоводителя. Существенное влияние на динамику судна и его управляемость оказывает ветровое воздействие. Для обеспечения эффективной эксплуатации и обеспечения безопасности судоходства требуется разработка алгоритмов управления и создание современных технических средств, реализующих эти алгоритмы.

В работе приведена методика расчета сил действующих на корпус и моментов вращения, вызванных ветром, результаты расчетов сил и моментов для судна проекта ПКС-180. Представлены результаты моделирования поведения судна при ветровом воздействии (влияние ветра на скорость и траекторию движения судна. Предложен алгоритм управления, позволяющий удерживать судно на заданной траектории при внешних возмущениях. Заданный режим движения обеспечивается подбором соотношения частот вращения гребных колес. Приведены данные математического моделирования движения судна по траектории при изменениях ветрового воздействия.

Ключевые слова: математическая модель, судно, колесно-движительный рулевой комплекс, ветровое воздействия, алгоритм управления.

HANDLING OF A SHIP WITH PROPULSION STEERING UNIT UNDER WIND EXPOSURE

Lyudmila S. Grosheva
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of of radioelectronics,
Volga state university of water transport,
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: vim @vgavt-nn.ru
Valery I. Plyushchaev
Professor, Dr.Sci.Tech.,
Professor of the Department of radioelectronics
Volga state university of water transport,
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: vip @vgavt-nn.ru
Vadim I. Tikhonov
professor, Dr.Sci.Tech.,
Professor of the Department of Navigation and Shipping Safety
Volga State University of Water Transport
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
e-mail: vitnn12@mail.ru

Abstract

Ships with a wheel propulsion steering unit, possessing a number of specific features (absence of a traditional steering wheel, small draft, high windage) impose high demands on the boatmaster's

qualifications. Wind exposure has a significant impact on the ship dynamics and controllability. To ensure efficient operation and safety of shipping, the development of control algorithms as well as creation of modern technical means implementing these algorithms are required.

The paper represents a methodology to calculate forces acting upon the hull and to calculate the moments of rotation caused by the wind. It also represents the results of forces and moments calculations for the ship of the PKS-180 project. The authors present the results of the vessel behavior modeling under wind exposure (wind impact on the speed and the travel line of the ship). The article introduces a control algorithm to keep the ship on a given travel line under external disturbances. The specified mode of movement is provided by the selection of the paddle wheels rotation rate. The article also represents the mathematical modeling data of the ship movement along the travel line under wind exposure changing.

Key words: mathematical model, ship, wheel propulsion steering unit, wind impact, control algorithm.

Введение

В России эксплуатируются и стоятся суда с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК) [1]. Оригинальный привод (два гребных колеса по бортам судна в кормовой части с вектором тяги, направленным под углом к диаметральной плоскости судна) позволяют отказаться от традиционного руля и обеспечить малую осадку. Так новое строящееся судно пр.ПКС-180 пассажировместимостью 180 человек, с размерами 81,6 * 13,8 * 9,5 м, имеет осадку 1,2 м [2]. При этом площадь боковой проекции судна составляет 680 м2, а площадь поперечной проекции 113 м2.

Рис. 1. Теплоход проекта ПКС-180

Малая осадка, плоское дно, большая парусность существенным образом влияют на динамические характеристики судна при ветровом воздействии, что подтверждает опыт эксплуатации малых судов такого типа (теплоходы «Сура», «Колесовъ» и «Доброходъ», имеющие длину около 35 м).

Поэтому весьма актуальными являются исследования влияния ветрового воздействия на динамику судов с КДРК.

1. Расчет ветрового воздействия на корпус судна

Для расчета ветровой нагрузки судно можно представить в виде параллелепипеда с цилиндрической носовой вставкой. Параллелепипед имеет площадь боковой поверхности около $S_п$ = 600 м^2, поперечной проекции $S_к$ = 113 м^2. Переднюю часть судна можно представить в виде цилиндрической вставки высотой $h_ц$ = 8,6 м и диаметром $2r_ц$ = 13,1 м. Таким образом, общая площадь цилиндрической вставки составит $S_ц$ = 177 м^2). Центр парусности ЦП1 боковой поверхности смещен к корме на 7 м, центр парусности ЦП2 цилиндрической вставки смещен к носу относительно центра масс ЦМ на 31 м, центр парусности кормовой части ЦП3 смещен к корме на 40,8 м.

Сила ветрового воздействия определяется как [3]:

$$R_{\nu i} = C_i \frac{\rho}{2} \nu^2 S_i,$$

где C_i - аэродинамический коэффициент сопротивления (зависит, в частности от формы объекта);

ρ – плотность воздуха, кг/м^3;

v – скорость кажущегося ветра, м/с;

Si - площадь, на которую воздействует ветер, м^2.

Для создания математической модели судна, учитывающей внешние воздействия, требуется получить продольную и поперечную составляющие силы ветра и вращающий момент этой силы в соответствии с геометрией корпуса. Продольную $R_\nu^{пр}$ и поперечную $R_\nu^{п}$ составляющие силы ветрового воздействия можно представить как

$$R_\nu^{пр} = \begin{cases} -\frac{\rho}{2}\nu^2 \cos\phi\ C_1 S_п \sin\varphi + C_2\, r_ц\, h_ц(\pi - \varphi)) & при\ 0^0 \le \varphi < 90^0; \\ \frac{\rho}{2}\nu^2 \cos\phi\ -C_1 S_п \sin\varphi + C_2\, r_ц\, h_ц(\pi - \varphi) + C_3 S_к \cos\varphi) & при\ 90^0 \le \varphi < 180^0; \\ \frac{\rho}{2}\nu^2 \cos\phi\ C_1 S_п \sin\varphi - C_2\, r_ц\, h_ц(\varphi - \pi)) & при\ 180^0 \le \varphi < 270^0; \\ \frac{\rho}{2}\nu^2 \cos\phi\ C_1 S_п \sin\varphi - C_2\, r_ц\, h_ц(\varphi - \pi) + C_3 S_к \cos\varphi) & при\ 270^0 \le \varphi < 360^0, \end{cases}$$

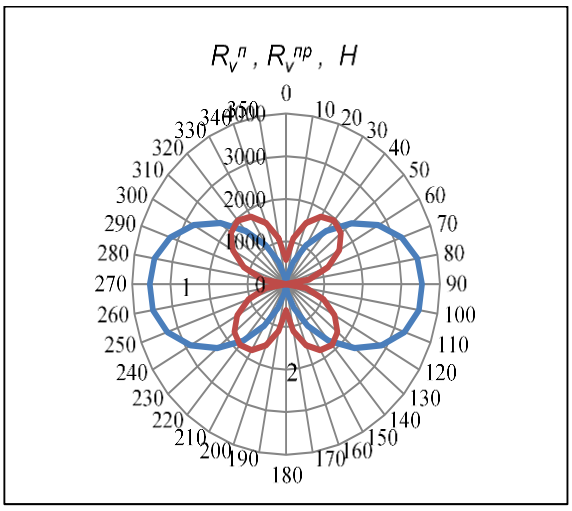
$$R_v^{п} = \begin{cases} -\frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п \sin\varphi + C_2 r_ц\ h_ц(\ \pi-\varphi)) \quad при\ \ 0^0 \le \varphi < 90^0; \\ -\frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п \sin\varphi + C_2 r_ц\ h_ц(\ \pi-\varphi) - C_3\ S_к \cos\varphi)\ при\ \ 90^0 \le \varphi < 180^0; \\ \frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п \sin\varphi - C_2 r_ц\ h_ц(\ \varphi-\pi)) \quad при\ 180^0 \le \varphi < 270^0; \\ \frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п \sin\varphi - C_2 r_ц\ h_ц(\ \varphi-\pi) + C_3\ S_к \cos\varphi)\ при\ 270^0 \le \varphi < 360^0. \end{cases}$$

Момент, разворачивающий судно при ветровом воздействии, запишется как

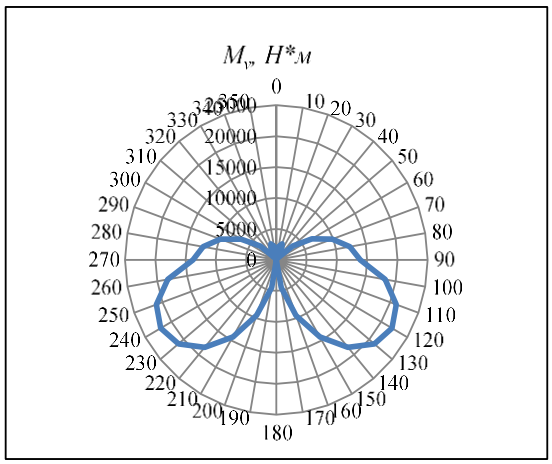
$$M_v = \begin{cases} \frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п\ L_1 \sin\varphi - C_2\ r_ц\ h_ц(\ \pi-\varphi)\ L_2)\ при\ \ 0^0 \le \varphi < 90^0; \\ \frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п\ L_1 \sin\varphi - C_2\ r_ц\ h_ц(\ \pi-\varphi)\ L_2 + C_3\ S_к L_3 \cos\varphi)\ при\ \ 90^0 \le \varphi < 180^0; \\ -\frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ C_1 S_п\ L_1 \sin\varphi - C_2\ r_ц\ h_ц(\ \pi-\varphi)\ L_2 + C_3\ S_к L_3 \cos\varphi)\ при\ \ 180^0 \le \varphi < 270^0; \\ \frac{\rho}{2}\ v^2 \sin\varphi(\ -C_1 S_п\ L_1 \sin\varphi - C_2\ r_ц\ h_ц(\ \varphi-\pi)\ L_2\ при\ 270^0 \le \varphi < 360^0, \end{cases}$$

где φ – угол кажущегося ветра в радианах, *L1,L2* и *L3* – плечи сил, приложенных к центам парусности ЦП1, ЦП2 и ЦП3, в метрах; *C1,C2,C3* - аэродинамические коэффициенты сопротивления параллелепипеда, цилиндрической вставки и кормовой части.

На рис. 2 представлены результаты расчетов – поперечная и продольная силы, а также поворачивающий момент, действующие на судно проекта ПКС-180 при скорости ветра 3 м/с.



а).



б).

Рис. 2. Силы (а) и момент (б) ветрового воздействия на судно проекта ПКС-180 при v= 3 м/с:
1- поперечная сила, 2 – продольная сила

Математическая модель судна пр. ПКС-180, учитывающая воздействие ветра, приведена в [4]. С использованием модели были изучены динамические характеристики судна в различных ситуациях при ветровом воздействии.

2. Динамические характеристика судна с КДРК при ветровом воздействии

На рис. 3 приведены результаты расчета разгонных характеристик судна при различных частотах вращения гребных колес.

При максимальной частоте вращения гребных колес судно достигает расчетной проектной скорости 17,5 км/ч. (проектное значение составляет 18 км/ч). На рис. 4 представлена зависимость диаметра циркуляции $D_{цирк}$ от скорости движения судна (частоты вращения гребных колес n) и угла вектора тяги α по отношению к ДП судна (7 и 15 градусов). В проектной документации расчетные значения диаметров циркуляции для различной загрузки судна и $\alpha = 7^0$ лежат в пределах 161 -196 *м*. Приведенные данные доказывают адекватность предложенной в [4] математической модели.

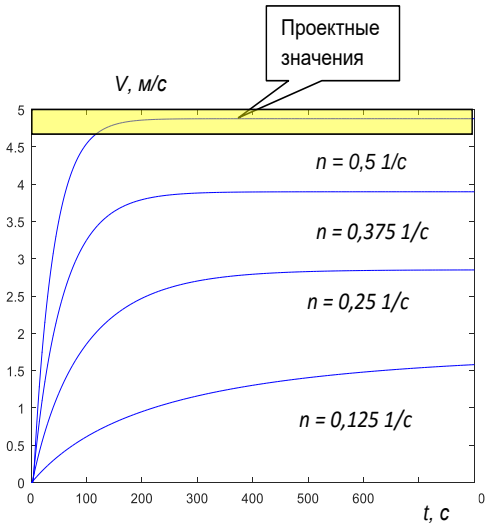


Рис. 3 Разгонные характеристики судна при разных частотах вращения гребных колес

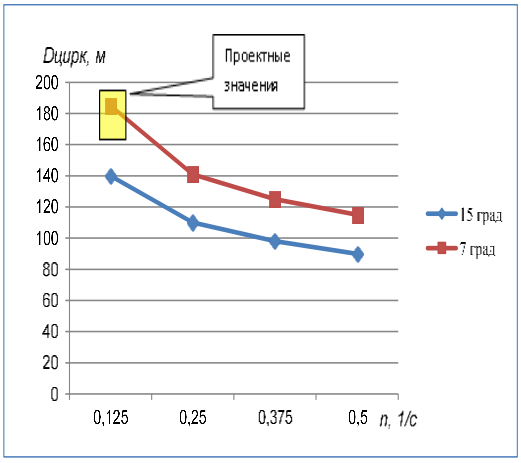


Рис. 4. Зависимость диаметра циркуляции $D_{цирк}$ от параметров движения судна

Судно пр. ПКС-180 обладает большой парусностью, поэтому следует ожидать существенного влияния силы ветра (особенно бокового) на динамические характеристики судна, а следовательно на его управляемость.

Зависимости установившейся скорости судна от скорости попутного ветра приведены на рис. 5. Очевидно, что влияние ветра наиболее заметно при малых скоростях движения судна.

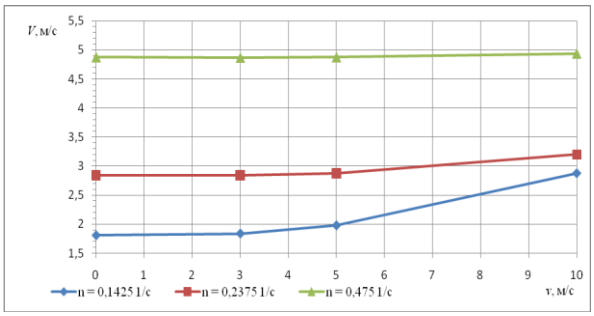


Рис. 5. Зависимость установившейся скорости движения от скорости попутного ветра

На рис. 6 представлены результаты расчета траектории движения судна при боковом ветре $\varphi = \pi/2$ и $v = 5$ м/с. В момент $t = 0$ с включается КДРК, оба колеса вращаются с одинаковой частотой $n1 = n2 = const$. Большая парусность судна, существенное смещение центра парусности относительно центра масс приводят к повороту корпуса (кривая 1 на рис. 6 для $n1 = n2 = 0{,}095$ 1/с). Судно набирает скорость, но под влиянием ветра начинает двигаться в противоположную от начального направления сторону. Положение корпуса судна отражено линией (о – корма судна, х – нос судна, длина линии не привязана к размерам судна, угол наклона определяется соотношением масштабов осей). Траектории 2, 3, 4 на рис. 6 рассчитаны для более высоких оборотов гребных колес, а следовательно для больших скоростей движения судна.

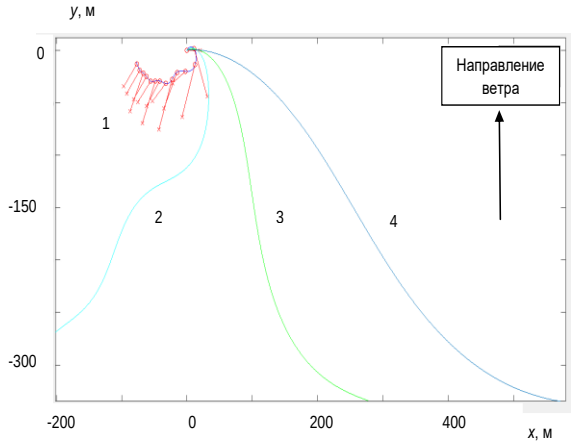


Рис. 6.Траектория движения при боковом воздействии ветра (v = 5 м/с) в зависимости от $n = n_1 = n_2$:

1) n = 0,095 1/с; 2) n = 0,1425 1/с; 3) n = 0,2375 1/с; 4) n = 0,475 1/с

3. Алгоритм удержания судна на траектории

Удержать судно на заданном курсе можно путем изменения соотношения частот вращения гребных колес. Алгоритм удержания судна с КДРК на заданной траектории предложен в [5]. Управление производится с использованием «рулевой» функции

$$R = k_a\,(\alpha - \alpha_z) + k_\omega \cdot \omega + k_o(y - y_z),$$

где α, α_z - угол отклонения от курса и заданный угол;

ω – угловая скорость поворота судна;

$y - y_z$ - отклонение судна от заданной траектории $y_z = f(x)$;

k_a, k_ω, k_o – коэффициенты пропорциональности.

Управляющие воздействия на приводы гребных колес формируются следующим образом:

$$U_{1н} = \begin{cases} U_{1с} + R\,(U_{1max} - U_{1с}) & \text{при } R > 0; \\ U_{1ход} & \text{при } R \le 0; \end{cases}$$

$$U_{2н} = \begin{cases} U_{2с} - R\,(U_{2max} - U_{2с}) & \text{при } R \le 0; \\ U_{2ход} & \text{при } R > 0, \end{cases}$$

где U1,2 ход - заданное управляющее воздействие, обеспечивающее требуемую скорость движения судна, индексы «с» и «н» обозначают соответственно текущее значение параметров и вновь формируемое.

При $U_{1ход} \ge 0.9 \cdot U_{1max}$ и $U_{2ход} \ge 0.9 \cdot U_{2max}$ (т.е. при возможности увеличения частоты вращения гребных колес лишь на 10%) целесообразно при осуществлении маневра снижать частоту вращения нужного гребного колеса. В этом случае система уравнений примет вид:

$$U_{1н} = \begin{cases} U_{1с} + R \cdot U_{1с} & \text{при } R < 0; \\ U_{1ход} & \text{при } R \ge 0; \end{cases}$$

$$U_{2н} = \begin{cases} U_{2с} - R \cdot U_{2с} & \text{при } R > 0; \\ U_{2ход} & \text{при } R \le 0. \end{cases}$$

На рис. 7 приведены результаты расчетов при движении судна по прямолинейной траектории при первоначально заданных оборотах гребных колес n1 = n2 = $n_{ном}$ /2 (ветер с направления φ = π/2 и скоростью = 3 м/с возникает на 200 с). Алгоритм обеспечивает удержание судна на заданной траектории (отклонение от траектории составляет 0,15 м). Величину перерегулирования и статической ошибки в некоторых пределах можно изменять коэффициентами k_a, k_ω, k_o. Судно движется по траектории с некоторым углом дрейфа (линия показывает положение ДП корпуса). Истинный угол дрейфа будет отображаться на графике при одинаковом масштабе по осям координат.

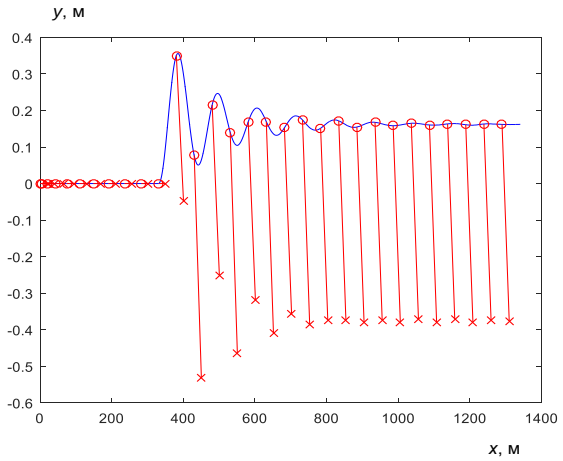


Рис. 7. Движение судна по прямолинейной траектории при = π/2 и = 3 м/с

С увеличением скорости ветра качественные показатели ухудшаются – растет статическая ошибка, увеличивается колебательность переходного процесса. Однако предложенный алгоритм обеспечивает удержание судна на прямолинейной траектории до скорости ветра = 15 м/с. Это достигается за счет интенсификации работы приводов гребных колес.

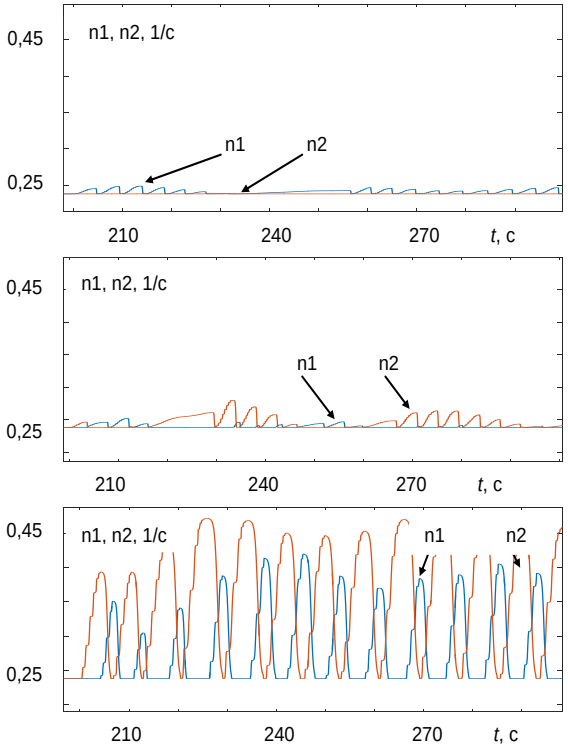


Рис. 8. Изменения частот вращения гребных колес для:

а). = 1 м/с; б). = 3 м/с; в). = 10 м/с

На рис. 8 приведены графики изменений частот вращения гребных колес при удержании судна на заданной траектории при разной скорости ветра.

Выводы

Специфические особенности судов нового класса с КДРК (малая осадка, плоское дно, большая парусность, отсутствие традиционного руля) предъявляют повышенные требования к качеству управления, что серьезно затрудняет работу судоводителя. Ходовые испытания подобного типа судна «Сура» выявили эту проблему. Судоводитель, управляя гребными колесами двумя независимыми джойстиками, с трудом удерживает судно на курсе. Для эффективной эксплуатации и обеспечения безопасности судоходства требуется разработка алгоритмов управления и создания современных технических средств, реализующих эти алгоритмы.

Литература

1. Российский патент № 2225327 от 30.11.2001.
2. Галкин Д.Н. и др. Уникальный туристический теплоход, или как развивать отрасль в современных условиях**.** Речной транспорт (XXI век)). 2016. № 2(78), с. 21-23.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособ. 4-е изд., испр. М.: Academia, 2003, 720 с.
4. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Математическая модель судна с колесным движительно-рулевым комплексом «Золотое кольцо». Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3, С. 36–49.
5. Грошева Л. С., Мерзляков В. И., Плющаев В. И. Синтез алгоритма управления движением судна с колесным движительно-рулевым комплексом . Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.:Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2, с. 34–39.

References

6. Rossijskij patent № 2225327 ot 30.11.2001.
7. Galkin D.N. i dr. Unikal'nyj turisticheskij teplohod, ili kak razvivat' otrasl' v sovremennyh uslovijah. Rechnoj transport (XXI vek)). 2016. № 2(78), s. 21-23.
8. Detlaf A.A., Javorskij B.M. Kurs fiziki: ucheb. posob. 4-e izd., ispr. M.: Academia, 2003, 720 s.
9. Bychkov V.Ja., Grosheva L.S., Pljushhaev V. I. Matematicheskaja model' sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom «Zolotoe kol'co». Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. 2018. № 3, S. 36–49.
10. Grosheva L. S., Merzljakov V. I., Pljushhaev V. I. Sintez algoritma upravlenija dvizheniem sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom . Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.:Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2012. № 2, s. 34–39.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.072

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АЛГОРИТМ УЧЕТА ПОТЕРЬ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ ПРИ ДОСТАВКЕ В СМЕШАННОМ СООБЩЕНИИ

Дмитрий Александрович Коршунов
кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Андрей Олегович Ничипорук
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Анатолий Иванович Телегин
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Аннотация

В данной статье представлен научно-методический подход к обоснованию алгоритма определения фактической убыли грузов в смешанных сообщениях, приводятся причины и особенности возникновения основных потерь навалочных грузов, способов количественной оценки потерь и, соответственно, нормирования части из них как естественной убыли, а также порядок учета потерь при перевозке как одним видом транспорта, так и при доставке в смешанном сообщении.

Отмечается, что для отдельных категорий грузов (гироскопических, зерновых) необходимо производить корректировку массы с учетом изменения их влажности за время перевозки, дается методика расчета и порядок определения потерь навалочного груза при перевозке и применения норм естественной убыли.

Далее приводится методика предварительной стоимостной оценки возможных потерь груза при транспортировании со стороны грузовладельца с учетом норм расхождений (погрешности) весовых приборов и методов определения массы при перевозке одним видом транспорта и в смешанном сообщении.

В заключении отмечается важность учета потерь груза при перевозке в смешанном сообщении и их влияние на конкурентоспособность водного транспорта.

Ключевые слова: убыль грузов, смешанные перевозки, водный транспорт, железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт.

METHOD OF DETERMINING AND ALGORITHM FOR ACCOUNTING LOSSES OF BULK CARGO ON DELIVERY IN A MULTIMODAL TRAFFIC

Dmitry A. Korshunov
Ph.D. in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Andrey O. Nichiporuk
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Anatoly I. Telegin
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Abstract

This article presents a scientific and methodological approach to substantiating the algorithm for determining the actual loss of cargo in multimodal traffic, gives the causes and features of the main losses of bulk cargoes, methods for quantifying losses and, accordingly, rating some of them as a natural

loss; as well as defines the procedure for accounting losses when cargo is transported with a single mode of transport, and for delivery in multimodal traffic.

It is noted that for certain categories of cargo (hydroscopic, grain), it is necessary to adjust the mass to account for changes in their moisture level during transportation, a calculation method and a procedure for determining the loss of bulk cargo during transportation and application of natural loss rates are given.

Further, a method of preliminary evaluation of possible cargo losses during transportation by the cargo owner, taking into account rates of discrepancies (errors) of weighing instruments and methods for determining the weight during transportation by one mode of transport and in multimodal traffic.

In conclusion, it is noted the importance of taking into account the loss of cargo during transportation in multimodal transport and their impact on the competitiveness of water transport.

Keywords: loss of cargo, multimodal transport, water transport, rail transport, road transport.

Введение

Перевозки товаров являются неотъемлемой частью системы мировой торговли. Важным элементом при организации доставки экспортно-импортных товаров (грузов) выступает система смешанных перевозок, в которой участвуют два и более видов транспорта (перевозчиков). При этом грузоотправитель освобождается от обязанности передавать груз с одного вида транспорта на другой и оформлять связанные с этим документы. Если обратить внимание на статистику таких перевозок, то можно заключить, что в смешанных сообщениях перевозятся значительные объемы грузов (рис.1).

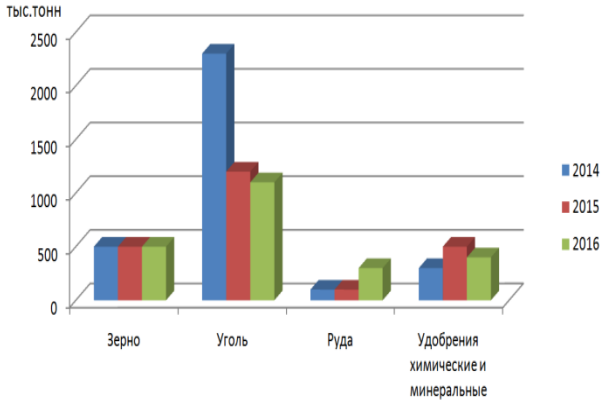


Рис. 1. Перевозки отдельных видов навалочных грузов морским транспортом

Нормативными актами, регулирующими перевозки грузов в прямом смешанном сообщении, являются транспортные уставы, действующие на участвующих в такой перевозке видах транспорта. Вместе с тем следует подчеркнуть, что в самих уставах не отражен целый ряд вопросов, имеющих важное значение при перевозках грузов в смешанном сообщении. В частности, здесь важное коммерческое значение имеет определение норм естественной убыли грузов. В настоящее время определение норм естественной убыли отдельных категорий грузов и на транспорте различных видом производится согласно Правилам перевозок грузок грузов, а также Приказам и Постановлениям как действующих министерств, так и уже не существующих. Например, убыль угля определяется Постановлением Госснаба СССР от 11.08.1987 №109 (ред. от 29.03.1989) "Об утверждении норм естественной убыли антрацитов, каменных и бурых углей и брикетов из каменных и бурых углей при хранении, разгрузке и перевозках" [1]. Или можно привести последний Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ и Минтранса РФ от 11 марта 2008 г. №93/41 “Об утверждении норм естественной убыли химической продукции при перевозках железнодорожным, автомобильным, морским, речным транспортом и в смешанном железнодорожно-водном сообщениях” [2]. При этом, согласно действующему порядку разработки норм естественной убыли, они должны пересматриваться каждые пять лет.

Между тем, при участии двух и более видов транспорта это имеет важное экономическое значение для грузовладельцев. Особенно это актуально в российских условиях, где имеются значительные расстояния от мест производства (добычи) продукции до морских портов, предопределяющие необходимость перевозки груза в смешанном сообщении. Например, основной поток экспортируемого Россией угля идет из Кузбасса, и расстояние до морских терминалов может составлять около 4000 км. Это приводит к значительному росту транспортной составляющей в цене российской угольной продукции, в том числе возникающие дополнительные затраты грузовладельцев, возникающие за счет потерь груза при перевалках. Кроме того, постоянный рост тарифов на железнодорожные перевозки экспортного угля существенно снижает его конкурентоспособность на мировом рынке, поскольку ни один мировой угольный экспортер кроме России не осуществляет железнодорожные перевозки угля на такие огромные расстояния до морского порта. Аналогичная ситуация наблюдается и по другим навалочным грузам. Отсюда вытекает важная научная задача обоснования алгоритма определения фактической убыли грузов в смешанных сообщениях.

Далее нами приводится научное обоснование возникновения определения размеров потерь навалочных грузов, нормирования части из них как естественной убыли, а также алгоритм учета потерь при перевозке как одним видом транспорта, так и при доставке в смешанном сообщении.

1. Методика определения размеров потерь и алгоритм их учета

Согласно нормативных документов (правил перевозки, транспортных кодексов и уставов), общее количество потерь груза на каждом виде транспорта определяется как разница масс груза, определенных в пункте отправления и назначения.

При этом для отдельных категорий грузов (гироскопических, зерновых) необходимо производить корректировку массы с учетом изменения их влажности за время перевозки [3].

Пересчет массы груза производится по формулам:

для гигроскопических и легковоспринимающих влагу грузов

$$G_н = G_ф(1+\frac{W_н - W_ф}{100}),$$

для зерновых грузов

$$G_н = G_ф\left[\frac{100-(W_ф+S_ф)}{100-(W_н+S_н)}\right](1+0{,}44\times10^{-5}\times T_{тр}^{ф}),$$

где $G_н$ – масса груза, пересчитанная на изменение влажности (и сорности) в пункте отправления, т (кг);

$G_ф$ – фактическая масса груза в пункте назначения, т (кг);

$W_н$, $W_ф$ – влажность груза соответственно в пункте отправления и назначения, %;

$S_н$, $S_ф$ – сорность зерна соответственно в пункте отправления и назначения, %;

$T_{тр}^{ф}$ – фактический срок перевозки, сут.

Следует отметить, что в отношении навалочных грузов действуют нормы естественной убыли, представляющие собой максимально допустимые величины их безвозвратных потерь по всем этапам транспортирования (погрузка, перевозка, выгрузка, перевалка), в пределах которых отсутствует ответственность транспорта.

Как правило, естественная убыль навалочных грузов вызвана проявлением: биохимических, микробиологических и теплофизических процессов, возникающих и развивающихся в массиве груза; физико-химических свойств грузов; метеорологических факторов, при которых производится доставка грузов; несовершенства средств защиты от потерь при достигнутом техническом уровне перевозочных и перегрузочных средств и организации транспортного процесса и др.

К естественной убыли не относятся потери, связанные с нарушением требований государственных стандартов, действующих технических и технологических норм транспортирования, правил перевозок грузов и технической эксплуатации судов (транспортных средств), а также потери вследствие изменения качества грузов.

Таким образом, перевозчик освобождается от ответственности за недоставленный груз, если полученная недостача не превышает естественной убыли, определяющейся по формуле:

$$G_{уб} = G_n \times \frac{N_{уб}}{100},$$

где G_n – количество перевозимого груза, т;

$N_{уб}$ – норма естественной убыли груза при перевозке, %.

Изложенный порядок определения потерь навалочного груза при перевозке и применения норм естественной убыли можно представить в виде определенного алгоритма (рис.2).

Рис. 2. Алгоритм определения размеров потерь навалочных грузов при перевозке и применения норм естественной убыли

Кроме норм естественной убыли при определении границ ответственности перевозчика за недостачу груза необходимо учитывать погрешности средств измерений или используемых методов определения массы груза, что также отражено на рисунке.

2. Экономическая оценка потерь груза

С точки зрения грузовладельца интерес представляет предварительная стоимостная оценка возможных потерь груза при транспортировании.

Стоимость несохранности груза при доставке заданной партии определяется расчетом с учетом принятых нормативов потерь или норм естественной убыли, руб [4]:

$$C_{нг} = G_n \times Ц_{гр} \times \frac{N_{уб}}{100},$$

где $Ц_{гр}$ – стоимость груза, руб/т;

Указанное выражение справедливо для применения при перевозке одним видом транспорта, однако для смешанной перевозки его следует уточнить, поскольку количество груза должно корректироваться на уже понесенные (возможные) потери на каждом этапе перевозки и смены вида транспорта:

$$C_{нг}^{смеш} = Ц_{гр}\sum_{i=1}\left(G_i \times \frac{N_{уб\,i}}{100}\right),$$

при этом для всех $i>1$

$$G_i = G_{i-1}\left(1-\frac{N_{уб\,i-1}}{100}\right),$$

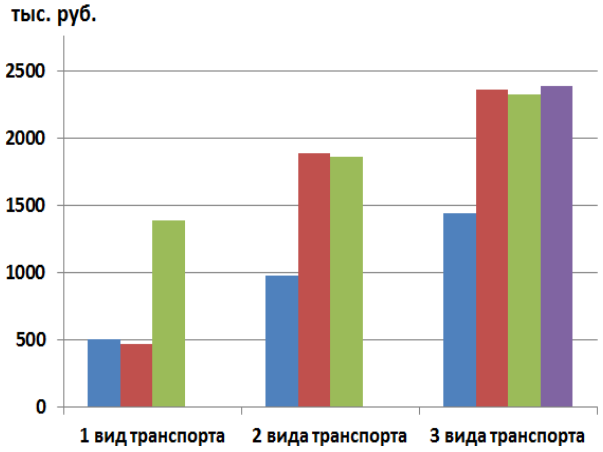
где G_i – количество груза, перевозимое на *i*-ом транспортном участке (*i*-ым видом транспорта), т;

$N_{уб\,i}$ – норма естественной убыли груза при перевозке, действующая на *i*-ом транспортном участке (*i*-ом виде транспорта), %.

Использование предлагаемой формулы позволит грузовладельцам более точно оценивать свои возможные потери при перевозках навалочных грузов в смешанном сообщении.

Наравне с учетом потерь в пределах норм естественной убыли целесообразной представляется стоимостная оценка возможных затрат грузовладельцев в результате неточного определения массы груза (в пределах норм погрешности средств измерений), которую можно осуществлять по аналогичному выражению (но вместо нормы убыли используется норма погрешности измерения).

На рисунке 3 проиллюстрированы возможные экономические потери грузовладельцев с учетом освобождения перевозчиков от ответственности за недостачу навалочного груза в пределах норм естественной убыли и норм расхождений весовых приборов. Стоимостная оценка производилась на примере перевозки судовой партии удобрений (сульфат аммония, 5000 т) одним видом транспорта и в смешанном сообщении (с участием двух и трех видов транспорта).



Один вид транспорта:
- *железнодорожный;*
- *автомобильный;*
- *речной.*

Два вида транспорта:
- *железнодорожный и автомобильный;*
- *железнодорожный и речной;*
- *автомобильный и речной.*

Три вида транспорта:
- *автомобильный, железнодорожный, автомобильный;*
- *железнодорожный, речной, автомобильный;*
- *автомобильный, речной, автомобильный;*
- *железнодорожный, речной, автомобильный.*

Рис.3. Стоимостная оценка потерь груза в пределах норм естественной убыли и норм расхождений (погрешности) весовых приборов и методов определения массы при перевозке одним видом транспорта и в смешанном сообщении

Приведенная гистограмма убедительно показывает, что с увеличением числа участвующих в перевозке груза видов транспорта почти пропорционально возрастают и возможные экономические потери грузовладельцев от недостачи груза.

Заключение

Наибольший размер потерь соответствует транспортно-логистическим схемам доставки с участием речного транспорта. Это связано с тем, что на речном транспорте количество груза традиционно определяется на основании измерения осадки судна. Погрешность при определении осадки допускается в 2,5 см, для судна грузоподъемностью 5000 т это соответствует значению в 50 т, что значительно превышает аналогичные нормативы расхождений на автомобильном и железнодорожном транспорте (в массовом выражении около 30 т).

Как следствие, потенциально значительные потери навалочных грузов при их перевозке в смешанном сообщении по транспортно-логистическим схемам с участием речного транспорта могут оказывать негативное влияние на их оценку грузовладельцами, а также снижать конкурентоспособность внутреннего водного по сравнению с другими видами транспорта, в том числе в рамках осуществления экспортно-импортных и транзитных перевозок [5,6].

Литература

1. Постановление Госснаба СССР от 11.08.1987 N 109 (ред. от 29.03.1989) "Об утверждении норм естественной убыли антрацитов, каменных и бурых углей и брикетов из каменных и бурых углей при хранении, разгрузке и перевозках" http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_88636/
2. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ и Минтранса РФ от 11 марта 2008 г. № 93/41 “Об утверждении норм естественной убыли химической продукции при перевозках железнодорожным, автомобильным, морским, речным транспортом и в смешанном железнодорожно-водном сообщениях” http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12059688/

3. Проект Приказа Министерства транспорта РФ "Об утверждении Правил перевозок грузов на внутреннем водном транспорте" (подготовлен Минтрансом России 27.06.2017) http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56617853/
4. Ничипорук А.О. Методические основы определения стоимости транспортирования грузов, а также выбора оптимальной схемы и способа доставки груза с участием внутреннего водного транспорта // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2017. №4(98).
5. Чуплыгин Г.Н. Интересы клиента как фактор конкурентоспособности ВВТ // Вестник ВГАВТ. 2016. №47. С. 179-184.
6. Смирнов М.А., Уртминцев Ю.Н., Захаров В.Н. Особенности развития внутреннего водного транспорта как потенциального участника международного транспортного коридора «Север-Юг» // Вестник ВГАВТ. 2018. №56. С. 169-170.

References

1. Postanovlenie Gossnaba SSSR ot 11.08.1987 N 109 (red. ot 29.03.1989) "Ob utverzhdenii norm estestvennoy ubyli antratsitov, kamennykh i burykh ugley i briketov iz kamennykh i burykh ugley pri khranenii, razgruzke i perevozkakh" [On approval of rules of natural attrition anthracite, bituminous and brown coals and briquettes from bituminous and brown coals during storage, handling and transportation]. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_88636/
2. Prikaz Ministerstva promyshlennosti i energetiki RF i Mintransa RF ot 11 marta 2008 g. № 93/41 “Ob utverzhdenii norm estestvennoy ubyli khimicheskoy produktsii pri perevozkakh zheleznodorozhnym, avtomo-bil'nym, morskim, rechnym transportom i v smeshannom zheleznodorozhno-vodnom soobshcheniyakh” [On approval of rules of natural attrition of chemical products for the rail vehicle, stably, sea, river transport and combined rail and water communications]. http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12059688/
3. Proekt Prikaza Ministerstva transporta RF "Ob utverzhdenii Pravil perevozok gruzov na vnutrennem vodnom transporte" [About the approval of Rules of transportation of goods on inland water transport] (podgotovlen Mintransom Rossii 27.06.2017). http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56617853/
4. Nichiporuk A.O. Metodicheskie osnovy opredeleniya stoimosti transportirovaniya gruzov, a takzhe vybora optimal'noy skhemy i sposoba dostavki gruza s uchastiem vnutrennego vodnogo transporta (Methodic basis for determining the cost of transportation of goods, as well as the choice of the optimal scheme and method of delivery of goods with the participation of inland water transport). Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2017. №4(98).
5. Chuplygin G.N. Interesy klienta kak faktor konkurentosposobnosti VVT (Interests of the client as a factor of competitiveness of inland water transport). Vestnik VGAVT. 2016. №47. pp.179-184.
6. Smirnov M.A., Urtmintsev Yu.N., Zakharov V.N. Osobennosti razvitiya vnutrennego vodnogo transporta kak potentsial'nogo uchastnika mezhdunarodnogo transportnogo koridora «Sever-Yug» (Features of development of inland water transport as a potential participant of the international transport corridor "North-South"). Vestnik VGAVT. 2018. №56. pp.169-170.

УДК 656.072

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ И СТОИМОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПАССАЖИРА НА ВНУТРИГОРОДСКИХ И ПРИГОРОДНЫХ МАРШРУТАХ «ОТ ДВЕРИ ДО ДВЕРИ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОБУСОВ ИЛИ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Андрей Олегович Ничипорук
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Анатолий Иванович Телегин
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Юрий Николаевич Уртминцев
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой управления транспортом
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru

Аннотация

В данной статье представлены возможные типовые транспортно-логистические схемы перемещения пассажира на автобусах внутригородских и пригородных маршрутах, а также на параллельных им судоходных путях соответствующих внутригородских и пригородных маршрутов – судах на воздушной подушке, работающих по расписанию.

Сформулированы аналитические выражения для определения продолжительности поездки пассажира по типовым транспортно-логистическим схемам, на основании которых предложена унифицированная форма определения временных и стоимостных показателей при поездке на внутригородских и пригородных маршрутах.

Расчеты, выполненные на контрольных примерах, позволили получить аналитические зависимости, применимые для расчета времени поездки пассажира в зависимости от расстояния и вида транспортных средств. Приведенные зависимости и построенные на их основании графики могут быть использованы для обоснования целесообразности эксплуатации судов на воздушной подушке при перевозках пассажиров.

В заключении даны рекомендации по использованию предлагаемой методики для составления проектных вариантов расписаний движения транспортных средств (автобусов, судов на воздушной подушке) на внутригородских и пригородных маршрутах.

Ключевые слова: внутригородские и пригородные пассажирские перевозки, суда на воздушной подушке.

METHODS FOR DETERMINING THE TIME AND COST OF TRANSPORTING A PASSENGER ON INTRACITY AND SUBURBAN DOOR-TO-DOOR ROUTES USING BUSES OR GROUND-EFFECT VEHICLES

Andrey O. Nichiporuk
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Anatoly I. Telegin
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru
Yuri N. Urtmintsev
Dr.Sci.Tech, professor
Head of the Department of Transport Management
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru

Abstract

This article presents possible typical transport and logistics schemes for transportation of passengers on buses of intracity and suburban routes, as well as on the parallel navigable routes of the corresponding intracity and suburban routes - ground-effect vehicles operating on a schedule.

Analytical expressions are formulated to determine the duration of a passenger's travel according to standard transport and logistics schemes, on the basis of which a unified form for determining time and cost indicators is suggested when traveling on intracity and suburban routes.

The calculations based on the tests allowed us to obtain analytical dependencies applicable for calculating the passenger travel time depending on the distance and type of vehicles. The dependences given and the graphs built on their basis can be used to substantiate the expediency of operating ground-effect vehicles during the transportation of passengers.

In conclusion, recommendations are given on the use of the proposed methodology for the compilation of design options for schedules of vehicles (buses, ground-effect vehicles) on intracity and suburban routes.

Keywords: intercity and suburban passenger traffic, ground-effect vehicles.

Введение

Использование водного транспорта для перевозок пассажиров на внутригородских и пригородных маршрутах является одним из направлений снижения загруженности автомобильных и железных дорог и уменьшения сопутствующих негативных последствий (снижение скорости доставки пассажиров, высокая аварийность, травматизм пассажиров, отрицательное воздействие на окружающую среду) [1-4].

Наиболее конкурентоспособным типом судов, обеспечивающим круглогодичное обслуживание и перевозки пассажиров, являются суда на воздушной подушке (СВП) [5, 6]. Соответственно, в крупных приречных городах могут быть организованы социальные внутригородские и пригородные речные маршруты с использованием СВП.

При этом актуальной задачей является обоснование целесообразности их эксплуатации на конкретных линиях перевозок пассажиров, прежде всего, по сравнению с автомобильным транспортом, в условиях, когда для выбора пассажирами маршрута и вида транспорта временные затраты становятся не менее значимым критерием, чем стоимость поездки [5, 7].

1. Постановка задачи

Для адекватности изложения и последующего сравнения схем перемещения пассажира на внутригородском или пригородном маршрутах при определении времени и стоимости поездки с использованием автобусов и СВП необходимо учесть следующие факторы:

1. На всех сравниваемых маршрутах места отправления и назначения пассажира должны быть одинаковыми.

2. Расстояния перевозки и соответственно время поездки пассажира на внутригородском или пригородном маршрутах с использованием автобусов или СВП будут разными в зависимости от: расстояния расположения друг от друга пунктов отправления и назначения пассажира; мест нахождения остановок (автостанций, причалов) на внутригородских и пригородных маршрутах; расстояния перемещения пассажира транспортными средствами на внутригородском или пригородном маршрутах; времени хода пассажира до соответствующих остановок; скорости движения транспортных средств по городу и пригороду в обычном режиме и при ухудшении погодных условий; физического возраста и состояния здоровья самого пассажира; уровня системы управления и организации движения и др.

3. Время, затрачиваемое пассажиром на поездку по любой типовой транспортно-логистической схеме (ТЛС), берется с учетом обусловленных в ней отрезков пути.

4. В качестве автотранспортных средств, используемых на внутригородских и пригородных маршрутах, рассматриваются автобусы и маршрутные такси, работающие по расписанию, с определенными интервалами движения.

5. На ряде временных участков схем пассажир не будет расходовать денежные средства.

2. Предлагаемая методика

Для разработки единой (унифицированной) методики сформулируем аналитические выражения по определению продолжительности поездки пассажира «от двери до двери» с использованием различных ТЛС.

Схема 1. Поездка пассажира на городском маршруте с использованием одного автобуса:

$$T^{гав1} = t_1^{сх1} + t_1^{ож1} + t_1^{пав1} + t_1^{сх2},$$

где $t_1^{сх1}$ – время хода пассажира от дома (места отправления) до автобуса городского маршрута, идущего до нужного пункта назначения;

$t_1^{ож1}$ – время ожидания пассажиром автобуса;

$t_1^{пав1}$ – время поездки пассажира на автобусе;

$t_1^{сх2}$ – время хода пассажира от автобусной остановки до места своего назначения.

Схема 2. Поездка пассажира на городском маршруте с использованием двух автобусов:

$$T^{гав2} = t_2^{сх1} + t_2^{ож1} + t_2^{пав1} + t_2^{ож2} + t_2^{пав2} + t_2^{сх2},$$

где $t_2^{сх1}, t_2^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до автобуса в пункте отправления и от автобуса до места назначения;

$t_2^{ож1}, t_2^{ож2}$ – соответственно время ожидания пассажиром первого и второго автобуса;

$t_2^{пав1}, t_2^{пав2}$ – соответственно время поездки пассажира на первом и втором автобусе.

Схема 3. Поездка пассажира на пригородном автобусном маршруте:

$$T^{пав1} = t_3^{сх1} + t_3^{ож1} + t_3^{пав1} + t_3^{сх2},$$

где $t_3^{сх1}, t_3^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до автобуса пригородного маршрута и от автобуса до места назначения;

$t_3^{ож1}$ – время ожидания пассажиром автобуса в пункте отправления;

$t_3^{пав1}$ – время поездки пассажира на автобусе пригородного маршрута от пункта отправления до пункта назначения.

Схема 4. Поездка пассажира на городском и пригородном маршрутах (с использованием одного автобуса, идущего на автостанцию, и одного автобуса пригородного маршрута):

$$T^{пав2} = t_4^{сх1} + t_4^{ож1} + t_4^{гав1} + t_4^{ож2} + t_4^{пав2} + t_4^{сх2},$$

где $t_4^{сх1}, t_4^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до автобуса городского маршрута и от пригородного автобуса, прибывшего в пункт назначения;

$t_4^{ож1}, t_4^{ож2}$ – соответственно время ожидания пассажиром автобуса городского маршрута и автобуса пригородного маршрута;

$t_4^{гав1}, t_4^{пав2}$ – соответственно время поездки пассажира на автобусах городского и пригородного маршрутов.

Схема 5. Поездка пассажира на городском и пригородном маршрутах (с использованием двух городских и одного пригородного автобусов):

$$T^{пав3} = t_5^{сх1} + t_5^{ож1} + t_5^{гав1} + t_5^{ож2} + t_5^{гав2} + t_5^{ож3} + t_5^{пав1} + t_5^{сх2},$$

где $t_5^{сх1}, t_5^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до автобуса городского маршрута и от автобуса пригородного маршрута до пункта назначения;

$t_5^{ож1}, t_5^{ож2}, t_5^{ож3}$ – соответственно время ожидания пассажиром автобусов городского маршрута и пригородного автобуса на автостанции;

$t_5^{гав1}, t_5^{гав2}$ – соответственно время поездки пассажира на автобусах городского маршрута с пересадкой до автостанции на автобус пригородного маршрута;

$t_5^{пав1}$ – время поездки пассажира на автобусе пригородного маршрута до пункта назначения.

Схема 1р. Поездка пассажира на городском или пригородном маршрутах с использованием СВП:

$$T^{СВП1} = t_{p1}^{сх1} + t_{p1}^{ож1} + t_{p1}^{СВП} + t_{p1}^{сх2},$$

где $t_{p1}^{сх1}, t_{p1}^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до речного причала для посадки на СВП и от речного причала в пункт назначения;

$t_{p1}^{ож1}$ – время ожидания пассажиром СВП на речном причале и приобретение билета;

$t_{p1}^{СВП}$ – время поездки пассажира на СВП на внутригородском или пригородном маршруте.

Схема 2р. Поездка пассажира на городском или пригородном маршрутах с использованием одного городского автобуса и СВП:

$$T^{СВП2} = t_{p2}^{сх1} + t_{p2}^{ож1} + t_{p2}^{гав1} + t_{p2}^{ож2} + t_{p2}^{СВП} + t_{p2}^{сх2},$$

где $t_{p2}^{сх1}, t_{p2}^{сх2}$ – соответственно ожидание пассажиром автобуса городского маршрута и СВП на речном причале;

$t_{p2}^{ож1}, t_{p2}^{ож2}$ – соответственно время ожидания автобуса городского маршрута и СВП;

$t_{p2}^{гав1}$ – время поездки пассажира на автобусе городского маршрута до речного причала – для поездки на СВП до речного пункта назначения;

$t_{p2}^{СВП}$ – время поездки пассажира на СВП до нужного речного пункта назначения.

Схема 3р. Поездка пассажира на городском или пригородном маршрутах с использованием двух городских автобусов (с пересадкой) и СВП:

$$T^{СВП3} = t_{p3}^{сх1} + t_{p3}^{ож1} + t_{p3}^{гав1} + t_{p3}^{ож2} + t_{p3}^{гав2} + t_{p3}^{ож3} + t_{p3}^{СВП} + t_{p3}^{сх2},$$

где $t_{p3}^{сх1}, t_{p3}^{сх2}$ – соответственно время хода пассажира до автобусной остановки городского маршрута и от речного причала;

$t_{p3}^{ож1}, t_{p3}^{ож2}, t_{p3}^{ож3}$ – соответственно время ожидания пассажиром одного автобуса городского маршрута, пригородного автобуса и СВП на внутригородском или пригородном маршруте;

$t_{p3}^{гав1}$ – время поездки пассажира на первом автобусе городского маршрута;

$t_{p3}^{гав2}$ – время поездки пассажира на втором автобусе, идущем на речной причал;

$t_{p3}^{СВП}$ – время поездки пассажира на СВП на внутригородском или пригородном маршруте.

Представленные выше аналитические выражения можно привести к единой унифицированной форме, позволяющей определять суммарное время поездки пассажира как на внутригородских, так и пригородных маршрутах, с использованием автобусов и СВП:

$$T_{СВП}^{АВТ} = \sum_{i=1}^{m} (t_i^{сх} + t_i^{ож} + t_i^{гав} + t_i^{пав} + t_i^{СВП}),$$

где $t_i^{сх}$ – продолжительность самостоятельного перемещения пассажира без использования транспортных средств на *i*-ом этапе ТЛС его поездки;

$t_i^{ож}$ – продолжительность ожидания пассажира в пункте отправления (или пересадки) транспортных средств на *i*-ом этапе ТЛС его поездки;

$t_i^{гав}$ – продолжительность поездки на автобусе городского маршрута на *i*-ом этапе ТЛС;

$t_i^{пав}$ – продолжительность поездки на автобусе пригородного маршрута на *i*-ом этапе ТЛС;

$t_i^{СВП}$ – продолжительность поездки пассажира на СВП на *i*-ом этапе ТЛС.

Учитывая, что при перемещении пассажира по любой из рассматриваемых схем он будет оплачивать только стоимость проезда в автобусе и СВП, можно сформулировать выражение по определению стоимости проезда пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах с использованием автобусов и СВП:

$$C_{СВП}^{АВТ} = \sum_{i=1}^{m} (C_i^{гав} + C_i^{пав} + C_i^{СВП}),$$

где $C_i^{гав}$ – стоимость проезда на городском автобусе на *i*-ом этапе ТЛС поездки пассажира;

$C_i^{пав}$ – стоимость проезда на пригородном автобусе на *i*-ом этапе ТЛС поездки пассажира;

$C_i^{СВП}$ – стоимость проезда на СВП на *i*-ом этапе ТЛС поездки пассажира.

3. Результаты апробации предлагаемой методики

Авторами были произведены расчеты по определению конкретных временных и стоимостных показателей по всем рассматриваемым ТЛС возможной поездки пассажира. Анализ и сравнение полученных временных показателей позволил сделать следующие выводы:

1. Применение СВП при перевозке пассажиров на внутригородских маршрутах (в пределах 50 км) гораздо эффективнее по времени, поскольку их скорости движения в 2-2,5 раза выше, чем существующие средние скорости автобусов и маршрутных такси на городских автодорогах, которые находятся в пределах от 10 до 30 км/ч.

2. Применение СВП при перевозке пассажиров на внутригородских маршрутах эффективнее даже тогда, когда пассажир будет добираться до речного причала автобусом (до 5 км пути). Причем, чем дальше находится конечный пункт поездки пассажира, тем выгоднее применение СВП, поскольку экономия времени будет в разы.

3. Применение СВП на пригородных маршрутах для пассажира по времени гораздо лучше, чем одного автобуса, который по всему городу (вдоль речного пути) идет с низкой скоростью (в пределах от 10 до 30 км/ч), в то время как СВП двигается на всем пути со скоростью 40-60 км/ч, что и дает экономию времени.

В качестве иллюстрации полученных результатов на рисунке 1 приведена динамика времени поездки пассажира по схемам 5 и 3р.

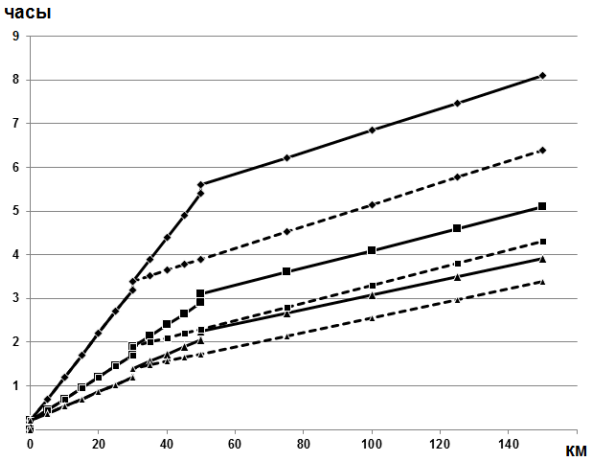


Рис. 1. Сравнительная динамика времени поездки пассажира по схемам 5 и 3р:

	скорость автобусов	*скорость СВП*
	10 и 40 км/ч	-
	20 и 50 км/ч	-
	30 и 60 км/ч	-
	10 км/ч	*40 км/ч*
	20 км/ч	*50 км/ч*
	30 км/ч	*60 км/ч*

Согласно представленного графика, пассажир быстрее доберется до пригородного пункта назначения, если воспользуется услугами СВП, когда пригородный маршрут начинается с 30 км внутригородской сети сообщения. Если пригородный речной причал будет находиться в предельной черте городской сети (50 км), до него нужно будет добираться городским автобусом, то преимуществ использования СВП не будет, т.к. скорость автобусов за пределами города не уступает скорости этих судов.

Заключение

ТЛС поездки пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах с использованием автобусов и СВП дают нам возможность представить аналитические выражения, позволяющие рассчитывать время поездки пассажира в зависимости от конкретных расстояний и соответствующих транспортных средств (таблица 1).

Таблица 1

Аналитические зависимости для определения времени поездки пассажира по условиям соответствующих транспортно-логистических схем (без учета $t^{сх}$)

Схема	Транспортная схема поездки	Аналитические зависимости, часы
1	Городской автобусный маршрут	0,2+$l^{г}$/10; 0,2+$l^{г}$/20; 0,2+$l^{г}$/30 $l^{г}$ – расстояние поездки пассажира по городу, км.
2	Городской автобусный маршрут	0,4+$l^{г}$/10; 0,4+$l^{г}$/20; 0,4+$l^{г}$/30
3	Пригородный автобусный маршрут	0,2+$l^{г}$/10+$l^{пр}$/40; 0,2+$l^{г}$/20+$l^{пр}$/50; 0,2+$l^{г}$/30+$l^{пр}$/60 $l^{пр}$ – расстояние поездки пассажира по пригороду, км.

4	Пригородный автобусный маршрут	$0,4+l^{г}/10+l^{пр}/40$; $0,4+l^{г}/20+l^{пр}/50$; $0,4+l^{г}/30+l^{пр}/60$
5	Пригородный автобусный маршрут	$0,6+l^{г}/10+l^{пр}/40$; $0,6+l^{г}/20+l^{пр}/50$; $0,6+l^{г}/30+l^{пр}/60$
1р	Внутригородской или пригородный маршрут	$0,2+l^{рс}/40$; $0,2+l^{рс}/50$; $0,2+l^{рс}/60$ $l^{рс}$ – расстояние поездки пассажира по внутригородскому или пригородному речному маршруту, км.
2р	Внутригородской или пригородный маршрут	$0,4+l^{г}/10+l^{рс}/40$; $0,4+l^{г}/20+l^{рс}/50$; $0,4+l^{г}/30+l^{рс}/60$
3р	Внутригородской или пригородный маршрут	$0,6+l^{г}/10+l^{рс}/40$; $0,6+l^{г}/20+l^{рс}/50$; $0,6+l^{г}/30+l^{рс}/60$

Данные аналитические зависимости позволяют рассчитать проектные варианты движения городских и пригородных автобусов, в сравнении с судами на воздушной подушке, и соответственно время поездки пассажиров. Они могут стать основой для составления реалистичных вариантов расписаний и обеспечения организации управления работой выделяемых для этих целей транспортных средств.

Литература

1. Хунас Л., Безуглова М.С. Перспективы развития альтернативных общественных транспортных систем, на примере г. Астрахани // Астраханский вестник экологического образования. 2014. №3 (29). С. 82-84.
2. Чуплыгин Г.Н., Матвеев Ю.И., Ефремов С.Ю. К проблеме транспортного обеспечения России // Вестник АГТУ. 2012. №1. С. 147-150.
3. White paper on Efficient and Sustainable Inland Water Transport in Europe // Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport. New York and Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2011. 74 p.
4. CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI. External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008 // Delft, CE Delft, November 2011. 163 p.
5. Веселов Г.В., Иванов М.В., Новиков А.В. Сферы рационального использования судов на воздушной подушке в Волжско-Камском бассейне // Вестник ВГАВТ. 2017. №51. С. 71-76.
6. Кузьмичев И.К., Корнев А.Б., Малышкин А.Г. Задачи научных исследований в области пассажирских перевозок на речном транспорте // Вестник ВГАВТ. 2017. №50. С. 182-190.
7. Веселов Г.В., Иванов М.В., Минеев В.И., Митрошин С.Г. Обоснование целесообразности дотирования высокоскоростных водных пассажирских перевозок в Приволжском федеральном округе // Вестник ВГАВТ. 2018. №55. С. 119-124.

References

1. Hunas L., Bezuglova M.S. (2014). Perspektivy razvitiya al'ternativnyh obshchestvennyh transportnyh sistem, na primere g. Astrahani [Prospects of development of alternative public transport systems, on the example of Astrakhan]. Astrahanskij vestnik ehkologicheskogo obrazovaniya, 3 (29), pp. 82-84.
2. Chuplygin G.N., Matveev YU.I., Efremov S.YU. (2012). K probleme transportnogo obespecheniya Rossii [On the problem of transport support in Russia]. Vestnik AGTU, 1, 147-150.
3. White paper on Efficient and Sustainable Inland Water Transport in Europe. Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport. New York and Geneva, United Nations Economic Commission for Europe, 2011. 74 p.
4. CE Delft, Infras, Fraunhofer ISI (2011). External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008. Delft, CE Delft, November 2011. 163 p.
5. Veselov G.V., Ivanov M.V., Novikov A.V. (2017). Sfery racional'nogo ispol'zovaniya sudov na vozdushnoj podushke v Volzhsko-Kamskom bassejne [Spheres of rational use of hovercraft in the Volga-Kama basin]. Vestnik VGAVT, 51, 71-76.
6. Kuz'michev I.K., Kornev A.B., Malyshkin A.G. (2017). Zadachi nauchnyh issledovanij v oblasti passazhirskih perevozok na rechnom transporte [The tasks of scientific researches in the field of passenger transportations on river transport]. Vestnik VGAVT, 50, 182-190.
7. Veselov G.V., Ivanov M.V., Mineev V.I., Mitroshin S.G. (2018). Obosnovanie celesoobraznosti dotirovaniya vysokoskorostnyh vodnyh passazhirskih perevozok v Privolzhskom federal'nom okruge [Expediency substantiation of subsidizing of the high-speed water passenger transportation in the Privolzhsky federal district].Vestnik VGAVT, 55, 119-124.

УДК 656.072

ОБОСНОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТУРИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ С УЧАСТИЕМ ВНУТРЕННЕГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Ольга Леонидовна Домнина
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru
Михаил Валерьевич Иванов
кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: ivanov@vsawt.com
Сергей Григорьевич Митрошин
кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru
Юрий Николаевич Уртминцев
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой управления транспортом
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru

Аннотация

Одной из важных проблем повышения привлекательности туристических маршрутов является обеспечение доступности и качества транспортной составляющей. Основными приоритетами для туриста являются удобство расписания, стоимость перевозки, время, затраченное на поездку, и качественные характеристики транспортных средств. В связи с этим к важным составляющим туристического маршрута относятся вид или виды транспорта, принимающих участие в перевозке туристов.

Вместе с тем, вопросы, связанные с особенностями организации транспортного обеспечения туристических маршрутов с участием нескольких видов транспорта, в настоящее время проработаны недостаточно. Поэтому целью настоящего исследования является обоснование организации транспортного обеспечения комбинированных туристических маршрутов, в том числе и с участием внутреннего водного транспорта.

Для реализации указанной цели авторами: выполнен анализ динамики въездного туризма; анализ использования различных видов транспорта для туристических перевозок; дана сравнительная характеристика скоростного флота в целях реализации проектов развития туризма; разработан подход к эффективному транспортному обеспечению комбинированных туристических перевозок и выполнена его апробация на конкретном маршруте.

В дальнейшем предполагаются апробация работы модели на примере системы туристических маршрутов с целью выявления зон востребованности перевозок туристов с использованием скоростного флота.

Ключевые слова: туристические комбинированные перевозки; внутренний водный транспорт; перевозки скоростным флотом

JUSTIFICATION OF TRANSPORT SUPPORT OF COMBINED TOURIST ROUTES WITH PARTICIPATION OF INLAND WATER TRANSPORT

Olga L. Domnina
PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru
Mikhail V. Ivanov
Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Economics and Management
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: ivanov@vsawt.com

Sergey G. Mitroshin
Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Economics and Management
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru
Yuri N. Urtmintsev
Dr.Sci.Tech, professor
Head of the Department of Transport Management
Volzhsky State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru

Abstract

One of the important problems of increasing the attractiveness of tourist routes is to ensure the availability and quality of the transport component. The main priorities for the tourist are the convenience of the schedule, the cost of transportation, the time spent on the trip, and the quality characteristics of the vehicles. In this regard, the type or types of transport involved in the transportation of tourists are important components of the tourist route.

Atthe same time, issues related to the peculiarities of the organization of transport support of tourist routes with the participation of several types of transport are currently not sufficiently developed. Therefore, the purpose of this study is to justify the arrangement of transport support for combined tourist routes, including with the participation of inland waterway transport.

To achieve this goal, the authors: performed an analysis of the dynamics of inbound tourism, of the use of various types of transport for tourist traffic; gave a comparative characteristic of the high-speed fleet in order to implement tourism development projects; developed an approach to the effective transport support of combined tourism and its approbation on a specific route is carried out.

In the future, it is assumed that the model will be tested using the example of a tourist route system in order to identify areas where tourist traffic using a high-speed fleet is in demand.

Keywords: tourist combined transport; inland waterway transport; high-speed fleet transportation

Введение

В настоящее время одной из ключевых проблем функционирования транспортных систем как в России, так и за рубежом, является обеспечение доступности и качества транспортных услуг для населения. При этом основными индикаторами доступности транспорта для населения являются стоимость перевозки и время, затраченное на поездку.

Транспортная доступность на региональном уровне определяется состоянием транспортной инфраструктуры. В США и странах Западной Европы наибольшую известность в данном направлении получили работы У.Г. Хансена, А.Г. Уилсона и др. В их работах вводится понятие индикаторов потенциальной доступности, учитывающих различные экономические и поведенческие факторы. Вместе с тем, основным недостатком данных индикаторов является необходимость постоянного уточнения параметров функциональных зависимостей между переменными в представленных формулах и получаемыми результатами [1,2,3,4].

В России вопросам организации пассажирских перевозок и их экономической эффективности посвящены работы таких ученых в области транспорта и логистики, как Г.В. Веселов, С. П. Вакуленко, П. В. Голубев, Д.В. Дрейбанда, Ю. И. Ефименко, Н. П. Терешина, Б. М. Лапидус, Н. А. Журавлева, Г. В. Верховых, А. А. Зайцев, А. Г. Котенко, Е.А. Хохлов и др. Однако специфика организации пассажирских перевозок с участием нескольких видов транспорта, включая водный, в настоящее время проработана недостаточно [5].

Цель исследования: обоснование организации транспортного обеспечения комбинированных туристических маршрутов, в том числе и с участием внутреннего водного транспорта.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ динамики въездного и внутреннего туризма России;
- выполнить анализ использования различных видов транспорта для пассажирских перевозок;
- дать сравнительную характеристику скоростного флота и выбрать наиболее подходящие его виды для реализации проектов развития региональной транспортной системы;
- разработать подход к обоснованию эффективных с точки зрения транспортного обеспечения комбинированных туристических маршрутов;
- апробировать работоспособность предлагаемого подхода на примере конкретной туристической линии.

1. Транспортное обеспечение въездного и внутреннего туризма

Для российской туристической отрасли 2017 год был относительно успешным. Динамика отдельных показателей, характеризующих его развитие, показана в табл. 1. Количество российских туристов, выезжающих за рубеж, увеличилось на 30%. Количество иностранных туристов, приехавших в Россию, в 2017 году также достигло максимума за последние 8 лет и выросло по сравнению с 2016 годом на 16%. Лидерами по въезду стали китайцы (прирост на 24%), немцы и американцы.

Согласно статистическим данным 63% россиян приняли решение отдохнуть в России. Как видно из табл.1, если до 2017 года внутренний туризм рос стремительными темпами (в 2014 году количество туристов, путешествующих по России, выросло на 30%, в 2015 — на 18%, в 2016 — еще на 10%), то в 2017 году была зафиксирована некоторая стабилизация. Внутренний туристический поток остался на уровне 2016 года, хотя по некоторым направлениям он вырос на 5–10% (Приморский край, республики Татарстан, Башкортостан; Ярославская, Астраханская область и др.).

Таблица 1

Динамика отдельных показателей, характеризующих развитие внутреннего и въездного туризма [6]

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Число туристских фирм (на конец года) - всего	9133	10266	10773	11324	11614	11893	12395	13580
Число реализованных населению турпакетов – всего, тыс., в т.ч.	4358	4427	4763	5384	4384	4024	3352	4390
по территории России	872	929	905	969	992	1331	1529	1552
по зарубежным странам	3367	3326	3738	4240	3253	2482	1625	2605
Обслужено российских туристов – всего	8203,9	8023,7	8942,2	9883,0	8487,1	7889,2	6706,3	8915,4
из них по России	1741,0	1731,0	1792,3	1916,4	1974,2	2628,2	3284,2	3285,4
Обслужено иностранных туристов, приехавших в Россию – всего	225,9	263,9	236,8	348,5	291,9	754,8	595,6	594,4

По прогнозу Всемирной организации по туризму Россия имеет потенциал стать лидером в сфере туризма. При организации въездного туризма многие туристические фирмы организуют комбинированные туры. При этом под комбинированными турами в настоящей работе понимаются или путешествия, в которых используются различные виды транспорта или совмещены разные виды отдыха. Как правило, в таких турах у их участников есть несколько целей (например, познавательный или религиозный тур может совмещаться с экологическим и т.д.). Отдельные компании специализируются именно на организации комбинированных туров, поскольку спрос на них только растет [7].

Однако основными факторами, сдерживающими развитие внутреннего и въездного туризма, являются неразвитая туристская инфраструктура и невысокое качество обслуживания туристов. На качество обслуживания туристов среди прочих оказывает существенное влияние транспортное обеспечение перевозок.

Необходимо отметить, что большой объем перевозок туристов на внутреннем рынке обеспечивается автомобильным транспортом [8].

Вместе с тем, рост числа автотранспортных средств, задействованных в перевозках пассажиров, ведёт к высокой загрузке автомобильных дорог и потерям времени пассажиров в «пробках». Рост авиаперевозок в основном связан с полетами за рубеж на дальние расстояния. Внутрироссийские воздушные перевозки менее развиты в силу осуществления большинства полетов через Москву.

Кроме того, в настоящее время транспортные компании работают обособленно, и увязки между рейсами перевозчиков различных видов транспорта нет. Это часто вызывает определенный дискомфорт пассажиров.

Рациональное и гармоничное развитие транспортных систем предполагает использование возможностей всех существующих путей сообщения и видов транспорта, способных функционировать на определенной территории [9,10].

В частности, в советское время для достижения требуемого уровня доступности транспортных услуг для населения широко использовался для перевозки наряду с другими внутренний водный транспорт. По рекам осуществлялись перевозки пассажиров на судах на подводных крыльях («Метеор», «Ракета», «Восход» и др.), так как они развивали скорость от 60 до 120 км/ч и легко могли в навигационный период конкурировать с автомобильным и железнодорожным транспортом. В настоящее время таких судов осталось крайне мало в силу их значительного износа.

Вместе с тем, основными преимуществами работы скоростных судов являются [5,7,11]:

- использование естественных водных путей в качестве транспортных коммуникаций, что позволяет иметь соотношение инвестиций в подвижной состав и инфраструктуру на водном транспорте 3:1, в то время как на железнодорожном транспорте 1:4, автомобильном 1:2;
- низкое энергопотребление;
- возможность организации движения по принципу «без пробок», что позволяет сократить время поездки пассажиров на ряде направлений по сравнению с автоперевозками;
- меньшую протяженность рейсов между пунктами, расположенными на разных берегах водных акваторий, чем по автомобильным дорогам.

Таким образом, существующее на сегодняшний день распределение пассажиропотоков по видам транспорта не обеспечивает эффективное использование ресурсов транспортной отрасли. Чаще всего в ущерб интересам туристов в значительном количестве регионов страны преобладают автомобильные, реже железнодорожные пассажирские сообщения, хотя там имеются системы водных путей, имеющих и судоходную обстановку, и возможности организации альтернативных прямых водных или смешанных пассажирских перевозок с включением скоростного водного транспорта.

3. Сравнительная характеристика скоростного флота России

Для выбора типов скоростных судов с целью преимущественного использования при проектировании транспортной системы, авторами проведен анализ существующих типов судов и выявлены их основные особенности (табл.4).

Таблица 4

Сравнительная характеристика различных видов скоростных судов при эксплуатации на внутренних водных путях

Тип скоростного судна	Наименования скоростных судов	Пассажировместимость, пасс.	Максимальная скорость, км/ч	Преимущества	Недостатки
Суда на подводных крыльях (СПК)	Ракета, Метеор, Восход, Валдай и др.	От 60 до 150	От 60 до 120	Высокая скорость и достаточно большая пассажировместимость	Необходимость в наличии причалов, гарантированных глубин и чистой акватории; невозможность эксплуатации в зимний период
Суда на воздушной подушке (СВП)	Сормович, Ирбис, Орион, Луч, Хивус и др.	От 60 до 150	От 60 до 100	Амфибийность, возможность работы без причальных сооружений на минимальных глубинах, как в летний, так и в зимний период	Высокий уровень шума.
Суда на воздушной каверне (СВК)	Линда, Республика Татарстан и др.	От 16 до 70	55	Малая осадка (до 1 м), возможность работы без причальных сооружений	Невозможность эксплуатации в зимний период
Экранопланы	Волга-2, Аквaглайт и др.	От 4 до 8	От 150 до 160	Амфибийность и высокая скорость, круглогодичная эксплуатация, возможность подхода к необорудованному берегу	Повышенный риск, высокий уровень шума, малая пассажировместимость
Глиссеры	Заря, Лена и др.	От 66 до 100	От 40 до 70	Более простая конструкция, чем СПК или СВП	Большая потребная удельная мощность, создание большой волны, разрушающей берег, возможность нанесения ущерба экологии
Катамараны	А. Угловский, Суперфойл-40, Сочи-2, пр. 23290 и др.	От 150 до 300	От 40 до 100	За счёт высокой скорости и пассажировместимости высокая эффективность.	Опасность нанесения ущерба экологии, возможность эксплуатации только на чистой воде с гарантированными глубинами.

Как видно из табл.4, наибольшую перспективу для использования смешанных перевозок при проектировании транспортных систем имеют суда на подводных крыльях, суда на воздушной подушке и суда на воздушной каверне.

4. Обоснование эффективных с точки зрения транспортного обеспечения комбинированных туристических маршрутов

Предлагаемый авторами подход к обоснованию эффективных с точки зрения транспортного обеспечения туристических маршрутов базируется на модели планирования развития транспортной инфраструктуры территории [3], но в отличие от нее здесь делается акцент на интересы клиентов (пассажиров) путем использования трех критериев:

1.Минимизация транспортных расходов туристов (стоимостный критерий):

$$\sum_{z \in Z} R_z \cdot Y_z \to \min \qquad (1)$$

2.Минимизация временных транспортных затрат туристов (временной критерий):

$$\sum_{z \in Z} H_z \cdot Y_z \to \min \qquad (2)$$

3.Максимизация качественных параметров перевозок туристов (критерий качества транспортных услуг):

$$\sum_{z \in Z} B_z \cdot Y_z \to \max \qquad (3)$$

где z–индекс типа транспорта, $z \epsilon Z$, где Z – множество индексовz;

Y_z–количество рейсов транспортных средств z-го типа (отправлений z-го варианта), требуемых для обеспечения потребностей туристов в транспортном сообщении, единиц;

R_z–стоимость перевозки группы туристов в рамках одного рейса транспортного средства z-го типа (отправления z-го варианта) при нормальной загрузке транспортных средств, участвующих в перевозке, руб.;

H_z–коэффициент срочности доставки туристов рейсом транспортного средства z-го типа (отправлением z-го варианта);

B_z–балльная оценка качества доставки туристов рейсом транспортного средстваz-го типа (отправлением z-го варианта), баллы (определяется экспертным методом).

При введении вышеуказанных условных обозначений была принята следующая их интерпретация.

Коэффициент срочности доставки туристов отражает относительную скорость перемещения пассажиров по транспортной сети. Он рассчитывается как отношение расчетного времени доставки туриста с использованием одного или нескольких видов транспорта к нормативному времени доставки наиболее распространенным видом транспорта – автомобильным (железнодорожным).

Балльная оценка качества доставки определяется экспертным методом на основе качественных характеристик работы конкретного типа транспортного средства с учетом ресурсного, экологического и социального аспектов взаимодействия.

При модальных перевозках качество транспортного обслуживания в целом на линии (B_l) можно определить по формуле:

$$B_l = \sum_{z \in Z_l} B_z \cdot \frac{t_z}{\sum_{z \in Z_l} t_z} \qquad (4)$$

где B_l –балльная оценка качества доставки туристов рейсом транспортного средства z-го типа, и входящим в состав l-ой модальной линии; $z \in Z_l$, где Z_l – подмножество индексов z, соответствующих включению отражающих их видов транспорта в l-ю модальную линию;

t_z – время, затрачиваемое z-м видом транспорта на перевозки в составе l-й модульной линии, сут.

В качестве ограничений (условий достижения оптимумов) приняты следующие:

1. Количество перевезенных туристов на определенном транспортном направлении (туристическом маршруте) должно находиться в диапазоне, обеспечивающем спрос на перевозки.

2. Количество единиц транспортных средств, участвующих в процессе перевозки туристов на определенном транспортном направлении, должно находиться в интервале, соответствующем его наличию без учета и с учетом обоснованных резервов, позволяющих минимизировать время ожидания туристами отправления из конечных и промежуточных пунктов туристического маршрута.

Наличие трех целевых ориентиров-критериев приводит к необходимости решения многокритериальной задачи. Наиболее распространенными способами решения такого рода задач являются метод пороговой оптимизации и метод весовых коэффициентов [12]. Суть метода пороговой оптимизации заключается в определении вариантов решения задачи по оптимуму каждого выбранного критерия с последующей оценкой потерь данного критерия для прочих вариантов. Метод весовых коэффициентов характеризуется предварительной оценкой важности (стоимости) каждого из выбранных критериев с последующей суммой произведений критериев на их вес.

В нашем случае возможно объединение указанных способов решения многокритериальной задачи, что и продемонстрировано далее.

5. Результаты

Работоспособность предложенного подхода к организации транспортного обеспечения туристов была апробирована на примере туристического маршрута «Москва – Нижний Новгород - Казань».

В качестве железнодорожного транспортного средства в расчетах был принят поезд «Стриж», автомобильного рейсовые автобусы, скоростного водного - суда на подводных крыльях типа Метеор, авиационного - ближнемагистральные пассажирские самолёты.

Результаты расчетов представлены в табл.5.

Таблица 5

Результаты расчетов по вариантам комбинированного сообщения

№ п/п	Вариант транспортного обеспечения маршрута		Транспортные расходы 1 пассажира	Затраты времени на движение, час	Совокупный критерий качества
	рейс	вид транспорта			
1	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	5500	12	3
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный			
2	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	4500	11	3
	Нижний Новгород - Казань	водный			
3	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	2600	13,5	1,89
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный			
4	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	5500	7	2,57
	Нижний Новгород - Казань	авиационный			
5	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	1800	16	1,5
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный			
6	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	4700	16,5	2,34
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный			
7	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	3700	15	2,35
	Нижний Новгород - Казань	водный			
8	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	4700	11	2,00
	Нижний Новгород - Казань	авиационный			
9	Москва – Нижний Новгород	авиационный	8000	7	2
	Нижний Новгород - Казань	авиационный			
10	Москва – Нижний Новгород	авиационный	8000	12	2,71
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный			
11	Москва – Нижний Новгород	авиационный			

	Нижний Новгород - Казань	автомобильный	5100	11	2,00
12	Москва – Нижний Новгород	авиационный	7000	11	2,68
	Нижний Новгород - Казань	водный			
13	Москва – Нижний Новгород	водный	8000	34	3
	Нижний Новгород - Казань	водный			
14	Москва – Нижний Новгород	водный	9000	35,5	3
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный			
15	Москва – Нижний Новгород	водный	6100	35	2,66
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный			
16	Москва – Нижний Новгород	водный	9000	30	2,9

Анализ данных табл.6 показал, что минимальные транспортные расходы 1 пассажира на туристическом маршруте составят 1800 рублей, минимальные затраты времени 7 час, а максимальное качество транспортного обеспечения 3 балла. На этом основании можно рассчитать оценку потерь туристов для всех вариантов по каждому критерию как процент ухудшения его значения относительно оптимального (лучшего).

Таблица 6

Расчет весовых коэффициентов

	Транспор-тные расходы	Время в пути	Качество перевозок	∑	Вес
Транспор-тные расходы	1	0	2	3	0,333
Время в пути	2	1	1	4	0,444
Качество перевозок	0	1	1	2	0,222

Далее формируется балльная оценка весов. Здесь авторами был использован метод парных сравнений с привлечением в качестве экспертов как туристические компании, так и непосредственно самих туристов. В табл.6 приведен пример расчета весовых коэффициентов, где в качестве экспертов выступили авторы статьи.

На основании описанного выше подхода была сформирована итоговая табл.7, где приведены комплексные оценки каждого из 16 вариантов транспортного обеспечения комбинированного туристического маршрута Москва - Нижний Новгород - Казань. Из таблицы видно, что наиболее эффективным с позиции трех критериев и их весовых оценок является перевозка туристов из Москвы в Нижний Новгород железнодорожным транспортом. При этом из Нижнего Новгорода в Казань наиболее предпочтительными вариантами являются перевозка авиационным, автомобильным и водным видами транспорта. Поскольку различия в значении интегрального показателя между этими тремя вариантами несущественны, то целесообразно рассматривать их как взаимодополняемые при решении задачи перевозок пассажиров в рамках туристических маршрутов.

Таблица 7

Результаты расчетов по вариантам комбинированных перевозок

№ п/п	Вариант транспортного обеспечения маршрута		Процент потерь значений критерия			Интегральный показатель потерь
	рейс	вид транспорта	Транспортные расходы	Время в пути	Качество перевозок	
1	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	205,6	71,43	0	100,3
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный				
2	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	150,0	57,14	0	75,4
	Нижний Новгород - Казань	водный				
3	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	44,4	92,86	74	72,5
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный				
4	Москва – Нижний Новгород	железнодорожный	205,6	0	28,57	74,9
	Нижний Новгород - Казань	авиационный				
5	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	0,0	128,6	100	79,4
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный				
6	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	161,1	135,7	43,75	123,7
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный				
7	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	105,6	114,3	43,33	95,6
	Нижний Новгород - Казань	водный				
8	Москва – Нижний Новгород	автомобильный	161,1	57,14	66,67	93,9
	Нижний Новгород - Казань	авиационный				
9	Москва – Нижний Новгород	авиационный	344,4	0	66,67	129,6
	Нижний Новгород - Казань	авиационный				
10	Москва – Нижний Новгород	авиационный	344,4	71,43	19,44	150,9
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный				
11	Москва – Нижний Новгород	авиационный	183,3	57,14	66,67	101,3
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный				
12	Москва – Нижний Новгород	авиационный	288,9	57,14	21,21	126,4
	Нижний Новгород - Казань	водный				
13	Москва – Нижний Новгород	водный	344,4	385,7	0	286,2
	Нижний Новгород - Казань	водный				

14	Москва – Нижний Новгород	водный	400,0	407,1	0	314,3
	Нижний Новгород - Казань	железнодорожный				
15	Москва – Нижний Новгород	водный	238,9	400	22,86	262,5
	Нижний Новгород - Казань	автомобильный				
16	Москва – Нижний Новгород	водный	400,0	328,6	6,667	280,8
	Нижний Новгород - Казань	авиационный				

Очевидно, что итоговый результат расчетов связан как с особенностями каждого из рассмотренных видов транспорта, так и с позицией экспертов. Вместе с тем, предлагаемый подход позволяет адекватно оценить транспортное обеспечение туризма, в том числе и с использованием скоростного водного транспорта.

Заключение

Таким образом, в данной работе авторами на основе анализа опыта использования различных видов транспорта при перевозке пассажиров был предложен подход к транспортному обеспечению комбинированного туристического маршрута. Работоспособность подхода была апробирована на туристическом маршруте Москва-Нижний Новгород-Казань.

Своими дальнейшими задачами мы видим:

- апробирование подхода на примере системы туристических маршрутов макрорегиона (например, ПФО);

выявление зон востребованности организации туристических перевозок скоростным флотом.

Литература

1. Schurmann C., Spiekermann K., Wegener M. Accessibility Indicators. Deliverable D5 of Project Socio-Economic and Spatial Impacts of Transport Infrastructure Investments and Transport System Improvements (SASI) commissioned by the General Directorate VII (Transport) of the European Commission as part of the 4th Framework Programme of Research and Technology Development / The Institute of Spatial Planning of the University of Dortmund, 1997, 102 p.
2. Wilson A.G. The use of entropy maximizing models in the theory of trip distribution, mode split and route split. Journal of Transport Economics and Policy, January 1969, p. 108–126
3. Hansen W.G. How accessibility shapes land use//Journal of American institute of planners. -1959. -Vol.35. -No.2. -pp. 10-44.
4. Wegener M. SASI Model Description//Spiekermann & Wegener Urban and Regional Research, Dortmund, 2008. -49 p.
5. . Иванов М.В. Развитие транспортной инфраструктуры региона: факторы, направления, инструментарий оценки. Автореферат дис. ... кандидата экономических наук. Воронеж, 2016. http://www.science.vsu.ru/disser
6. Данные Росстата. Розничная торговля, услуги населению, туризм. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/retail/#
7. Домнина О.Л. Варианты использования судов и объектов водного транспорта для развития туристического потенциала нижегородской области. В сборнике: Великие реки'2014 Труды конгресса 16-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2014. С. 322-325
8. Данные Росстата. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport/#
9. Ruske K.-D., Kauschke P., Reuter J., von der Gracht H., Gnatzy T., Darkow I.-L. Transportation & Logistics 2030, Volume 2: Transport infrastructure -Engine or hand brake for global supply chains?//PricewaterhouseCoopers, 2010 -URL: https://www.pwc.com/gx/en/transportation-logistics/tl2030/infrastructure/pdf/tl2030_v2_transport-infrastructure.pdf
10. Smith J., Clayton E., Hanson D. Building sustainable, inclusive transportation systems: A framework for the future//PricewaterhouseCoopers, 2017 -URL: https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-building-sustainable-inclusive-transportation-systems.pdf
11. Веселов Г.В., Иванов М.В., Минеев В.И., Митрошин С.Г. Обоснование целесообразности дотирования высокоскоростных водных пассажирских перевозок в Приволжском федеральном округе// Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018.- №55. – с.119-124
12. Трояновский В.М. Математическое моделирование в менеджменте. Учебное пособие. - М.: Русская Деловая Литература, 2007. 240с.

References

1. Schurmann C., Spiekermann K., Wegener M. Accessibility Indicators. Deliverable D5 of Project Socio-Economic and Spatial Impacts of Transport Infrastructure Investments and Transport System Improvements (SASI) commissioned by the General Directorate VII (Transport) of the European Commission as part of the 4th Framework Programme of Research and Technology Development / The Institute of Spatial Planning of the University of Dortmund, 1997, 102 p.
2. Wilson A.G. The use of entropy maximizing models in the theory of trip distribution, mode split and route split. Journal of Transport Economics and Policy, January 1969, p. 108–126
3. Hansen W.G. How accessibility shapes land use//Journal of American institute of planners. -1959. -Vol.35. -No.2. -pp. 10-44.
4. Wegener M. SASI Model Description//Spiekermann & Wegener Urban and Regional Research, Dortmund, 2008. -49 p.
5. . Ivanov M.V. Razvitie transportnoy infrastruktury regiona: faktory, napravleniya, instrumentariy otsenki. Avtoreferat dis. ... kandidata ekonomicheskikh nauk. Voronezh, 2016. http://www.science.vsu.ru/disser

6. Dannye Rosstata. Roznichnaya torgovlya, uslugi naseleniyu, turizm. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/retail/#
7. Domnina O.L. Varianty ispol'zovaniya sudov i ob''ektov vodnogo transporta dlya razvitiya turisticheskogo potentsiala nizhegorodskoy oblasti. V sbornike: Velikie reki'2014 Trudy kongressa 16-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3-kh tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. 2014. p. 322-325
8. Dannye Rosstata. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport/#
9. Ruske K.-D., Kauschke P., Reuter J., von der Gracht H., Gnatzy T., Darkow I.-L. Transportation & Logistics 2030, Volume 2: Transport infrastructure -Engine or hand brake for global supply chains?//PricewaterhouseCoopers, 2010 -URL: https://www.pwc.com/gx/en/transportation-logistics/tl2030/infrastructure/pdf/tl2030_v2_transport-infrastructure.pdf
10. Smith J., Clayton E., Hanson D. Building sustainable, inclusive transportation systems: A framework for the future//PricewaterhouseCoopers, 2017 -URL: https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-building-sustainable-inclusive-transportation-systems.pdf
11. Veselov G.V., Ivanov M.V., Mineev V.I., Mitroshin S.G. Obosnovanie tselesoobraznosti dotirovaniya vysokoskorostnykh vodnykh passazhirskikh perevozok v Privolzhskom federal'nom okruge// Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2018.- №55. – pp.119-124
12. Troyanovskiy V.M. Matematicheskoe modelirovanie v menedzhmente. Uchebnoe posobie. - M.: Russkaya Delovaya Literatura, 2007. 240p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 681.518

МОДЕЛЬ КЛАСТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ В КАНОНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

Василий Николаевич Захаров
профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vgavt@vgavt-nn.ru
Игорь Константинович Кузьмичев
профессор, доктор технических наук, ректор
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: rektor@vgavt-nn.ru
Михаил Борисович Резников
аспирант кафедры Информатики, систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: mikerez@mail.ru
Юрий Семёнович Федосенко
профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой Информатики, систем управления и телекоммуникаций
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: fds@vgavt-nn.ru

Аннотация

Для канонической задачи диспетчеризации однопроцессорного обслуживания потока объектов исследуется эффективность кластерной реализации решающего алгоритма, сконструированного на основе концепции дискретного динамического программирования. Основная идея предлагаемой вычислительной модели заключается в способе балансировки загрузки узлов кластера путем параллельного выполнения упреждающей передачи наследуемой информации. Как подтвердили вычислительные эксперименты, такой подход позволяет существенно снизить временные задержки при обмене данными между узлами и повысить размерность задач, решаемых за приемлемое время. Описываемый способ балансировки реализован в вычислительной модели офисной сети и отработан на задачах синтеза расписаний подачи потока речных грузовых судов и составов, поступающих под погрузку к выделенному терминалу в пиковые периоды Северного завоза.

При масштабировании предлагаемой вычислительной модели на облачную среду для решения задач диспетчеризации существенно большой размерности возможно использование виртуальных инфраструктур известных коммерческих платформ.

Ключевые слова: задача диспетчеризации, вычислительный кластер, дискретное динамическое программирование, расписание обслуживания, балансировка загрузки узлов.

MODEL OF CLUSTER IMPLEMENTATION OF THE SYNTHESIS OF OPTIMAL SCHEDULE ALGORITHM IN CANONICAL PROBLEM OF DISPATCHING

Vasily N. Zakharov
Professor, Dr.Sci.Tech, Chief Researcher
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vgavt@vgavt-nn.ru
Igor K. Kuzmichev
Professor, Dr.Sci.Tech, Head of University
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: rektor@vgavt-nn.ru

Mikhail B. Reznikov
Postgraduate Student, Department of Computer Science, Control Systems and Telecommunications
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: mikerez@mail.ru
Yury S. Fedosenko
Professor, Dr.Sci.Tech, Head of the Department of Informatics, Control Systems and Telecommunications
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: fds@vgavt-nn.ru

Abstract

For the canonical dispatching problem of uniprocess servicing of the object flow, the efficiency of cluster implementation of the solving algorithm designed on the basis of the concept of discrete dynamic programming is investigated. The main idea of the proposed computational model is the method of balancing the load of cluster nodes by parallel execution of forward looking transmission of inherited information. As confirmed by computational experiments, this approach can significantly reduce the time delays in the exchange of data between nodes and increase the scale of problems solved in a reasonable time. The described method of balancing is implemented in the computational model of the office network and proven on the tasks of synthesizing schedules for the supply of the flow of river cargo ships and trains arriving at the dedicated terminal for stowing during the peak periods of deliveries of goods to the Northern Territories.

When scaling the proposed computational model onto the cloud environment, it is possible to use virtual infrastructures of well-known commercial platforms for solving dispatching tasks of substantially higher scale.

Keywords: dispatching task, computing cluster, discrete dynamic programming, service schedule, node load balancing.

Введение

Рассматривается детерминированный поток Z независимых объектов $z_1, z_2, \ldots, z_n$. Каждый объект z_i ($i = \overline{1,n}$) подлежит однофазному обслуживанию без прерываний стационарным процессором P и характеризуется следующими целочисленными параметрами:

t_i – момент готовности к обслуживанию,

τ_i – продолжительность обслуживания,

a_i – величина штрафа за единицу времени пребывания в системе обслуживания.

Объекты пронумерованы в порядке их поступления, т.е. $0 \le t_1 \le \ldots t_i \ldots \le t_n$.

Считается, что процессор P не может обслуживать более одного объекта одновременно и обслуживание каждого объекта осуществляется без прерываний. В начальный момент времени $t = 0$ процессор P свободен и находится в состоянии готовности к выполнению обслуживания объектов потока Z.

Обслуживание объекта z_i может быть начато свободным процессором P в любой момент времени t ($t \ge t_i$), $i = \overline{1,n}$.

Расписание p обслуживания процессором P потока Z отождествляется с перестановкой

$$(p(1), p(2), \ldots, p(k), \ldots, p(n))$$

множества индексов объектов и считается компактным, т.е. момент t'_k начала обслуживания очередного объекта $z_{p(k)}$ ($k = \overline{1,n}$) определяется соотношениями

$t'_1 = t_{p(1)}$; $t'_k = \max\{t'_{k-1} + \tau_{p(k-1)}, t_{p(k)}\}$, $k = 2, 3, \ldots, n$.

Момент t'_n завершения обслуживания потока Z это момент завершения обслуживания объекта $z_{p(n)}$.

Каноническая задача диспетчеризации заключается в построении расписания p^*, обеспечивающего минимизацию суммарного штрафа по всем объектам потока Z, т.е.

$$W(p) = \sum_{k=1}^{n} a_{p(k)}(t'_i - t_{p(k)}) \to min.$$

На содержательном уровне данная оптимизационная задача иллюстрирует, в частности, цель оперативного планирования подачи поступающих порожних судов под погрузку к выделенному терминалу [1, 2] и заключается в определении оптимальной очередности грузовой обработки судов с учетом прогноза моментов готовности каждого из них к такому обслуживанию.

Точное решение данной задачи в общем случае может быть получено методом динамического программирования в его дискретной версии [3. 4].

Вместе с тем, *NP*-трудность данной задачи [5, 6] ограничивает на практике возможность построения оптимального расписания p^* за приемлемое время вследствие экспоненциальной зависимости продолжительности синтеза от размерности потока Z. Именно такие, достаточно типичные эксплуатационные ситуации возникают в пиковые периоды Северного завоза [7], когда размерность потока Z достаточно велика и, соответственно, для построения p^* требуется промежуток компьютерного времени, недопустимый по условиям конкретного регламента оперативного планирования.

Перспективным представляется подход к решению описанной проблемы путем кластерной реализации синтезирующего расписание p^* алгоритма дискретного динамического программирования, в том числе на высокопроизводительной облачной инфраструктуре [8].

При этом следует иметь в виду, что такой подход предполагает реализацию синтеза расписания p^* посредством построения таблиц частных решений подзадач и, как следствие, весьма требователен к объему и скорости работы оперативной памяти (ОП).

Соответственно эффективность кластерной реализации алгоритма синтеза расписания p^* непосредственно зависит от воспроизводимой модели вычислений, т.е. от принципов распределения задач между узлами кластера, протоколов обмена данными между ними и схемы формирования конечного результата.

Ниже в статье описывается модель кластерной реализации алгоритма синтеза расписания p^* и приводятся результаты его экспериментального исследования на практически значимых наборах значений параметров t_i, τ_i, a_i.

В следующем за введением разделе 1 дается описание иерархии состояний и вычислительной модели синтеза оптимального расписания p^* на основе формализма динамического программирования.

В разделе 2 излагаются подходы к балансировке подзадач и распределению нагрузки на инфраструктуре кластера.

Раздел 3 посвящен представлению результатов вычислительных экспериментов в локальной сети ЭВМ и ограниченной облачной инфраструктуре Amazon.com [9].

В Заключении статьи обсуждаются результаты проведенного исследования и возможное развитие предложенного подхода для решения задач диспетчеризации.

1. Иерархия состояний, вычислительная модель

Пусть $W_k^{min}(t, S)$ – минимальная величина суммарного штрафа за обслуживание потока Z процессором P, освободившимся в момент времени t по завершению обслуживания объекта с индексом $p(k)$ и подмножества объектов S ($S \in Z$).

В принятых выше обозначениях рекуррентные соотношения динамического программирования имеют вид

$$W_k^{min}(t,S) =$$

$$\min_{\substack{i=\overline{1..n} \\ z_i \notin S \\ t'=\max(t,t_i)}} (W_{k+1}^{min}(t'+\tau_i, S \cup z_i) + a_i(t'-t_i)),$$

$$W_n^{min}(t,S) = 0.$$

Решение задачи синтеза p^* будет получено на этапе $W^{min} = W_0^{min}(0, \varnothing)$ как результат вычисления значений $W_k^{min}(t, S)$ при изменении k от n до 0. Выражение (t, S) называем состоянием системы обслуживания; пример иерархии состояний приведен на рис. 1.

Значения $W_k^{min}(t, S)$ для каждого уникального состояния системы обслуживания должны быть рассчитаны только один раз и сохранены в ОП для последующего использования; переменная t считается принимающей дискретные значения на временном интервале $[1, T]$, где T — левая граница временного горизонта планирования.

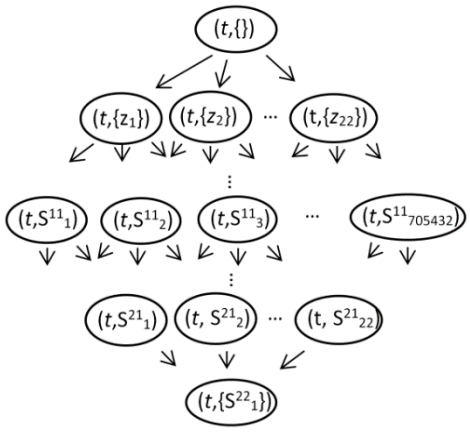


Рис 1. Иерархия состояний системы обслуживания для n = 22.

Под вычислительной моделью подразумевается совокупность локальных вычислительных задач (процедур) с указанием принадлежности к узлам кластера, а также протоколы их взаимодействия, обеспечивающие в конечном итоге синтез p^*.

Процесс построения расписания p^* на основе концепции динамического программирования заключается в последовательном вычислении значений функции минимально возможного штрафа для всех состояний (t, S). Поэтому будем описывать совокупность вычислительных задач как множество φ_i, $i = \overline{1,M}$ состояний системы, требующих расчета. В качестве первого шага разделим данное множество на подмножества, назначаемые для обработки соответственно на узлах $U_1, U_2, \ldots, U_M$ (рис. 2). При этом каждому узлу для расчетов требуются некоторые результаты вычислений, полученные ранее на других узлах кластера (рис. 1). Число зависимостей, между состояниями системы обслуживания, назначенными на разные узлы кластера, определяет интенсивность взаимодействия узлов и, как следствие, величину нагрузки на сетевую инфраструктуру. Следовательно, эффективность алгоритма, построенного по предлагаемой вычислительной модели, будет зависеть от рассматриваемых в следующем разделе особенностей распределения состояний (t, S) по совокупностям $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_M$.

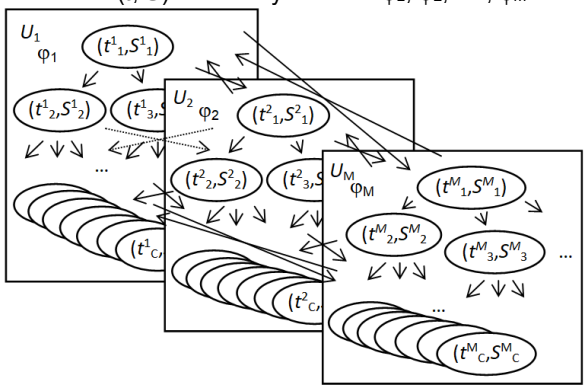


Рис. 2. Распределение задач по вычислительным узлам.

2. Балансировка задач и распределение нагрузки по инфраструктуре

Для моделирования параллельных вычислений будем использовать структуру типа «операции-операнды» [10], причем операнды могут принадлежать любому узлу кластера, а операции – суть зависимости между этими состояниями.

Поскольку конструируемый алгоритм состоит из последовательного определения минимального значения функции штрафа для каждого уникального состояния системы, вычислительной операцией будем считать расчет W_k^{min} для одного из состояний (t, S) системы, а операндами – ранее найденные значения W_k^{min}, хранящиеся в ОП.

Как видно из приведенного на рис. 3 примера, распределение связей между узлами кластера зависит от того, какие конкретно состояния системы обслуживания назначены для расчета на конкретные узлы. От числа связей зависит интенсивность взаимодействия между узлами. В случае высокой интенсивности взаимодействия, несимметричность распределения связей приведет к простою узлов кластера и снижению эффективности работы алгоритма.

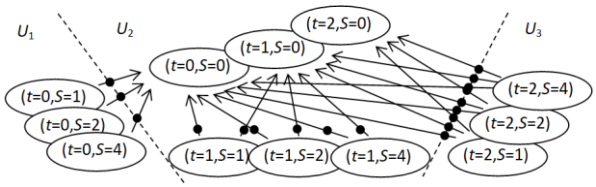


Рис. 3. Структура «операции-операнды» для n = 3, T = 3, финальный шаг алгоритма, неравномерная балансировка связей по 3 узлам кластера.

С цель балансировки состояний (t, S) по совокупностям $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_M$ примем к рассмотрению все возможные значения переменной S, описывающей набор объектов, обслуживание которых завершено к моменту времени t; число таких возможных значений на уровне k иерархии состояний системы равно C_n^k.

Далее, упорядочим все возможные значения S, используя формулу

$$j(S) = \sum_{p=1}^{k} C_k^p,$$

где $j(S)$ – порядковый номер перестановки, $0 \le j(S) \le C_n^k$.

При использовании для определения номера узла r формулы $r = j(S) \bmod M$, где mod — операция взятия модуля M, такая нумерация позволяет разделить множество состояний (t, S) на равные части, а также реализует симметричное распределение взаимосвязей между узлами кластера и, как следствие, обеспечивает симметричную балансировку нагрузки по сетевой инфраструктуре (рис. 4).

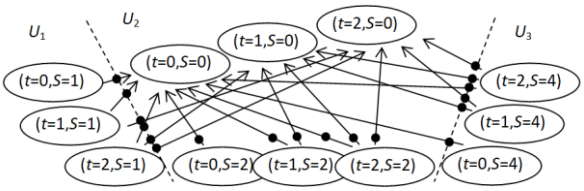


Рис. 4. Структура «операции-операнды» для n = 3, T = 3, финальный шаг алгоритма, равномерная балансировка связей по 3 узлам кластера.

3. Результаты вычислительных экспериментов

3.1. Эксперименты проводились на кластере из восьми идентичных ПК с характеристиками:
Intel x86 1.5GHz CPU /2GB RAM / Windows 2008, MPICH2 / C++ / Ethernet 1Gb/s.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости продолжительностей синтеза p^* при $T = 28$ для $n = 20$ (в секундах) и $n = 26$ (в минутах) от числа задействованных в кластере ПК.

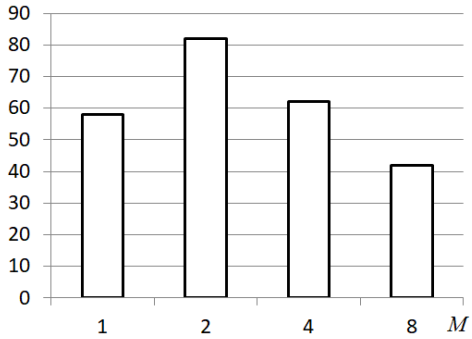


Рис. 5. n = 20.

Как видно из графиков, удалось достичь сокращения продолжительности синтеза расписания p^* более чем на два порядка.

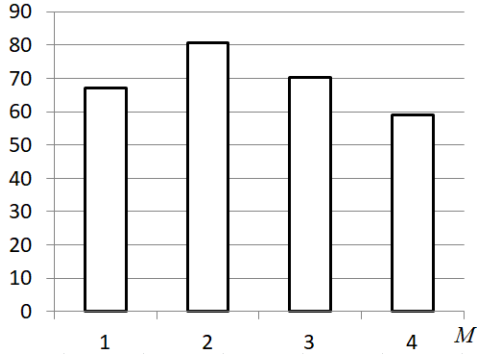


Рис. 6. n = 26.

3.2. На инфраструктуре Amazon.com эксперименты производились с использованием виртуальных машин веб-сервиса EC2 типа t2.medium, работающих на платформе Intel Xeon® Platinum 8175 / 2,5 GHz с двумя виртуальными ядрами и оперативной памятью объемом 4 Gb.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости продолжительностей синтеза p^* при $T = 28$ для $n = 20$ (в секундах) и $n = 26$ (в минутах) от числа задействованных в кластере ПК.

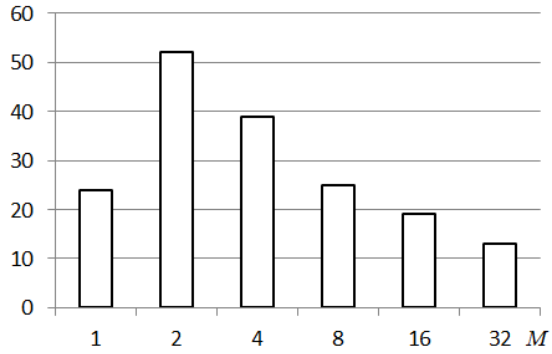


Рис. 7. n = 20.

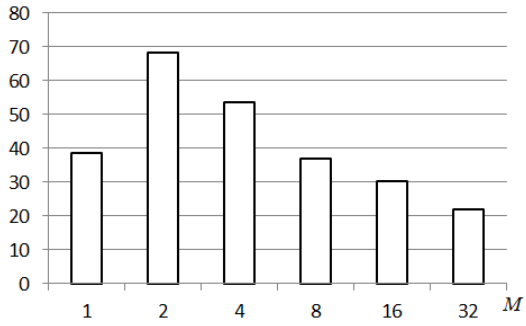


Рис. 8. n = 26.

На рис. 9 представлен объем (Gb) суммарно используемой оперативной памяти в зависимости от размерности задачи.

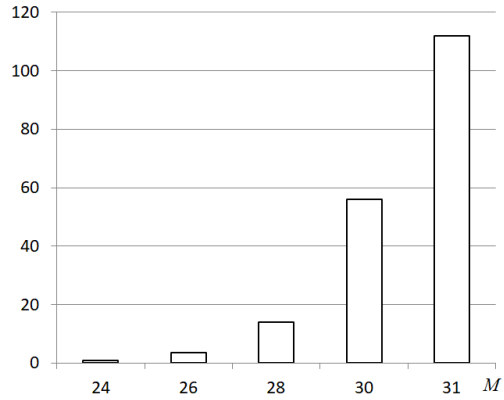


Рис. 9. Объем используемой ОП в зависимости от размерности задачи.

Как следует из приведенных на рис. 7, 8, 9 диаграмм, по мере увеличения количества узлов в облачном кластере продолжительность синтеза оптимального расписания сокращается по закону, близкого к линейному, а объем используемой ОП растет экспоненциально.

Заключение

В результате исследования и проведенных экспериментов установлена возможность кластерной реализации алгоритма дискретного динамического программирования для синтеза оптимальных решений канонической задачи диспетчеризации.

Построенная вычислительная модель, позволяет существенно сократить продолжительность синтеза оптимального расписания, расширить доступный алгоритму объем ОП и, как следствие, увеличить размерность решаемых задач.

Развивающиеся в настоящее время технологии облачных инфраструктур и предоставляемые ими услуги предоставляют возможность без существенных ограничений оперативно увеличивать количество активируемых узлов и объем ОП для решения вычислительно трудных прикладных задач дискретной оптимизации.

Литература

1. Савин В.И. Математические методы оптимального планирования работы флота и портов. М. Транспорт. 1969. 168 с.
2. Захаров В.Н., В. М. Федюшин. Автоматизация оперативного управления работой флота в речных пароходствах. Н.Новгород. ВГАВТ 1991. 174 с.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. Наука. 1965. 457 с.
4. Коган Д.И., Федосенко Ю.С. Задача диспетчеризации: анализ вычислительной сложности и полиномиально разрешимые подклассы. Дискретная математика. Т. 8. № 3. С. 135-147.
5. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М. Мир. 1982. 416 с.
6. Kogan D.I., Fedosenko A.Yu. The discretization problem: analysis of computational complexity, and polynomially solvable subclasses // Discrete Mathematics and Applications. 1996. Т. 6. № 5. P. 435-447.
7. Северный завоз. Материал из Википедии — свободной энциклопедии. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Северный_завоз (дата обращения: 22.10.2018).
8. Инфраструктура как услуга / Материал из Википедии — свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0_%D0%BA%D0%B0%D0%BA_%D1%83%D1%81%D0%BB%D1%83%D0%B3%D0%B (дата обращения: 22.10.2018).
9. Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2). URL: https://aws.amazon.com/ru/ec2/Inc. (дата обращения: 22.10.2018).
10. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. Н.Новгород. ННГУ. 2003. 84 с.

References

1. Savin V.I. Matematiheskie metodi optimalnogo planirovaniya raboti flota I portov. M. Transport. 1969. 168 s.
2. Zaharov V.N., Fedyshin V.M. Avtomatizaciya optimalnogo upravleniya rabotoy flota v rechnyh parohodstvah. N.Novgorod, 1991. 174 s.
3. Bellman R.E., Dreyfus S.E. Applied Dynamic Programming. Princeton New Jersey. 1962. Princeton University Press. 1962. 457 s.
4. Kogan D.I., Fedosenko Yu.S. Zadacha dispetcherizacii: analiz vichislitelnoy slojnosti I polinomialno razreshimye podklassi // Diskretnaya matematika. 1996. T. 8. № 3. S. 135-147.
5. Garey M.R., Johnson D.S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness, W.H. Freeman & Co. 1979. 416 s.
6. Kogan D.I., Fedosenko A.Yu. The discretization problem: analysis of computational complexity and polynomially solvable subclasses. Discrete Mathematics and Applications. 1996. T. 6. № 5. P. 435-447.
7. Severniy zavoz / Material iz Vikipedii — svobodnoj ehnciklopedii. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Северный_завоз (data obrashhenija: 22.10.2018).
8. Infrastructure-as-a-Service / Material iz Vikipedii — svobodnoj ehnciklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0_%D0%BA%D0%B0%D0%BA_%D1%83%D1%81%D0%BB%D1%83%D0%B3%D0%B (data obrashhenija: 22.10.2018).
9. Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2). URL: https://aws.amazon.com/ru/ec2/Inc. (data obrashhenija: 22.10.2018).
10. Gergel V.P., Strongin R.G. Basics of parallel computing for multiprocessor computing systems. N.Novgorod. UNN. 2003. 84 s.

УДК 629.5.072

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СРЕДЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ

Александр Алексеевич Антонов
Аспирант кафедры «Теория и устройство судна»
Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353900 г. Новороссийск, пр.Ленина,93
e-mail: antonov.alex94@yandex.ru
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
Сергей Иванович Биденко
Доктор технических наук, профессор, проректор,
Тверской государственный университет,
170100, Тверская область, г. Тверь, ул. Желябова, д.33
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Аннотация

Данная работа относится к области автоматизации судовождения и беспилотной навигации. В статье авторы рассматривают кластеризацию и интеллектуальную обработку морской навигационной карты с возможностью дальнейшего использования ее для ведения автоматической предварительной прокладки. Алгоритм кластеризации, описанный в этой статье, производит разделение морской навигационной карты на нечеткие кластеры согласно суммарной оценке параметров в каждой области карты.

Полученную прокластеризованную карту авторы предлагают использовать в системе поддержки принятия решения для выполнения предварительной прокладки маршрута судна, основанную на разработанном математическом алгоритме, оценивающем суммарный вес интересующих факторов. В качестве проверки верности и работоспособности алгоритма авторы внедрили его в тестовую компьютерную программу и выполнили с помощью нее несколько различных вариантов прокладки. Результаты также проверены относительно предварительной прокладки, выполненной человеком.

Ключевые слова: автоматизация судовождения, Е-Навигация, кластеризация, интеллектуальные технологии, анализ, прокладка пути судна.

CLUSTERING OF ENVIRONMENT INTHE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE PRELIMINARY PLOTTING

Alexander Antonov
Post-graduate student of the Department "Theory and Structure of the Ship"
Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,
Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93,
e-mail: antonov.alex94@yandex.ru
Dmitry 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
Sergey I. Bidenko,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice Rector,
Tver State University,
Russia, Tver, 33, Zhelyabova st.
e-mail: zur_mga@nsma.ru

Abstract

This paper is related to the field of autonomous and unmanned navigation. In the article, the authors review clustering and intelligent processing of the marine navigational chart with its further use for conducting automatic preliminary plotting. The clustering algorithm described in this article does the splitting of the marine navigational chart into fuzzy clusters according to summed estimation of the parameters in each area of the chart.

The authors propose to use the obtained clustered chart in the decision support system to perform a preliminary route plotting of the vessel, based on the developed mathematical algorithm that evaluates the total weight of the factors of interest. To test of the correctness and operability of the algorithm, the authors introduced it into a test computer program and performed several different plottings of course with it. Results were also validated versus human-made preliminary vessel course plotting.

Key words: ship's automation, E-Navigation, clustering, intelligent technologies, analysis, plotting of the ship's route.

Introduction

In the process of implementation of the E-Navigation concept [1], declared by the International Maritime Organization, a number of problems called «E-Navigation problems» was raised. Within the framework of this concept, the main functions of human navigator must be transferred to automatic computing systems and decision support systems, but the navigator is assigned to supervise [1].

The process of performing the preliminary course plotting still causes disagreement and is often performed manually. Such approach sometimes leads to errors in the process of performing the preliminary course plotting, which, in its turn, can lead to a ship accident.

The task of automatic preliminary plotting on an electronic chart is reduced to constructing a convenient and safe route from one point to another. To solve that, it is suggested to use a specially developed mathematical path-finding algorithm that works on a chart divided into many cells that have some values of the total potential of the hazard, as in work [2]. The required coefficient is a generalized measure from many parameters describing a certain position on the chart. After processing the chart with the method given below, a matrix of coefficients are obtained, which will then be used to construct safe routes in the automatic mode.

1. Chart preparation

It is assumed that the method processes the field, received from an electronic navigation chart and divided into a set of discrete square cells. All cells of the field are divided into subsets: "passable" and "impassable", in accordance with the specified parameters (the draft of the vessel, the speed of movement, the diameter of the circulation, etc.). Schematically, the working field of the algorithm is shown in Figure 1. In this work authors considers only vessel's draft as a rated parameter on chart, thus, each cell contains information about the depth at a given point of the chart.

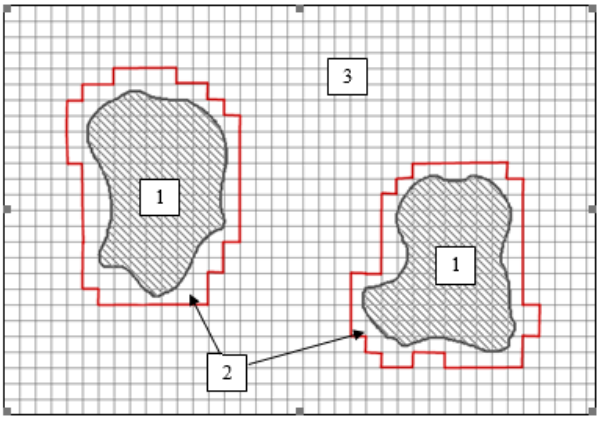


Fig.1 - Schematic representation of the working field: 1 - navigational hazards, 2 - the corresponding cells of the field, assigned the value "1", 3 - empty cells corresponding to cells with a value of "0".

Comparing this depth with the maximum draft of the vessel, the algorithm identifies areas of the chart that are absolutely impassable for the vessel (areas where the depth is less than the draft) and represent the chart as a matrix of zeros and ones, in which 0 is absolute safety and 1 is absolute danger [2].

Using an own path search algorithm, based on the algorithm "A-Star" with the addition of post-processing [2,6], a "rough" route for vessel is found and on the resulting matrix of zeros and ones as mentioned above. General courses received in this step will be later applied to select the coefficient by the direction. An example of a "rough" route is below:

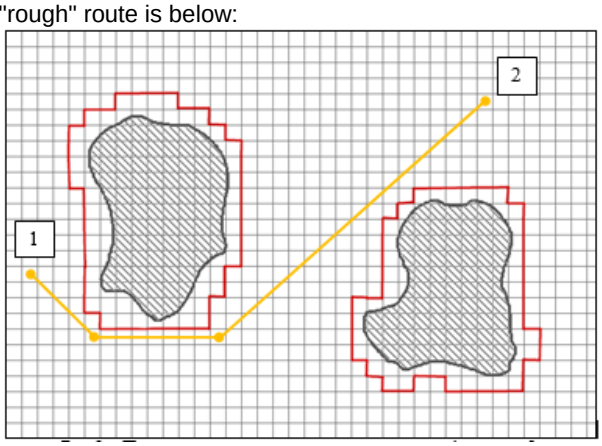


Fig.2 - Example of a "rough" route from point 1 to point 2.

2. Clustering

In the next step, the cells that received the value "0" are processed in accordance with their parameters of unlimited quantity. Main parameters taken into account in the framework of this paper are the distance from danger and the direction of movement. Cells near unacceptable parameter values are assigned the coefficients of the total potential in the interval {0; 1}. This clustering is performed iteratively.

To estimate danger factors, a number of measures were considered earlier[3]. Two ways of applying measurement to factors are suggested. If parameter is considered dangerous only if is too low or too high, then the measure is Minkovsky distance[4].

However, if a parameter is limited both by high and low values, then another way is suggested:

$$D_s(x) = [K\left(\frac{x-\mu_-}{\mu_+-x}+\frac{\mu_+-x}{x-\mu_-}\right)]^{-T} \quad (1)$$

D_s (x) is the distance to danger.
T is a measure defines the steepness of a criteria.
μ- ,μ+ are the extreme values of the parameter
K is the empirical coefficient.

However, a survival function concept [3] could be added, when enough experience is thought to be acquired, or when decision support system creators deem it necessary to make corrections of system's behavior. For example, it may work as follows [3, 5]. It may be taken, that navigator, if he is making the right decision, is out of danger. But, if he makes wrong actions from time to time, then it is wise to estimate where can he get the vessel. Then

$$S(x,t) = N\sum_{n}^{i=1} r_i(t) \quad (2)$$

where t indicates the depth of search, r – quantity of times the navigator get through the cell, N –normalizing coefficient.

However, if in depth research of this matter is considered out of one's reach, a simple way may be suggested. The graph of the function $S(t)^M$ can be believed[7] to have the form similar to the graph of the sigmoid function (if a distance is measured):

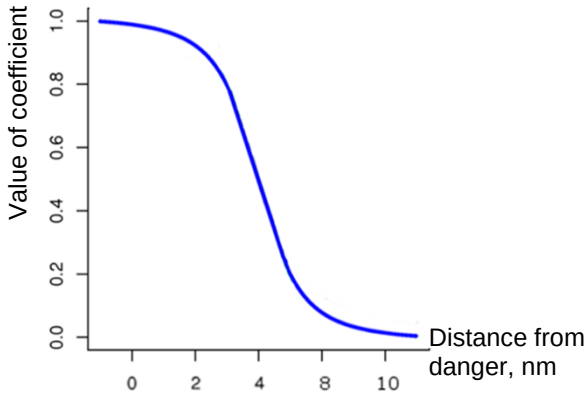


Fig.3 - Graph of the survival function S (t).

Thus, at a sufficient distance from the hazard, the coefficients will be small and their values will vary slightly. As the hazard gets closer, the coefficients begin to increase rapidly, which makes it easy to identify the presence of a hazard and issue an appropriate warning. In the immediate vicinity of the hazard, the coefficients will be large enough to isolate its outline at some distance.

The parameter M shows the steepness of the survival function. The authors of the article consider the value in the range {2,4} to be the most suitable.

The probability of an accident for a ship at the same distance from the danger may be different, depending on whether the ship approaches the danger or moves away from it. A function that takes into account the direction of motion at the current point will be called the risk function and denoted by $\gamma(t)$.

$$\gamma(t) = 0{,}1 + 0{,}9\sin(\left|\frac{\alpha}{2}\right| + \frac{\pi}{2}) \quad (3),$$

where α is course angle of estimated cell

The minimum value will be obtained when moving strait away from the hazard, and the maximum value when approaching the hazard on the straight course (Figure 4).

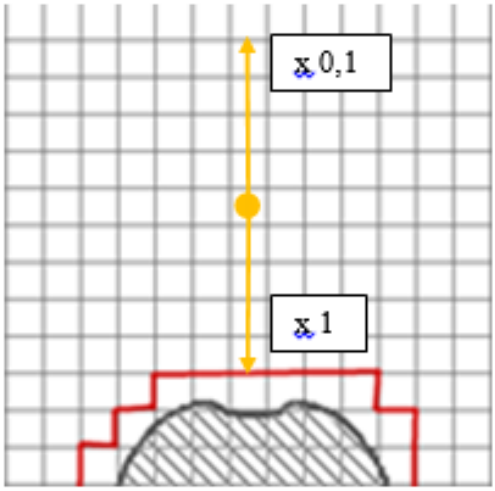


Fig.4 - Values of the coefficient A as a function of the direction of motion.

As function is based on arccosine the graph of the function is not linear as shown in Figure 5. The abscissa represents the values of the coefficient, and the ordinates represent the values of angle.

3. Implementation of method

In order to check if the evaluation by the proposed method is reliable, the authors created a computer algorithm based on the proposed mathematical model. During the tests, the method showed the expected result: near the cells with unsatisfactory values of the parameters, the values of the final coefficient were large and varied slowly, but as the distance was removed, the rate of change of the coefficients increased. Figure 6 shows the distribution of the hazard coefficients on the field after their calculation.

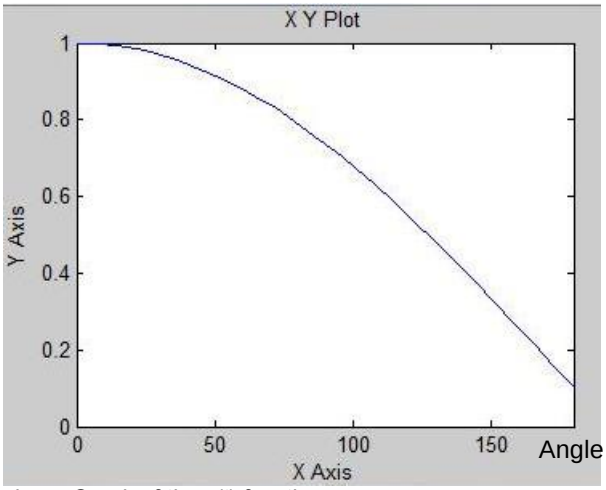


Fig.5 - Graph of the γ(t) function

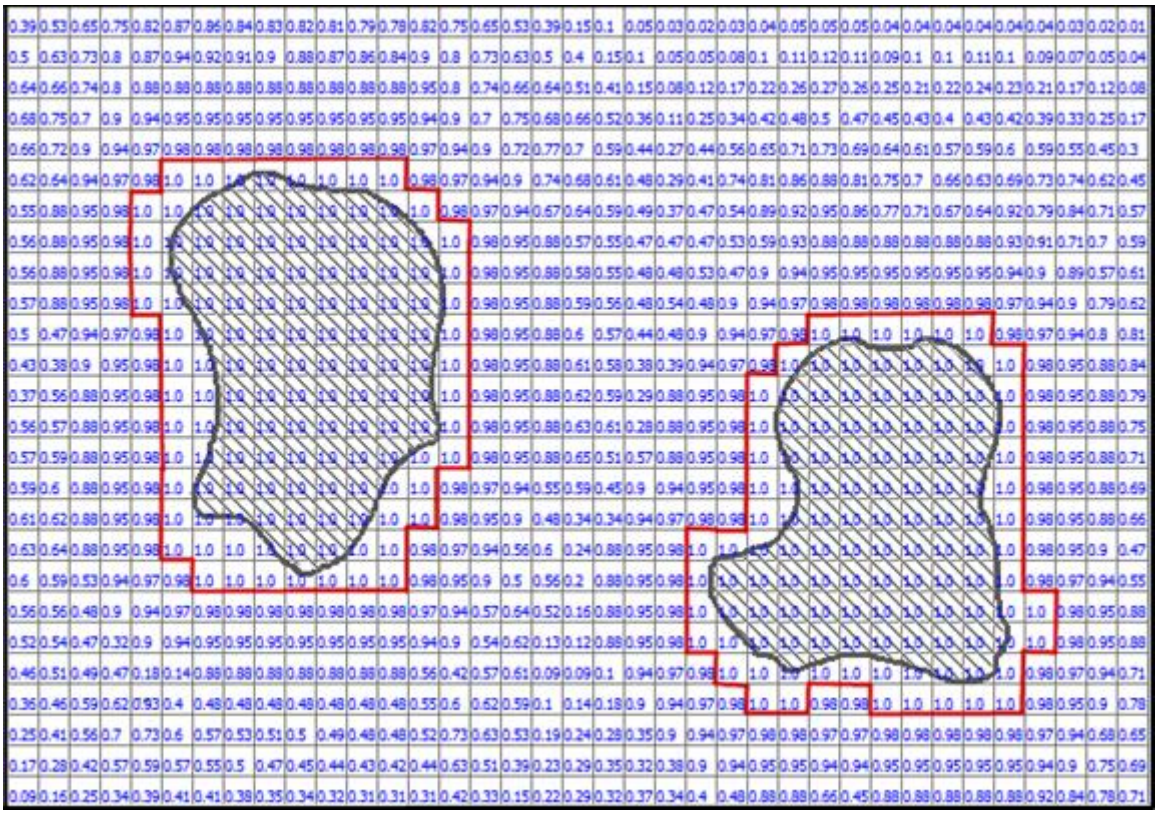


Fig. 6. Distributions of coefficients on the field after their calculation

4. Conclusion

Thus, as a result of the study, a way to assess the danger of approaching various parts of the navigation chart was derived. This approach to the assessment and clustering of the environment is innovative as it allows to determine a level of danger at any point of the chart rather accurately. It is also acceptable to plot the route at a sufficient distance from the hazard and warn in advance about approaching it. In the future, this approach opens up additional opportunities for the application of artificial intelligence systems in automating the navigation process. As it was shown before [6] fuzzy logic based vessel control systems are reliable enough, and algorithm from this paper can be easily implemented into such system.

The received method of hazard assessment is tested on the chart model, and the results obtained satisfy the objectives of the study. As a result, the mean danger value on the route suggested by decision support system is estimated 28.89, compared to 29.41 which was drawn by hand by navigator.

At a glance the difference seems small, but if this estimate is divided by number of points passed it will show an average level of danger for whole route. Thus, for decision support system this average level is 0.76, compared to 0.88 for human drawn route. This result shows that humans are likely to take unreasonable risks opposite to computer based system which is more safe.

Литература

1. Стратегия развития и внедрения e-Навигации (Резолюция MSC 85/26/Add.l) E-NAVIGATION STRATEGY IMPLEMENTATION PLAN.
2. Антонов А.А., Студеникин Д.Е., Маковецкая Н.А., Филатова Р.Г. Генерация линии предварительной прокладки в ЭКНИС с помощью суммарного потенциала, Эксплуатация морского транспорта, 2017 – вып.4 – с. 63-68
3. Антонов А.А., Студеникин Д.Е. Применение критериев различных способов оценки оптимальности при выборе маршрута, Новороссийск: «Механизм сбалансированного развития транспортного комплекса юга России в условиях глобализации и санкций» Сборник докладов и тезисов конференции, - ГМУ им. Адм. Ф.Ф.Ушакова, 2017.
4. Л. Рутковский. Методы и технологии искусственного интеллекта/пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010.- 520 с.
5. Студеникин Д.Е., Кондратьев С.И. Анализ предполагаемой траектории движения судна с учётом его маневренных возможностей, Естественные и технические науки №5, М.: Спутник +, 2013
6. Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В., Модина М.А. - Прогнозирование движения судна с помощью иерархических систем нечеткой логики (на английском языке) - Журнал «Морские интеллектуальные технологии» вып. 1 - 2018
7. Васьков А.С., Мироненко А.А. Управление программным движением судна, Новороссийск: Эксплуатация морского транспорта, 2015 – вып.4 – с. 63-68

References

1. E-navigation strategy implementation plan (IMO Resolution MSC 85/26/Add.l)
2. Antonov A.A., Studenikin D.E., Makoveckaja N.A., Filatova R.G. «Generacija linii predvaritel'noj prokladki v ECDIS s pomoshh'ju summarnogo potenciala» («Automated plotting in ECDIS using total potential») «Jekspluatacija morskogo transporta», 2017 – vol.4 – p. 63-68
3. Antonov A.A., Studenikin D.E. «Primenenie kriteriev razlichnyh sposobov ocenki optimal'nosti pri vybore marshruta», «Mehanizm sbalansirovannogo razvitija transportnogo kompleksa juga Rossii v uslovijah globalizacii I sankcij» conference report, F.F.Ushakov Maritime State University, 2017
4. L. Rutkovskij. Metody I tehnologii iskusstvennogo intellekta translated from Polish by I.D. Rudinskij – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2010.- 520 s., il.
5. Studenikin D.E., Kondrat'ev S.I. «Analiz predpolagaemoj traektorii dvizhenija sudna s uchjotom ego manevrennyh vozmozhnostej.» Magazine “Estestvennye I tehnicheskie nauki” №5, M.: , Sputnik +, 2013
6. Studenikin D.E., Khekert E.V., Modina M.A. «Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems» - Magazine “Morskie informatsionnye tehnologii” vol. 1 - 2018
7. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. «Upravlenie programmnym dvizheniem sudna» Zhurnal «Jekspluatacija morskogo transporta», 2015 – vol.4 – s. 63-68

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 62-233.22

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМАЗКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОФИЛИРОВАННОГО ЛЕПЕСТКА

Владислав Иванович Меркулов
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я бауманская ул., д.5, стр.1
e-mail: vim1935@mail.ru
Виталий Станиславович Николаев
Инженер-конструктор 3 категории
ПАО НПО «Наука»
125040, г. Москва, ул. Ямского поля 3-я, вл. № 2
e-mail: vs.nikolaev@npo-nauka.ru
Юрий Иванович Матвеев
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры эксплуатации судовых энергетических установок,
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова., д.5,
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Игорь Валерьевич Тищенко
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я бауманская ул., д.5, стр.1
e-mail: iv.tishenko@npo-nauka.ru

Аннотация

Многолепестковые газодинамические подшипники, зарекомендовавшие себя как надёжные и технологичные опоры турбомашин, находят широкое применение в различных проектах. Наиболее перспективным является применение лепестковых подшипников в авиационных СКВ гражданской и боевой авиации, в том числе авиации морского базирования. Основной причиной выхода из строя лепестковых подшипников является износ антифрикционного покрытия лепестков. Практика показывает, что износ начинается с краёв лепестков из-за снижения давления газового слоя у торца подшипника. Одним из возможных решений данной проблемы предлагается профилирование лепестка, с целью снижения жёсткости от центра к краю. Однако прежде чем применить данное изменение, необходимо оценить влияние новой формы лепестка на газодинамический слой. В данной работе получено решение уравнения газовой смазки на поверхности упругого лепестка профилированной формы с использованием неравномерной расчётной сетки и произведено сравнение распределения давления с непрофилированнным лепестком. При умеренном профилировании, изменения характеристик газодинамического слоя не происходит.

Ключевые слова: турбомашины, газодинамический подшипник, лепестковый подшипник, износ, газовая смазка, авиация.

THE SOLUTION OF THE EQUATION OF GAS LUBRICATION ON THE SURFACE OF THE SHAPED "LEAF"

Vladislav I. Merkulov
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Refrigerant, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, b.. 1
e-mail: vim1935@mail.ru
Vitaliy S. Nikolaev
Design Engineer, Category 3
PAO NPO "Nauka"
125040, Moscow, Yamskogo polya 3rd, in-house lab. No.2
e-mail: vs.nikolaev@npo-nauka.ru

Yuri I. Nechaev
Dr.Sci.Tech, Professor
Professor, Department of Operation of Ship Power Plants
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: eseu655@vsawt.ru
Igor V. Tishchenko
Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Refrigerant, Cryogenic Engineering,
Air Conditioning and Life Support Systems
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, b.. 1
e-mail: iv.tishenko@npo-nauka.ru

Abstract

Gas lubricated multileaf journal bearings, proven as reliable and technologically advanced turbomachine bearings, are widely used in various projects. The most promising is the use of leaf journal bearings in aviation-related SCR technology of civil and combat aviation, including naval-based aviation. The main reason for the failure of leaf journal bearing is the wear of the anti-friction coating of leaves. Practice shows that wear begins from the edges of the leaves due to the decrease in pressure of the gas layer at the end of the bearing. One of the possible solutions to this problem is proposed leaf shaping, in order to reduce stiffness from the center to the edge. However, before applying this change, it is necessary to evaluate the effect of the new leaf shape on the gas-dynamic layer. In this paper, a solution of the gas lubrication equation on the surface of a shaped resilient leaf using a non-uniform computational grid is obtained and the pressure distribution is compared with a non-shaped leaf. With moderate shaping, there is no change in the characteristics of the gas layer.

Keywords: turbomachines, gas bearing, leaf journal bearing, wear, gas lubrication, aviation.

Введение

Газодинамические подшипники давно зарекомендовали себя в качестве перспективной альтернативы опорам качения и гидродинамическим опорам скольжения применительно к высокооборотным турбомашинам. К достоинствам этого типа опор относят отсутствие необходимости обслуживания во время эксплуатации, системы смазки, а также загрязнения рабочего вещества парами масла.

Несмотря на разнообразие применяемых за рубежом типов лепестковых подшипников, в нашей стране нашли широкое применение многолепестковые подшипники. Наиболее известным примером применения многолепестковых подшипников является турбохолодильник системы кондиционирования воздуха самолётов серии Ту-204.

Перспективным является применение лепестковых подшипников в боевой авиации, а также авиации морского базирования (самолёты и вертолёты). Кроме того, благодаря своей относительной технологической простоте и высокой надёжности, показанной в эксплуатации, этот тип подшипников до сих пор находит применение в таких промышленных проектах как микротурбинные электрогенераторы [1, 2] и вспомогательные газотурбинные двигатели [3] и в лабораторных установках [4]

Основная часть

Ресурс лепестковых газодинамических подшипников ограничен ресурсом антифрикционного покрытия лепестков, из-за неизбежности «сухого» пуска и останова. При эксплуатации, как правило, износ антифрикционного покрытия начинается с краёв лепестка, т.к. там нет избыточного давления (торцы подшипника открываются в окружающую среду) (рис.1). Одним из возможных решений данной проблемы является изготовление лепестков специальной формы, позволяющей снижать жёсткость пакета лепестков ближе к открытым краям. Однако это предложение требует оценки влияния новой формы лепестка на характеристики газодинамического смазочного слоя.

Расчёту подшипников с лепестками обычной формы посвящена обширная литература, в которой можно выделить два направления: разработка математических моделей подшипников, например в работах Левиной и др. [5], и инженерные методы проектирования и расчёта подшипников, например [6]. Большое количество теоретической и практической информации содержит монография проф. Пешти Ю.В. [7], однако практика применения профилированных лепестков остаётся мало освещённой.

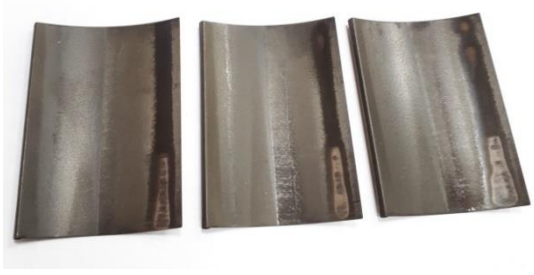


Рисунок 1 – Износ лепестков обычной формы. Разрушение антифрикционного покрытия начинает развиваться с краев.

Профилирование лепестка и решение уравнения смазки

Для расчёта давления газового слоя в зазоре между упругим лепестком и ротором используется уравнение газовой смазки (уравнение Рейнольдса), допущения и порядок вывода уравнения изложен в работе проф. Пешти Ю.В. [7].

Стационарное уравнение газовой смазки в безразмерных величинах

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\mathrm{ph}^3\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial\theta}\right)+\frac{\mathrm{r}^2}{\mathrm{L}^2}\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{ph}^3\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}\right)=\Lambda\frac{\partial(\mathrm{ph})}{\partial\theta}.$$

Решать его будем методом конечных разностей, для чего введём неравномерную сетку, состоящую из 2-х подобластей: равномерной и неравномерной (рис.2). Для упрощения работы с координатами, введём допущение, что цапфа ротора не имеет перекоса относительно продольной оси подшипника. Это допущение позволяет ввести условие симметрии в плоскости $\mathrm{z}=0$.

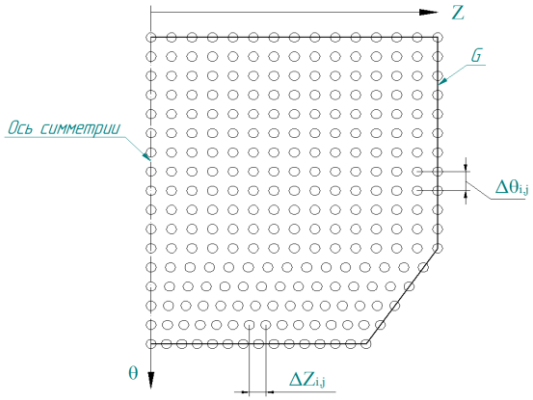


Рисунок 2 – Неравномерная сетка по поверхности профилированного упругого лепестка.

Краевые условия

$\forall(\mathrm{p}\in \mathrm{G})=1$, где G – граница лепестка.

Условие симметрии

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}=0 \text{ при } \mathrm{z}=0.$$

Начальное приближение $\forall \mathrm{p}_{\mathrm{i,j}}=1$

Уравнение газовой смазки сведём к эллиптическому уравнению с переменными коэффициентами [8]

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial\theta}\right)+\frac{\mathrm{r}^2}{\mathrm{L}^2}\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}\right)-\Lambda\frac{\partial(\mathrm{ph})}{\partial\theta}=0$$

где $\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})=\overline{\mathrm{p}}\mathrm{H}^3$,

$\overline{\mathrm{p}}=\frac{1}{4}(\mathrm{p}_{\mathrm{i-1,j}}+\mathrm{p}_{\mathrm{i+1,j}}+\mathrm{p}_{\mathrm{i,j-1}}+\mathrm{p}_{\mathrm{i,j+1}})$,

Λ – параметр сжимаемости, $\Lambda=\frac{6\mu(\mathrm{T})\omega}{\mathrm{p_a}}\left(\frac{\mathrm{r}}{\mathrm{C}}\right)^2$.

Продифференцируем выражения в скобках

$$\frac{\partial}{\partial\theta}(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}}))\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial\theta}+\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})\frac{\partial^2 \mathrm{p}}{\partial\theta^2}+\frac{\mathrm{r}^2}{\mathrm{L}^2}\left[\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}\left(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})\right)\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}+\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}})\frac{\partial^2 \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}^2}\right]-\Lambda\frac{\partial(\mathrm{ph})}{\partial\theta}=0.$$

Для решения этого уравнения воспользуемся пятиточечным разностным шаблоном

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial\theta}=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i+1,j}}-\mathrm{p}_{\mathrm{i-1,j}}}{\Delta\theta_{\mathrm{i,j}}+\Delta\theta_{\mathrm{i+1,j}}},$$

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i,j+1}}-\mathrm{p}_{\mathrm{i,j-1}}}{\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j}}+\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j-1}}},$$

$$\frac{\partial^2 \mathrm{p}}{\partial\theta^2}=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i+1,j}}-2\mathrm{p}_{\mathrm{i,j}}+\mathrm{p}_{\mathrm{i-1,j}}}{\Delta\theta_{\mathrm{i,j}}\cdot\Delta\theta_{\mathrm{i+1,j}}},$$

$$\frac{\partial^2 \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}^2}=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i,j+1}}-2\mathrm{p}_{\mathrm{i,j}}+\mathrm{p}_{\mathrm{i,j-1}}}{\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j}}\cdot\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j+1}}},$$

$$\frac{\partial}{\partial\theta}(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}}))=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i+1,j}}(\mathrm{H}_{\mathrm{i+1,j}})^3-\mathrm{p}_{\mathrm{i-1,j}}(\mathrm{H}_{\mathrm{i-1,j}})^3}{\Delta\theta_{\mathrm{i,j}}+\Delta\theta_{\mathrm{i+1,j}}},$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}(\mathrm{k}(\theta,\mathrm{z},\overline{\mathrm{p}}))=\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{i,j+1}}(\mathrm{H}_{\mathrm{i,j+1}})^3-\mathrm{p}_{\mathrm{i,j-1}}(\mathrm{H}_{\mathrm{i,j-1}})^3}{\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j}}+\Delta \mathrm{z}_{\mathrm{i,j+1}}}.$$

Применяя эти шаблоны, можно легко получить $\mathrm{p}_{\mathrm{i,j}}$ в явном виде.

Условие симметрии аппроксимируем с помощью 3-х точечного аналога производной

$$\left.\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{z}}\right|_{\mathrm{z}=0}=\frac{-3\mathrm{p}_{\mathrm{i,0}}+4\mathrm{p}_{\mathrm{i,1}}-\mathrm{p}_{\mathrm{i,2}}}{2\Delta \mathrm{z}(\theta)}=0,$$

откуда следует

$$\mathrm{p}_{\mathrm{i,0}}=\frac{4}{3}\mathrm{p}_{\mathrm{i,1}}-\frac{1}{3}\mathrm{p}_{\mathrm{i,2}}.$$

Результаты вычисления

Для сравнения были получены решения при следующих параметрах лепестка (рис.3, табл.1)

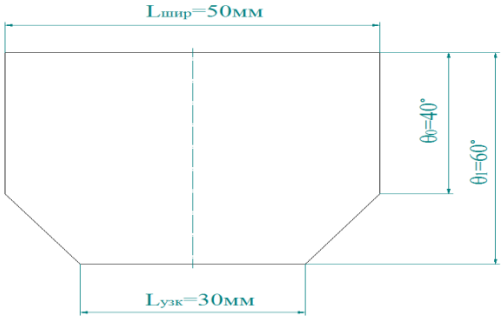


Рисунок 3 – Геометрические размеры профилированного упругого лепестка.

Таблица 1

Параметры рабочей среды в подшипнике

Рабочее вещество	-	Воздух
Давление среды, окружающей подшипник	$\mathrm{p_a}$	400 кПа
Температура	T	360 К
Средняя ширина зазора	C	30 мкм

Воспользуемся характерной формой зазора (рис.4), аппроксимированной следующей формулой

$$\mathrm{H}(\theta,\mathrm{z})=8\theta^2-8\theta+2.2$$

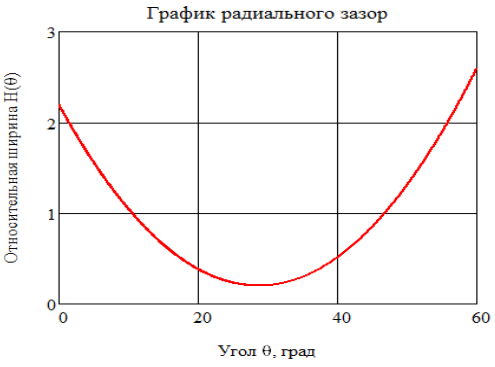


Рисунок 4 – Характерная форма зазора между упругим лепестком и ротором, отнесённая к среднему зазору.

В результате решения эллиптического уравнения получены распределения давления по поверхностям лепестков, которые представлены на рис. 5.

Для сравнения полученных результатов будем использовать следующие критерии:

Максимальное избыточное давление в слое p_{max};

Среднеарифметическое значение избыточного давления $p_{ср}$;

Среднеинтегральное избыточное давление $p_I = \frac{1}{S}\int_0^{\theta_1}\int_0^{L} p(\theta, z)$.

Результаты расчётов приведены в таблице 2.

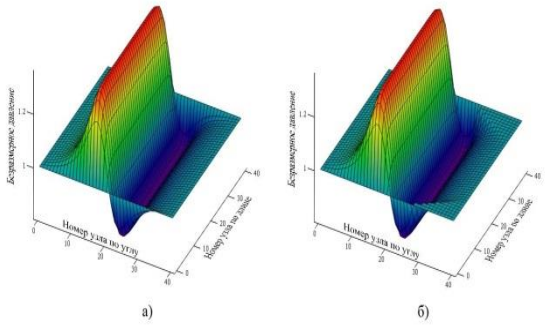


Рисунок 5 – Распределение относительного давления в зазоре между лепестком и ротором: а – обычного лепестка; б – профилированного лепестка.

Таблица 2

Результаты расчётов профилированного и обычного лепестков

Параметр	Профилированный лепесток		Непрофилированный лепесток	
	Безразмерная величина	кПа	Безразмерная величина	кПа
Максимальное избыточное давление газового слоя p_{max}	0,348	139,2	0,348	139,2
Среднеарифметическое значение избыточного давления газового слоя $p_{ср}$	0,037	14,8	0,035	14,0
Среднеинтегральное значение избыточного давления газового слоя p_I	0,081	32,5	0,078	31,2

Заключение

Профилирование формы лепестка улучшает характеристики несущего газового слоя, хотя и слабо влияет на течение газовой смазки в зазоре между лепестком и ротором, однако позволяет снизить интенсивность износа антифрикционного покрытия и отсрочить прогорание лепестка с образованием абразивных частиц износа, приводящих к выходу из строя турбомашины.

Положив в основу изложенный метод, можно построить методы расчёта более сложных форм лепестков.

Литература

1. Румянцев М.Ю., Захарова Н.Е., Сигачев С.И. Применение лепестковых газодинамических подшипников в турбогенераторных агрегатах малой мощности // Известия МГТУ «МАМИ» Серия «Транспортные средства и энергетические установки» – 2014 – №4(22).
2. Беседин С.Н., Окунев Е.И., Рассохин В.А. Микротурбинный генератор электрической мощностью 100 кВт (МГТ-100) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование – 2010. - №3.
3. Пономарев Б.А., Гаврилов В.В. Проблемы создания ВГТД с ротором на газовых опорах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2009 – №1.
4. Ермилов Ю.И., Равикович Ю.А. Экспериментальное определение предельной несущей способности осевых лепестковых газодинамических подшипников малоразмерных высокооборотных турбомашин. // Вестник МАИ. Серия: Машиностроение – 2008 – Т.15 №3.
5. Левина Г. А., Дрокин В. В. Численное моделирование и анализ нагрузочных характеристик лепесткового подшипника с газовым слоем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2011. – №. 31 (258).
6. Меркулов В.И., Плыкин М.Е., Тищенко И.В. К вопросу об инженерной методике расчета лепестковых газодинамических подшипников турбокомпрессоров // Известия МГТУ «МАМИ» – 2012 – №2 (14).
7. Пешти Ю.В. Газовая смазка: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1993 г.
8. Самарский А.А., Андреев В.Б. Разностные методы для эллиптических уравнений. – М.: Изд-во «Наука», 1976 г.

References

1. Rumyancev M.YU., Zaharova N.E., Sigachev S.I. Primenenie lepestkovyh gazodinamicheskih podshipnikov v turbogeneratornyh agregatah maloj moshchnosti. Izvestiya MGTU «MAMI» Seriya «Transportnye sredstva i ehnergeticheskie ustanovki» – 2014 – №4(22).
2. Besedin S.N., Okunev E.I., Rassohin V.A. Mikroturbinnyj generator ehlektricheskoj moshchnost'yu 100 kVt (MGT-100) Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie – 2010. - №3.
3. Ponomarev B.A., Gavrilov V.V. Problemy sozdaniya VGTD s rotorom na gazovyh oporah Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta – 2009 – №1.
4. Ermilov YU.I., Ravikovich YU.A. EHksperimental'noe opredelenie predel'noj nesushchej sposobnosti osevyh lepestkovyh gazodinamicheskih podshipnikov malorazmernyh vysokooborotnyh turbomashin. // Vestnik MAI. Seriya: Mashinostroenie – 2008 – T.15 №3.
5. Levina G. A., Drokin V. V. CHislennoe modelirovanie i analiz nagruzochnyh harakteristik lepestkovogo podshipnika s gazovym sloem Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. – 2011. – №. 31 (258).
6. Merkulov V.I., Plykin M.E., Tishchenko I.V. K voprosu ob inzhenernoj metodike rascheta lepestkovyh gazodinamicheskih podshipnikov turbokompressorov. Izvestiya MGTU «MAMI» – 2012 – №2 (14).
7. Peshti YU.V. Gazovaya smazka: uchebnik dlya vuzov. – M.: Izd-vo MGTU im. Baumana, 1993 g.
8. Samarskij A.A., Andreev V.B. Raznostnye metody dlya ehllipticheskih uravnenij. – M.: Izd-vo «Nauka», 1976 g.

УДК 623.1/.7

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ВОЗДУХО-ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Альмир Рашидович Галимов
Помощник руководителя проектов НИОКР
ПАО НПО «Наука»
125040, г. Москва, ул. Ямского поля 3-я, вл. № 2
e-mail: almirgalimov94@gmail.com
Владислав Иванович Меркулов
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я бауманская ул., д.5, стр.1
e-mail: vim1935@mail.ru
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
Игорь Валерьевич Тищенко
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я бауманская ул., д.5, стр.1
e-mail: iv.tishenko@npo-nauka.ru

Аннотация

Система кондиционирования воздуха (СКВ) авиационной техники морского базирования содержит несколько воздухо-воздушных теплообменников (ВВТ). Авиационные теплообменники характеризуются максимальной интенсификацией теплообмена, минимальными габаритными размерами и гидравлическим сопротивлением. Анализ современных СКВ показывает, что масса теплообменников на некоторых самолетах достигает 30 % массы системы. Это обусловливает применение в их конструкции тонкостенных элементов и, следовательно, усложнение технологии изготовления. В статье приведен статистический анализ отказов воздухо-воздушных теплообменников (ВВТ) являющихся частью системы кондиционирования воздуха (СКВ) авиационной техники, которые обеспечивают комфортные параметры микроклимата на борту. Определена наработка ВВТ различной конструкции и проведен анализ отказов в период эксплуатации. Для оценки эффективности теплообменных аппаратов используется показатель такой, как вероятность отказов за счет негерметичности узлов и конструкций ВВТ.

Ключевые слова: Воздух, летательный аппарат, теплообменник, эффективность, система кондиционирования воздуха, авиация, технологии.

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF FAILURES OF AIR-TO-AIR HEAT EXCHANGERS DURING OPERATION OF AVIATION SEA-BASED AIR CONDITIONING SYSTEMS

Almir R. Galimov
Assistant R & D Project Manager
PAO NPO "Nauka"
125040, Moscow, Yamskogo polya 3rd, in-house lab. No.2
e-mail: almirgalimov94@gmail.com
Vladislav I. Merkulov
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Refrigerant, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, b.. 1
e-mail: vim1935@mail.ru
Pokusaev M. Nikolaevich
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department
"Operation of Water Transport"

Astrakhan State Technical University
414056, Astrakhan, Tatishcheva, 16
e-mail: evt@astu.org
Igor V. Tishchenko
Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Refrigerant, Cryogenic Engineering,
Air Conditioning and Life Support Systems
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, b.. 1
e-mail: iv.tishenko@npo-nauka.ru

Abstract

The air conditioning system (ACS) of sea-based aviation equipment contains several air-to-air heat exchangers (AAHE). Aviation heat exchangers are characterized by a maximum intensification of heat exchange, minimum overall dimensions and hydraulic resistance. Analysis of modern ACR shows that the weight of heat exchangers on some aircraft reaches 30% of the weight of the system. This leads to the use in their design of thin-walled components and, consequently, to the complexity of manufacturing process. The article presents a statistical analysis of failures of air-to-air heat exchangers (AAHE), which are part of the air conditioning system (ACS) of aircraft equipment, which provide comfortable microclimate parameters on board. The operating time of AAHE of various designs has been determined and the analysis of failures during operation has been carried out. To assess the efficiency of heat exchangers, the probability of failures due to leakage of assemblies and structures of AAHE is used as an indicator.

Keywords: Air, aircraft, heat exchanger, efficiency, air conditioning system, aviation, technology.

Введение

В настоящее время на всех летательных аппаратах имеются системы кондиционирования, обеспечивающие нормальные условия для жизнедеятельности экипажа и пассажиров, а также для работы оборудования. Кондиционирование воздуха на самолетах и вертолетах предназначено для поддержания на заданном уровне группы параметров: температуры, влажности, давления. [5, 6]

К теплообменным аппаратам в системе жизнеобеспечения относятся радиаторы, конденсаторы, испарители, различные подогреватели и охладители газов и жидкостей. [2]

Целью статьи является – определение вероятности отказов за счет негерметичности различных ВВТ системы кондиционирования

воздуха. Основными задачами является систематизация различных типов ВВТ на основе анализа отказов и вероятностной оценки эффективности и надежности по анализу отказов и определение эксплуатационного ресурса. Под надежностью понимается – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и хранения. Для этого проведен статистический анализ, как основной способ определения показателей эксплуатационного ресурса изделия.

Основная часть

В современной технике теплообменные аппараты применяются весьма многообразно и широко. Здесь рассмотрены только такие теплообменные аппараты, которые используют на летательных аппаратах. Даже в этом ограниченном применении имеется большое количество типов теплообменных аппаратов, разнообразных как по назначению, так и по конструктивному исполнению. Вероятностная оценка эффективности позволит в последующем предложить методики ресурсных испытаний, что поможет снизить энергозатраты на испытательный цикл при разработке ВТ.

В работе [1] был проведен анализ 17 теплообменных аппаратов разработанных Научно-производственным объединением «Наука», характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

№, ВВТ	Масса, кг	$T_{г1}$, °С	$T_{г2}$, °С	$T_{х1}$, °С	Марки материалов	G_1, кг/ч	G_2, кг/ч	Выборка, шт
№ 1	6,7	106	66	25	АМц, АПС-1М, АМг6	200	180	33
№ 2	60	290	80	50	АМц, АПС-1М, АМг6	3500	10500	33
№ 3	90	280	60	41	АМц, АПС-2М, АМг3	2500	7500	33
№ 4	60	490	230	116	12Х18Н10Т	4000	5000	33
№ 5	45	300	200	20	12Х18Н10Т	5040	3060	33
№ 6	45	315	225	17	12Х18Н10Т	5040	3060	33
№ 7	29	230	40	31	АМц, АПС-1М, АМг6	2500	7500	33

№ 8	29	240	60	50	АМц, АПС-2М, АМг3	2500	7500	33
№ 9	29	220	70	60	АМц, АПС-1М, АМг3	2500	7500	33
№ 10	6,5	43	40,5	31	АМц, АПС-1М, АМг6	2540	2540	33
№ 11	3,9	45	32	-23	АМц, АПС-1М, АМг6	2540	2500	33
№ 12	17,2	180	130	110	АМц, АПС-2М, АМг6	2560	5400	33
№ 13	13,5	180	130	110	АМц, АПС-2М, АМг6	2560	5400	33
№ 14	20,5	398	225	91	12Х18Н10Т	694	1670	33
№ 15	20,5	376	230	13,5	12Х18Н10Т	900	900	33
№ 16	16	46	43	37	АМц, АПС-1М, АМг3	800	1440	33
№ 17	9	400	101	88	12Х18Н10Т	800	2600	33

G1, кг/ч – расход горячего воздуха
G2, кг/ч – расход холодного воздуха
Тг1, °С – температура на входе горячего воздуха
Тг2, °С – температура на выходе горячего воздуха
Тх1, °С – температура на входе холодного воздуха

Характеристики выборок, по которым сделаны оценки указаны в приложении № 1.

Анализ данных об отказах позволил установить четыре основные причины отказов:

- потеря герметичности или разрушение охлаждающего пакета в результате скрытых дефектов производства
- разрушение крайних элементов горячей полости теплообменника из-за недостаточной обработки процессов сварки и пайки
- разрушение крайних элементов горячей полости теплообменника, вызываемое конструктивными дефектами и жесткими условиями эксплуатации
- разрушение пакета охлаждающих элементов по углам в результате возникновения циклических термических напряжений из-за большой разности температур воздушных потоков.[3, 8, 9]

Рассмотрев причины отказов ВВТ, получено распределение отказов за весь период эксплуатации. В качестве примера приведено распределение отказов по изделию № 1 рис.1.

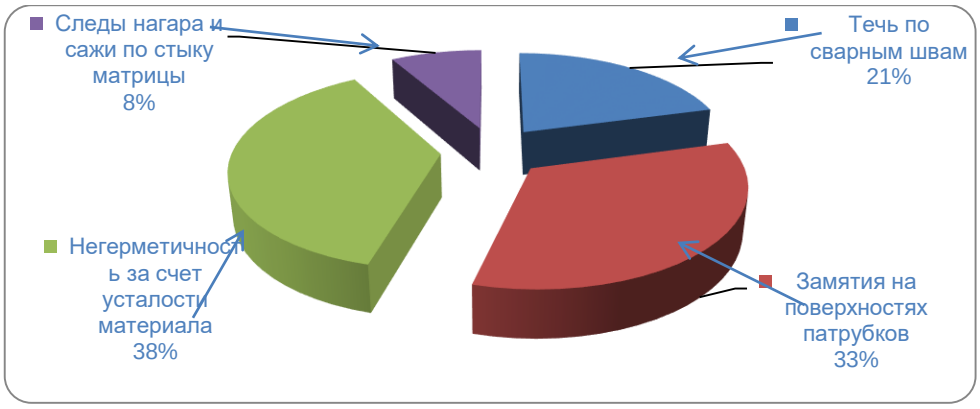


Рис. 1. Распределение отказов изд. №1

Из диаграммы следует, что большинство отказов происходит из-за негерметичности конструкций ВВТ, которые далее учитываются при оценке эффективности, как наиболее распространенный отказ.

Для определения негерметичности предусмотрена следующая операция:

Проверка герметичности ВВТ проводится воздухом в ванне с водой. Необходимо проводить испытание на герметичность полость охлаждаемого и охлаждающего воздуха избыточным давлением. Испытания проводятся поочередно. Утечка воздуха во внешнюю среду не допускается. Допускается падение давления, определяемое перетоком из полости охлаждаемого воздуха в полость охлаждающего воздуха.

Далее на рис. 2 и на рис. 3 представлена средняя наработка на отказ за 7 лет эксплуатации алюминиевых и стальных теплообменников, и проведено сравнение с требованиями конструкторской документации (КД). Важной задачей является оценка (приближенного определения) по выборочным данным параметров закона распределения генеральной совокупности. Другими словами, по данным выборочного распределения, оценив неизвестные параметры теоретического распределения. Так как известны конкретные числа наработки, следует выбрать точечную оценку генеральной средней и параметра средней наработки на отказ - служит выборочная средняя.

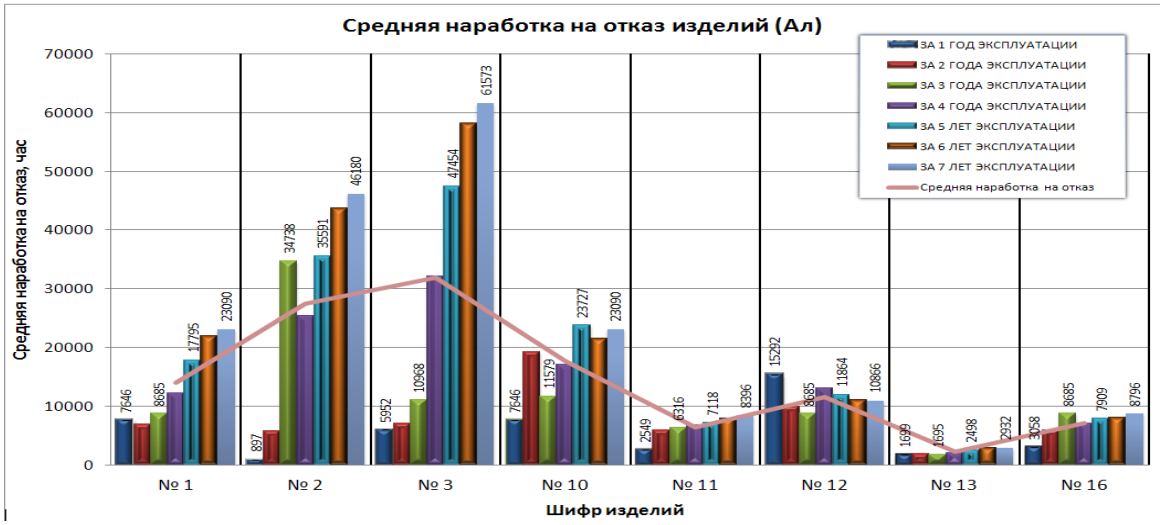


Рис. 2. Средняя наработка на отказ (для алюминиевых)

На рис. 2 представлены теплообменники №1, №2, №3, №10, №11, №12, №13, №16 из алюминиевых сплавов.

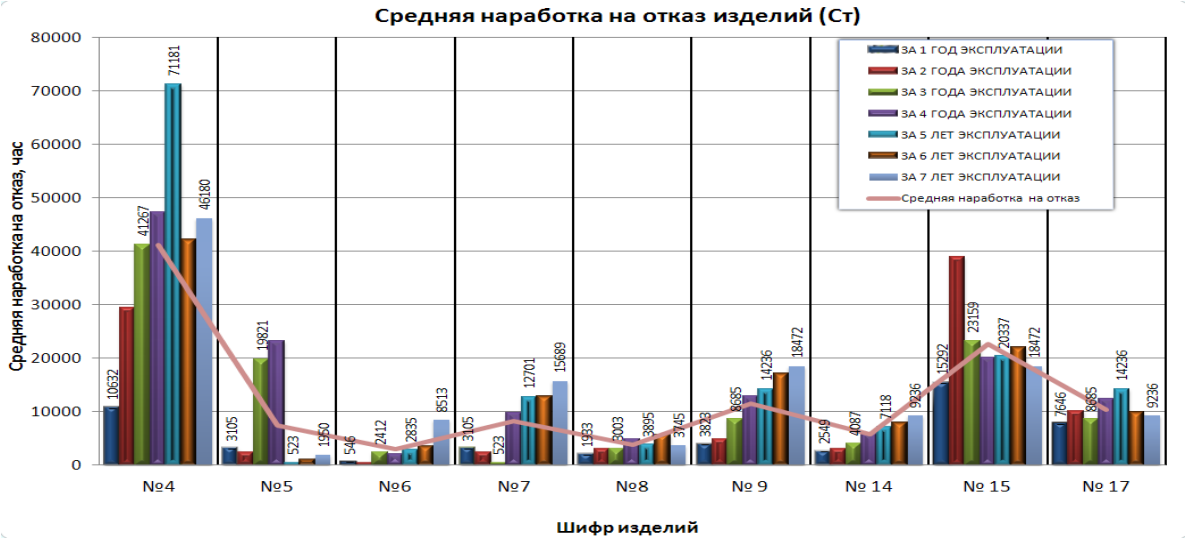


Рис. 3. Средняя наработка на отказ (для стальных)

На рисунке 3 представлены теплообменники №4, №5, №6, №7, №8, №9, №14, №15, №17 из стальных сплавов.

Из рисунков 2 и 3 видно, что средняя наработка на отказ в период эксплуатации выше, чем по КД и у стальных и у алюминиевых ВВТ, следовательно, ресурс выше, чем предусмотрено конструкторской документацией. Однако при рассмотрении всей совокупности эксплуатируемых ВВТ у части теплообменников имеются отказы по причине негерметичности.

За показатель эффективности эксплуатации теплообменного аппарата (ТА) в принимаем, отношение наработки ТА до отказа по причине негерметичности к сумме фактической наработки ТА в течение срока эксплуатации и наработки ТА до отказа по причине негерметичности:

$$К = \frac{\sum_2}{\sum_1} \qquad (1)$$

К- показатель эффективности эксплуатации

$\sum_1$- фактическая наработка, ч.

$\sum_2$- наработка до отказа по причине негерметичности, ч.

$$\sum_1 = T_1 * n_1 \qquad (2)$$

$$\sum_2 = T_2 * n_2 \qquad (3)$$

T_1 – средняя фактическая наработка теплообменников при условии $T \geq T_{кд}$, ч.

T_2 – средняя фактическая наработка теплообменников при условии $T < T_{кд}$, ч.

n_1 – количество ТА при условии $T \geq T_{кд}$, шт.

n_2 – количество ТА при условии $T < T_{кд}$, шт.

Расчет показателя К для различных ВВТ СКВ представлен в таблице 2 и в таблице 3. В таблице 2 представлены результаты показателя эффективности в период эксплуатации по алюминиевым теплообменным аппаратам.

Таблица 2

№1	№2	№3	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№16
0,21	0,25	0,1	0,22	0,28	0,18	0,15	0,25	0,31	0,18	0,21

В таблице 3 представлены результаты показателя эффективности в период эксплуатации по стальным теплообменным аппаратам.

Таблица 3

№4	№5	№6	№14	№15	№17
0,11	0,1	0,12	0,11	0,07	0,09

Далее оценим вероятность отказа ТА по причине негерметичности за период эксплуатации с 2010 по 2017 годы.

$$Q = \frac{r(\mu)}{N_0}$$

Q – вероятность отказа по причине негерметичности

$r(\mu)$ – число всех отказавших изделий к моменту времени μ, шт.

N_0 – общее число однотипных изделий в начале испытаний или эксплуатации, шт.

В таблице 4 рассчитана вероятность отказа по причине негерметичности по всем видам ТА.

Таблица 4

№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16	№17
0,06	0,04	0,05	0,03	0,07	0,05	0,02	0,0	0,18	0,15	0,25	0,31	0,18	0,11	0,15	0,21	0,09

Оценка производится конкретно для каждого теплообменника из-за различных условий эксплуатации ВВТ. Из таблиц следует, что по данной методике при штатных параметрах лучшие результаты показали теплообменные аппараты из стали. Таким образом, К и Q показывают полноту использования ресурса теплообменников в ходе его эксплуатации, и чем меньше показатели К и Q, тем выше эффективность и надежность ВВТ. Надежность - свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. [11]

Статистическая информация об отказах теплообменников в процессе эксплуатации является основным источником сведений об их надежности. От характера и точности статистической информации об отказах во многом зависит правильность решений, принимаемых по конструктивной доводке теплообменников, изменению технологического процесса изготовления, а также по применяемости и объективности различных видов стендовых испытаний. [4, 7]

Заключение

1 Выполнена вероятностная оценка безотказной работы ТА в период эксплуатации.

2 Большинство отказов происходит из-за негерметичности ВВТ в период эксплуатации

3 Наработка до отказа практически по всем рассмотренным ВВТ превышает назначенный ресурс по конструкторской документации (КД) на изделие.

4 Использование приведенных данных позволяет обосновать возможность продления ресурса эксплуатируемого ВВТ.

Литература

1. Галимов А.Р., Меркулов В.И., Тищенко И.В. Статистический анализ отказов воздухо-воздушных теплообменников системы кондиционирования воздуха авиационной техники // Молодежный научно-технический вестник. № 05. Май 2017. 7 с.
2. Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов. Н.: Изд-во НГТУ, 2003. 512 с.
3. Архаров А.М., инж. Кривоногов И.Н. Выбор и обоснование режимов нагружения воздухо-воздушных теплообменников при проведении ускоренных ресурсных испытаний. Труды МВТУ. Глубокий холод и кондиционирование, №296, 1979, 150с.
4. Воронин Г.И. Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования. М.: Машиностроение, 1978. 544 с.
5. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: «Энергия», 1967. 224 с.
6. Жуков А.Н. Авиационные двигатели: принципы формирования и моделирования виртуальных структур. М.: ВЦ РАН, 2013.
7. Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: МАИ, 2003.
8. Байгалиев Б.Е., Щелчков А.В., Яковлев А.Б. Теплообменные аппараты. М.: Изд-во Казань, 2012. 180 с.

9. В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов «Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок» изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2004 г., 592 с.
10. Купер Д., Маккаллум Д.,Патент RU 2384803 C2, 20.03.2010
11. ГОСТ 27.002 - 2015
12. Худяков А. И., Патент RU 2364812 C1, 20.08.2009
13. Григорьев А. А., Марков Ю. С., Лепешкин А. Р., Григорьев С. Н., Патент RU 2350874 C1, 20.07.2007
14. Кирсанов Ю. А., Галиков Б. Ш., Патент RU 2342616 C1, 27.12.2008
15. Алфимов А. В., Ломазов В. С., Дробыш М. В., Патент RU 119085 U1, 10.08.2012
16. Принцип работы кожухотрубчатого теплообменника, его преимущества и недостатки[Электронный доступ]2008-2016.-Режим доступа: http://79w.ru/, свободный.

References

1. Galimov A.R., Merkulov V.I., Tishchenko I.V. Statisticheskij analiz otkazov vozduho-vozdushnyh teploobmennikov sistemy kondicionirovaniya vozduha aviacionnoj tekhniki // Molodezhnyj nauchno-tekhnicheskij vestnik. № 05. Maj 2017. 7 s.
2. D'yachenko YU.V., Sparin V.A., CHichindaev A.V. Sistemy zhizneobespecheniya letatel'nyh apparatov. N.: Izd-vo NGTU, 2003. 512 s.
3. Arharov A.M., inzh. Krivonogov I.N. Vybor i obosnovanie rezhimov nagruzheniya vozduho-vozdushnyh teploobmennikov pri provedenii uskorennyh resursnyh ispytanij. Trudy MVTU. Glubokij holod i kondicionirovanie, №296, 1979, 150s.
4. 4. Voronin G.I. Konstruirovanie mashin i agregatov sistem kondicionirovaniya. M.: Mashinostroenie, 1978. 544 s.
5. Kehjs V.M., London A.L. Kompaktnye teploobmenniki. M.: «EHnergiya», 1967. 224 s.
6. ZHukov A.N. Aviacionnye dvigateli: principy formirovaniya i modelirovaniya virtual'nyh struktur. M.: VC RAN, 2013.
7. Bakulev V.I., Golubev V.A., Krylov B.A. i dr. Teoriya, raschet i proektirovanie aviacionnyh dvigatelej i ehnergeticheskih ustanovok. M.: MAI, 2003.
8. Bajgaliev B.E., SHCHelchkov A.V., YAkovlev A.B. Teploobmennye apparaty. M.: Izd-vo Kazan', 2012. 180 s.
9. V.L. Ivanov, A.I. Leont'ev, EH.A. Manushin, M.I. Osipov «Teploobmennye apparaty i sistemy ohlazhdeniya gazoturbinnyh i kombinirovannyh ustanovok» izd. MGTU im. N.EH. Baumana, Moskva, 2004 g., 592 s.
10. Kuper D., Makkallum D.,Patent RU 2384803 C2, 20.03.2010
11. GOST 27.002 - 2015
12. Hudyakov A. I., Patent RU 2364812 C1, 20.08.2009
13. Grigor'ev A. A., Markov YU. S., Lepeshkin A. R., Grigor'ev S. N., Patent RU 2350874 C1, 20.07.2007
14. Kirsanov YU. A., Galikov B. SH., Patent RU 2342616 C1, 27.12.2008
15. Alfimov A. V., Lomazov V. S., Drobysh M. V., Patent RU 119085 U1, 10.08.2012
16. The device welded plate heat exchangers and their advantages [Electronic access] 2008-2016.-Access mode: http://bcoreanda.com/, free.

УДК 656.62.052.4:[629.12:532.5]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Александр Георгиевич Малышкин
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru
Валерий Иванович Плющаев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники,
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Вадим Иванович Тихонов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: vitnn12@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрен плоский пограничный слой жидкости, обтекающей судно. Отмечено, что в пределах пограничного слоя каждая частица воды участвует в движении по двум противоположным направлениям: по направлению движения судна как присоединённая жидкость и по направлению внешнего потока как жидкость, обтекающая судовой корпус. Доказано, что в пределах пограничного слоя средняя скорость частиц присоединённой жидкости равна половине скорости судна, а средняя скорость обтекания судна жидкостью – половине скорости внешнего потока.

Аналитически установлена объективная закономерность распределения скоростей частиц в пограничном слое жидкости, обтекающей судовой корпус. Отмечено, что характер распределения скоростей частиц жидкости полностью соответствует результатам экспериментальных исследований, которые получены Я.И. Войткунским.

Путём решения интегрального соотношения Т. Кармана с использованием установленной закономерности распределения скоростей частиц в пограничном слое жидкости получена формула зависимости коэффициента сопротивления трения эквивалентной плоской пластины от числа Рейнольдса. Отмечено, что результаты расчётов коэффициента трения эквивалентной пластины по формулам, основанным на использовании логарифмической зависимости распределения скоростей жидкости в пограничном слое, недостоверны, поскольку существенно превышают его действительные значения.

На основе установленной закономерности распределения скоростей частиц жидкости в пограничном слое получено выражение для определения средней удельной кинетической энергии, приходящейся на единицу массы как присоединённой жидкости, так и жидкости, обтекающей судовой корпус. Получено уравнение, описывающее произвольное установившееся потенциальное движение вязкой жидкости в пределах пограничного слоя.

Ключевые слова: судно, жидкость, движение, пограничный слой, скорости частиц жидкости, эквивалентная пластина, коэффициент сопротивления трения, кинетическая энергия жидкости, уравнение движения вязкой жидкости.

DETERMINATION OF SPEEDS OF PARTICLES OF LIQUID IN A TWO-DIMENSIONAL BOUNDARY LAYER

Alexander G. Malyshkin
Dr.Sci.Tech, professor
Chief Researcher
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: uptransp@vgavt-nn.ru
Valery I. Plyushchaev
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Radio Electronics Department,
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Vadim I. Tikhonov
Dr.Sci.Tech, professor

Professor of the Department of Navigation and Shipping Safety
Volga State University of Water Transport
603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: vitnn12@mail.ru

Abstract

The paper considers a two-dimensional boundary layer of fluid flowing around the ship. It is noted that within the boundary layer each particle of water participates in motion in two opposite directions: in the direction of the ship motion as an added-fluid and in the direction of external flow, as a fluid flowing around the ship's hull. It has been proved that within the boundary layer the average velocity of the particles of the added-fluid is half the speed of the vessel, and the average velocity of the flow of fluid around the vessel is half the speed of the external flow.

The objective regularity of the distribution of particle velocities in the boundary layer of the fluid flowing around the ship hull is analytically established. It is noted that the nature of the velocity distribution of the particles of liquid is fully consistent with the results of experimental studies obtained by Ya.I. Voitkunsky.

By solving the integral relation of T. Karman using the established regularity of the distribution of particle velocities in the boundary layer of a fluid, a formula is obtained for the dependence of the friction resistance coefficient of an equivalent flat plate on the Reynolds number. It is noted that the results of calculations of the friction coefficient of an equivalent plate using formulas based on the use of the logarithmic dependence of the velocity distribution of the fluid in the boundary layer are unreliable, since they significantly exceed its actual values.

Based on the established regularity of the velocity distribution of fluid particles in the boundary layer, an expression is obtained for determining the average specific kinetic energy per unit mass of both the added-fluid and the fluid flowing around the ship's hull. An equation is obtained that describes an arbitrary steady-state potential motion of a viscous fluid within a boundary layer.

Keywords: vessel, fluid, motion, boundary layer, velocity of fluid particles, equivalent plate, coefficient of friction resistance, kinetic energy of fluid, equation of motion of a viscous fluid.

При исследовании движения твёрдых тел в реальной жидкости предполагается, что влияние вязкости на структуру потока ограничивается областью вблизи их поверхности. Поэтому окружающую тело жидкость разделяют на две части – прилегающий к поверхности тела пограничный слой, в котором проявляется действие сил вязкости, и внешний поток, в котором жидкость ведёт себя как идеальная.

Основной геометрической характеристикой пограничного слоя служит его толщина ε – расстояние по внешней нормали n (или поперечной оси y, если $\vec{y}\|\vec{n}$) к поверхности S тела, где скорость $v_{\text{обт}}$ потока, обтекающего тело внутри пограничного слоя, достигает значения v, соответствующего скорости внешнего потока относительно данной точки поверхности тела [1]. Внешняя поверхность S_1 пограничного слоя не является линией тока, а лишь условно ограничивает извне зону влияния вязкости на поток, обтекающий тело.

Для оценки силы сопротивления трения, действующей на корпус водоизмещающего судна, широко используется понятие «эквивалентная плоская пластина». Такие пластины, обтекаемые в продольном направлении x, представляют собой группу простейших тел, для которых характерно отсутствие перепада давления жидкости вдоль их поверхности.

Определение характеристик пограничного слоя основано на решении интегрального соотношения Кармана, справедливого как для ламинарного, так и турбулентного течения. Для пограничного слоя плоской пластины это соотношение примет следующий вид [2]:

$$\rho v \frac{d}{dx}\int_0^{\varepsilon} u_x dy - \rho \frac{d}{dx}\int_0^{\varepsilon} u_x^2 dy = \tau_0 , \qquad (1)$$

где u_x – скорость жидкости, обтекающей тело в пределах пограничного слоя (при турбулентном течении под скоростью u_x понимается её осреднённое во времени значение); p – давление жидкости; τ_0 – касательное напряжение на поверхности S тела (при $y = 0$).

Значение τ_0 как при ламинарном, так и при турбулентном движении жидкости может быть определено по известной формуле Ньютона

$$\tau_0 = \rho\eta \left.\frac{\partial u_x}{\partial y}\right|_{y=0} . \qquad (2)$$

Здесь η – кинематическая вязкость жидкости.

Таким образом, для решения уравнения (1) необходимо и достаточно установить характер распределения скоростей $u_x(y)$ движения частиц жидкости в пределах толщины пограничного слоя. Очевидно, что зависимость $u_x(y)$ должна быть объективной, то есть соответствующей основным законам механики. Попытаемся определить эту зависимость.

Предположим, что судно движется в продольном направлении с постоянной скоростью v относительно находящейся в состоянии покоя жидкости. Преодолевая её сопротивление, судно совершает работу, изменяя при этом энергию окружающей его воды. Этот процесс непрерывной передачи энергии, происходящий в пограничном слое толщиной ε, сопровождается возникновением в нём поля вызванных скоростей частиц, в результате чего образуется так называемая присоединённая жидкость.

Условность этого понятия объясняется тем обстоятельством, что в пределах пограничного слоя

каждая частица воды является участницей движения по двум противоположным направлениям:

1) по направлению движения судна со скоростью $v_{пр}$ как присоединённая жидкость;

2) по направлению внешнего потока с относительной скоростью $-v$ как жидкость, обтекающая судовой корпус.

Рассмотрим частицы плоского пограничного слоя, находящиеся на одной и той же внешней нормали n к поверхности S борта судна в какой-либо точке O, полагая, что координатная ось Ox совпадает с направлением движения судна, а ось Oy – с направлением нормали n.

Скорость частицы вязкой жидкости, непосредственно прилегающей («прилипшей») к поверхности S обшивки корпуса, равна его скорости v. По мере удаления от поверхности S скорость жидких частиц уменьшается и на условной поверхности S_1, разделяющей пограничный слой и внешний поток, становится равной нулю (рис. 1). Следовательно, скорость $v_{пр}$ движения частиц присоединённой жидкости должна удовлетворять следующим граничным условиям:
на поверхности корпуса

$$v_{пр}|_S = v; \quad (3)$$

на поверхности, разделяющей внешний поток и пограничный слой,

$$v_{пр}|_{S_1} = 0. \quad (4)$$

Результирующая скорость $v_{обт}$ движения частицы вязкой жидкости относительно поверхности корпуса будет определяться выражением:

$$v_{обт} = -(v - v_{пр}). \quad (5)$$

Скорость $v_{обт}$ должна удовлетворять противоположным граничным условиям (см. рис. 1):
на поверхности корпуса

$$v_{обт}|_S = 0; \quad (6)$$

на поверхности, разделяющей пограничный слой и внешний поток,

$$v_{обт}|_{S_1} = -v. \quad (7)$$

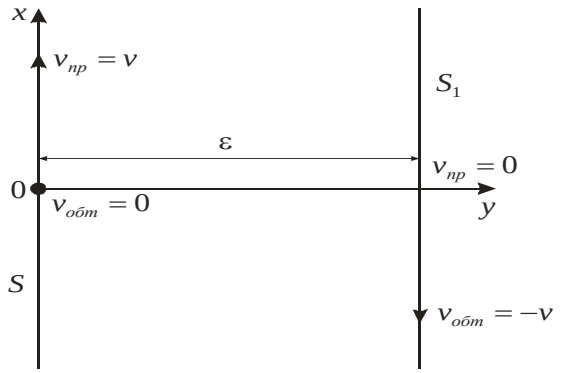


Рис. 1. Граничные значения скоростей частиц жидкости

Равенство (5) свидетельствует о том, что в пределах пограничного слоя выполняется условие неразрывности и несжимаемости жидкости, то есть

$$v_{пр} - v_{обт} = v. \quad (8)$$

Заметим, что сила сопротивления воды движению судна, а также энергетические затраты судна на преодоление этого сопротивления будут определяться относительной скоростью $v_{обт}$ обтекания жидкостью судового корпуса. Кроме того, поскольку внешний поток, рассматриваемый как идеальная жидкость, никакого влияния на пограничный слой не оказывает, то система частиц воды внутри пограничного слоя может считаться замкнутой. Тогда, согласно закону сохранения количества движения, для случая движения судна в покоящейся жидкости

$$\frac{1}{\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} v_{пр}(y)dy = const. \quad (9)$$

Рассмотрим теперь обращённое установившееся движение жидкости относительно неподвижного судна с той же самой скоростью. В этом случае сила сопротивления судна движению жидкости, а также энергетические затраты потока на преодоление этого сопротивления будут определяться скоростью $v_{пр}$ движения частиц относительно внешнего потока, а для системы частиц воды внутри пограничного слоя можем записать:

$$\frac{1}{\varepsilon}\int_{\varepsilon}^{0} v_{обт}(y)dy = const. \quad (10)$$

Тогда единственным условием, не противоречащим ни принципу относительности Галилея, ни третьему закону Ньютона, ни закону сохранения количества движения, ни закону сохранения и превращения энергии, будет

$$\frac{1}{\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} v_{пр}(y)dy = \frac{1}{\varepsilon}\int_{\varepsilon}^{0} v_{обт}(y)dy. \quad (11)$$

Воспользовавшись теоремой о среднем значении интеграла [3], представим уравнение (11) в виде

$$\frac{\bar{v}_{пр}}{\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} dy + \frac{\bar{v}_{обт}}{\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} dy = 0, \quad (12)$$

где $\bar{v}_{пр}$, $\bar{v}_{обт}$ – средние в пределах пограничного слоя значения скоростей частиц жидкости.

Из выражения (12) вытекает:

$$\bar{v}_{пр} + \bar{v}_{обт} = 0. \quad (13)$$

Равенства (8) и (13) позволяют сделать вывод о том, что

$$\bar{v}_{пр} = 0{,}5v; \quad \bar{v}_{обт} = -0{,}5v. \quad (14)$$

Следовательно, если имеет место относительное движение твёрдого тела в реальной жидкости, то в пределах пограничного слоя

1) средняя скорость частиц присоединённой жидкости равна половине скорости относительного движения;

2) средняя скорость обтекания тела жидкостью равна половине скорости относительного движения;

3) движение частиц присоединённой жидкости и внешнего потока происходит навстречу друг другу.

Поскольку площади эпюр скоростей –

$$\int_0^{\varepsilon} v_{пр}(y)dy = \int_{\varepsilon}^{0} v_{обт}(y)dy = 0{,}5v\varepsilon$$

эквивалентны площадям прямоугольных треугольников, то, согласно равенствам (8) и (11), функции $v_{пр}(y)$ и $v_{обт}(y)$ должны удовлетворять условиям:

$$v_{пр}(y)\big|_{y=0,5\varepsilon} = 0,5v;$$
$$v_{обт}(y)\big|_{y=0,5\varepsilon} = -0,5v. \quad (15)$$

Если предположить, что на характер распределения скоростей жидких частиц вблизи поверхности S обшивки корпуса судна ($0 \le y < 0,5\varepsilon$) большее влияние оказывает вязкость воды, а около внешней границы S_1 слоя ($0,5\varepsilon < y \le \varepsilon$) – её «идеальность», то зависимость $u_x(y) = |v_{обт}(y)|$ может быть представлена в виде

$$u_x = v\left(\frac{1}{\varepsilon}y - A\sin\frac{2\pi}{\varepsilon}y\right). \quad (16)$$

Здесь A – безразмерный коэффициент.

Очевидно, что уравнение (16) удовлетворяет следующему условию: на внешней границе слоя

$$\left.\frac{\partial\tau}{\partial y}\right|_{y=\varepsilon} = \rho\eta\left.\frac{d^2u_x}{dy^2}\right|_{y=\varepsilon} = 0. \quad (17)$$

Найдём касательное напряжение на поверхности обшивки корпуса судна. Подставив выражение (16) в формулу (2), получим:

$$\tau_0 = \rho\eta\frac{v}{\varepsilon}(1-2\pi A). \quad (18)$$

Соотношение (18) позволяет определить границы возможного изменения значений коэффициента A. Очевидно, что при $A = 0$ зависимость $u_x(y)$ становится линейной, а при $A = 1/2\pi$ вода «превращается» в идеальную жидкость. Следовательно, коэффициент A должен удовлетворять условию:

$$0 < A < 1/2\pi.$$

Приняв величину коэффициента A средней – $A = 1/4\pi$, получим окончательный вид зависимости распределения скоростей в пограничном слое жидкости, обтекающей твёрдое тело (рис. 2):

$$u_x = v\left(\frac{1}{\varepsilon}y - \frac{1}{4\pi}\sin\frac{2\pi}{\varepsilon}y\right). \quad (19)$$

Тогда

$$\tau_0 = 0,5\rho\eta\frac{v}{\varepsilon}. \quad (20)$$

Необходимо отметить, что зависимость (19) полностью соответствует результатам экспериментальных исследований распределения скоростей в турбулентных гидродинамических следах и спутных струях, создаваемых сходящим с корпуса судна или его модели пограничным слоем [1, с. 49]. При этом некоторые весьма незначительные количественные расхождения в диапазонах $0 \le y < 0,5\varepsilon$ и $0,5\varepsilon < y \le \varepsilon$ могут быть объяснены, по мнению автора, влиянием, соответственно, шероховатости поверхностей моделей и волнообразования.

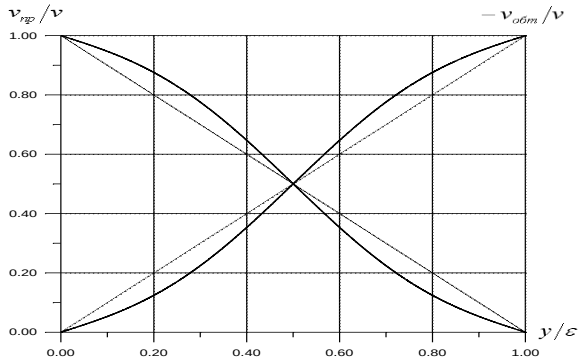


Рис. 2. Безразмерные эпюры скоростей в пограничном слое

Таким образом, можно считать, что Ярослав Иосифович Войткунский экспериментально установил, а автор аналитически подтвердил существование объективной закономерности распределения скоростей в пограничном слое воды, обтекающей твёрдое тело. Очевидно, что эта закономерность распространяется и на случай ламинарного течения жидкости в пограничном слое.

Подставив формулы (19) и (20) в выражение (1), получим:

$$\rho v^2\frac{d}{dx}\left[\frac{1}{\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} y dy - \frac{1}{4\pi}\int_0^{\varepsilon}\sin\left(\frac{2\pi}{\varepsilon}y\right)dy - \right.$$
$$-\frac{1}{\varepsilon^2}\int_0^{\varepsilon} y^2 dy + \frac{1}{2\pi\varepsilon}\int_0^{\varepsilon} y\sin\left(\frac{2\pi}{\varepsilon}y\right)dy -$$
$$\left.-\frac{1}{16\pi^2}\int_0^{\varepsilon}\sin^2\left(\frac{2\pi}{\varepsilon}y\right)dy\right] = \frac{1}{2}\rho\eta\frac{v}{\varepsilon}. \quad (21)$$

Интегрирование этого уравнения даёт следующий результат:

$$2\varepsilon d\varepsilon = \frac{96\pi^2\eta}{(16\pi^2-27)v}dx,$$

откуда

$$\varepsilon = 2,69\sqrt{\frac{\eta x}{v}}; \quad (22)$$

$$\tau_0 = \frac{0,3717}{\sqrt{\frac{vx}{\eta}}}\rho\frac{v^2}{2}. \quad (23)$$

Для определения коэффициента C_{f_0} сопротивления трения эквивалентной плоской пластины воспользуемся известным соотношением

$$C_{f_0}\Omega\rho\frac{v^2}{2} = \frac{\Omega}{L}\int_0^L \tau_0 dx, \quad (24)$$

где Ω – площадь смоченной поверхности корпуса судна; L – длина судна.

Соотношение (24) с учётом выражения (23) позволяет получить следующую формулу:

$$C_{f_0} = \frac{0,7434}{\sqrt{Re}}. \quad (25)$$

Таким образом, есть все основания полагать, что результаты расчётов коэффициента трения C_{f_0} эквивалентной пластины по формулам, основанным на использовании противоречащей фундаментальным законам механики логарифмической зависимости распределения скоростей жидкости в пограничном слое, недостоверны, поскольку существенно превышают его действительные значения.

Однако вернёмся к определению основных закономерностей динамического взаимодействия корпуса судна с окружающей его водой. Равенства (14) позволяют сделать вывод о том, что в пределах пограничного слоя средняя удельная кинетическая энергия $\overline{E}_к$, приходящаяся на единицу массы как присоединённой жидкости, так и жидкости, обтекающей твёрдое тело, определяется выражением:

$$\overline{E}_к = \int \overline{v}_{пр} dv = \int \overline{v}_{обт} dv = 0{,}5 \int v dv = 0{,}25 v^2 \quad (26)$$

.

Следовательно, установившееся потенциальное движение вязкой жидкости в пограничном слое может быть описано уравнением:

$$\overline{E} = gz + \frac{p}{\rho} + 0{,}25 v^2 = const\,. \quad (27)$$

Здесь $\overline{E}$ – средняя удельная энергия, приходящаяся на единицу массы жидкости в пределах пограничного слоя;

z – аппликата рассматриваемой точки пограничного слоя относительно начала координат.

Уравнение (27) не противоречит закону сохранения энергии. Оно лишь свидетельствует о том, что в пограничном слое, согласно выражениям (8) и (26), часть кинетической энергии твёрдого тела (или внешнего потока) превращается в кинетическую энергию присоединённой жидкости. Кроме того, равенство (26) позволяет сделать вывод о том, что затраты энергии судна на преодоление сопротивления воды его движению численно равны энергетическим затратам на поддержание движения присоединенной жидкости.

В изложенном выше основное внимание было уделено анализу продольного обтекания судового корпуса реальной жидкостью. Однако нетрудно показать, что замена скорости судна v её составляющими v_x и v_y, а ординаты y нормалью n фактически не изменит выражений (3)–(14), то есть не изменит зависимости распределения скоростей частиц воды в пределах пограничного слоя как при продольном, так и при поперечном обтекании корпуса. Следовательно, и уравнение (27) описывает произвольное установившееся потенциальное движение вязкой жидкости в пределах пограничного слоя.

Литература

1. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов: Учебник. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
2. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 456 с.
3. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев; под ред. Г. Гроше и В. Циглера. – М.: Наука, 1980. – 976 с.

References

1. Vojtkunskij Ya.I. Soprotivlenie dvizheniyu sudov: Uchebnik. – 2-e izd., dop. i pererab. – L.: Sudostroenie, 1988. – 288 s.
2. Basin A.M. Hodkost' i upravlyaemost' sudov. – M.: Transport, 1977. – 456 s.
3. Bronshtejn, I.N. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov / I.N. Bronshtejn, K.A. Semendyaev; pod red. G. Groshe i V. Ciglera. – M.: Nauka, 1980. – 976 s.

УДК 656.62.052.4:[629.12:532.5]

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАХОДА СУДНА В ШЛЮЗ ПРИ БОЛЬШОМ СТЕСНЕНИИ ПОТОКА

Евгения Владимировна Зубкова
аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Александр Николаевич Клементьев
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Лобанов Василий Алексеевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волжский государственный университет водного транспорта»
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: lobbas@mail.ru
Роман Сергеевич Хвостов
кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: nnover86@mail.ru

Аннотация

В работе представлена математическая модель плоского движения судна при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины.

Отмечены гидродинамические явления характеризующие процесс захода в камеру шлюза. На основе уравнений Лагранжа II рода и кинетической энергии системы судно – жидкость получено уравнение плоского движения судна при заходе в камеру шлюза с предельно малыми запасами по ширине.

Изложена математическая модель движения судна с учетом кинематического уравнения траектории, уравнениями, характеризующими состояние потока обтекания, динамического уравнения движения воды в камере шлюза.

Показаны пути численного решения, а также с достаточной для практики точностью, при помощи ряда упрощающих допущений, аналитического решения математической модели движения судна при заходе в камеру шлюза.

Ключевые слова: судно, шлюз, процесс захода в камеру шлюза, критическая скорость, режим обтекания, математическая модель, кинематическая энергия системы судно – жидкость, уравнение Лагранжа II рода.

FEATURES OF MODELING THE PROCESS OF SHIP LOCKING AT LARGE RANGE OF RESTRICTION OF THE FLOW AREA SECTION

Evgenia V. Zubkova
Postgraduate Student of the Department of Navigation and Shipping Safety
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Alexander N. Klementyev
Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Ship Navigation and Safety
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru
Vasiliy A. Lobanov
the ass. professor, Dr. Sci. Tech.
the professor of navigation and safety navigation department
Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education
«Volga State University of Water Transport»
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation
e-mail: lobbas@mail.ru
Roman S. Khvostov
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Navigation and Safety
Volga State University of Water Transport

603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: nnover86@mail.ru

Abstract

The paper presents a mathematical model of the plane motion of a vessel when entering the lock chamber of extremely small width.

The hydrodynamic phenomena characterizing the process of entering the lock chamber are noted. On the basis of the Lagrange equations of the second kind and the kinetic energy of the ship-to-liquid system, the equation of the plane motion of the ship is obtained when entering the lock chamber with extremely small margins in width.

A mathematical model of the vessel motion is presented taking into account the kinematic equation of the trajectory, the equations characterizing the flow around a body state, the dynamic equation of water movement in the lock chamber.

The ways of numerical solution are shown, as well as with sufficient for practice accuracy, with the help of a number of simplifying assumptions, an analytical solution of the mathematical model of the vessel motion when entering the lock chamber.

Keywords: ship, lock, the process of entering the lock chamber, critical speed, flow mode, mathematical model, kinematic energy of the ship-liquid system, Lagrange equation of the second kind.

Introduction

In connection with the increase in ship's traffic through the Unified Deep Water System of European Russia (UDWS), the question of increasing the capacity of the locks arises.

The passing capacity of the lock is determined by the duration of the locking process:

- filling and emptying the lock chamber;

-opening and closing the lock's gate;

-maneuvering ships in process of entering and leaving the lock chamber.

Field observations show that the process of ships maneuvering takes 70% of the total time of lockage.

Obviously, for a specific lock, the main reserves of increase in carrying capacity should be look for in reducing the maneuvering time of ships.

The duration of entering and leaving time of the lock chamber depends on several factors:

- the maneuvering characteristics of ships (particularly, on the load per unit of power;

- the effectiveness of the steering gear;

- the entering and leaving speed.

An analysis of traffic accidents performed by ships in the area of hydroelectric complexes shows that about 45% of them occurred because of improper maneuvering and errors in the choice of speed.

It has been established that the main factor which characterizes the effect of a limited fairway on the resistance value of a ship moving through it is a coefficient which include the range of flow section.

So, for a large-tonnage ships proceed through the locks of the Volga-Baltic and Volga-Don canals, the range of restriction of the flow area section of the lock to the mid-section of the vessel reaches 80%, and in years of shallow water.

In this case, there are complex hydraulic phenomena causing a significant force acting on the ships, a sharp increase in longitudinal slopes and additional draft of the ships.

Often, when the entering speed is exceeded, a «suction effect» occurs, and when the ship is entering the lock chamber, she decreases a speed and may even stop or move backwards [9].

When the ship enters the lock, where there are large limitations in width and depth, hydrodynamic phenomena differ from the phenomena observed when the ship proceeds in shallow water or in a navigable channel. These phenomena are characterized by:

– high velocities in the stream flowing around the vessel, which arise due to the decrease of the chamber section by the ship's hull;

– increasing the water level in front of the ship's bow when entering the lock chamber;

– movement in the lock chamber is carried out with a time variable trim.

As a consequence, the friction drag increases (due to increase of flow speed) and wave resistance (due to the transformation of waves). Experimental research [1] showed that the wave resistance is dominant when the vessel enters the lock-chamber.

The conditions in the flow stream can be considered as turbulent [2] due to large local disturbances and unsteady motion of the vessel. The noted hydrodynamic effects influence the additional draft of the vessel.

1. Determination the critical flow velocity for rectangular sections

Full-scale observations [4,5] showed that large-tonnage vessels move when entering the lock at the first critical speed. Its can be explained by inertia force added to propulsors thrust, and the value of the first critical speed in a short area of movement falls from 4 to- 7 times as compared with its value in approach channel due to a sharp decrease of the flow area section and increase of ship hull flow velocity .

As it is well known from the theory of hydraulics [3] that the critical flow velocity is determined for rectangular sections by the formula:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{g\left(F_к - \Omega_с\right)}{B_к}}\,, \qquad (1)$$

where g – acceleration of gravity, м/s^2;

$F_к$ – the area of the water section of the lock chamber, м^2,

$\Omega_с$ – area of the submerged part of the vessel, м^2;

$B_к$ – breadth of the lock chamber, м.

Simple calculations show that, for example, for m/v «Volga – Don» when she is entering the locks of the Volga - Don and Volga - Baltic canals (breadth 18 m) with a under keel clearance of 30 cm, the critical speed value is 2,4 m/s .

2. Mathematical model of the plane movement of the vessel when entering the lock chamber

Thus, the difference between the mathematical model of the process of entering the gateway chamber differs from the traditional model is that the hydrodynamic characteristics of both the inertial (coupled masses) and non-inertial ones depend additionally on vessel's position relative to the lock (ie, on instantaneous coordinates of the system).

The position of the vessel during the approach at any time is determined by the generalized coordinates of the center of mass (G): $q_1 = x_0$; $q_2 = y_0$ and angle of the course $q_3 = \Theta$.

Lets consider the process of entering into the lock chamber with minimum margins in width (i.e. $B_c / B_к$ = 0,9). In this case, the transverse displacement of the vessel in the chamber and the course change can be excluded from consideration .

Then the position of the vessel in the lock chamber will be determined only by the generalized coordinate $q_1 = x_0$. A generalized velocity (in a fixed coordinate system X_0OY_0) can be represented as:

$$q_1 = v_x = \frac{dx_0}{dt}. \qquad (2)$$

Let us imagine the total forces acting on a ship in the form:

$$X = T_E - X_\infty - X_{шп}, \qquad (3)$$

where X_∞ – ship's hull force in deep water;

$X_{шп}$ – additional force on the ship's hull , which occurs in the lock. (Its depend not only on the speed, but also on the position of the vessel in the lock chamber at each time point)

In this way, $X_{шп} = f(v_x, x_0)$.

To obtain the equation of motion, we use the Lagrange equation II class from analytic mechanics :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_c}{\partial q_1}\right) - \frac{\partial T_c}{\partial q_1} = \overline{Q_i}. \qquad (4)$$

We assume that the kinematic energy of the ship-liquid system in this case is determined by the expression:

$$T_c = T_{c\infty} + T_{шп}, \qquad (5)$$

where $T_{c\infty} = f(v_x)$; $T_{шп} = f(v_x, x_0)$.

Derivation of kinetic energy is given by:

$$\frac{\partial T_c}{\partial v_x} = (m + \lambda_{11\infty})v_x + \lambda_{11_{шп}} v_x. \qquad (6)$$

Derivation of kinetic energy due to the influence of the lock, according to the generalized coordinate is given by:

$$\frac{dT_{шп}}{dx_0} = 0{,}5\lambda_{11_{шп}}^{(x_0)} v_x^2. \qquad (7)$$

As a $\lambda_{11_{шп}}$ depends on time t through the coordinates x_0 , the expression for the kinetic energy (5) can be represented in the form:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_c}{\partial v_x}\right) = \\ = (m + \lambda_{11\infty})\frac{dv_x}{dt} + \lambda_{11_{шп}}\frac{dv_x}{dt} + 0{,}5\lambda_{11_{шп}}^{(x_0)} v_x^2 \qquad (8)$$

Substituting (8) into (4) and performing the necessary transformations, we obtain the equation of the plane motion of the vessel upon entering the lock chamber with extremely small resource in width:

$$(m + \lambda_{11\infty})\frac{dv_x}{dt} + \lambda_{11_{шп}}\frac{dv_x}{dt} + 0{,}5v_x^2\lambda_{11_{шп}}^{(x_0)} = \\ = T_E - X_\infty - X_{шп}. \qquad (9)$$

Due to the specific of the definition of additional forces, the equation of motion can not be solved as in the traditional model with relative to velocity without taking into account the equation of the trajectory. To close the mathematical model (10), it is necessary to add the kinematic equation in the form:

$$\frac{dx_0}{dt} = v_x. \qquad (10)$$

In addition, in connection with the hydrodynamic features noted above, accompanying the ship's entering into the lock, the equations of motion (9) and (10) need to be supplemented by equations characterizing the state of the flow stream, which also determines the kinematics of the maneuver.

Since under the conditions when the transverse dimensions of the ship and the lock chamber are small in comparison with the longitudinal ones, and the transverse disturbances are extremely insignificant, we will consider the motion in the direction of the longitudinal axis of the chamber. In this case, one can apply the «theory of shallow water» [6], assuming that all quantities that determine the movement of water depend only on the coordinate (x) and time (t). As these estimated values can be taken as the flow rate $Q(x,t)$ and its ordinate is free surfaces $\xi(x,t)$. Both these functions will be assumed to be continuous and differentiable.

In the presence of fluid flow, the dynamic effect is expressed in the form of an additional water level difference. The equation of continuity in this case can be written in the form [7]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \qquad (11)$$

where $Q = u_x\Omega_c$;

u_x – longitudinal velocity of flow;

Ω – cross-flow area water in the area under consideration;

$\Omega = f(x, \xi, z_0)$ – area in the free area of the chamber;

$\Omega = F_к - \Omega_c + B(x_0 - \Delta\xi)$ – area on a site occupied by a ship;

q – water flow rate over the vessels hull during entering in the lock.

The dynamic equation of water movement in the chamber for the extracted volume can be represented in the form [8]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{\Omega}\right) + g\Omega\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \qquad (12)$$

This equation is the equation of long waves in the lock chamber with outflow along the length.

Thus, equations (9) - (12) represent a mathematical model of vessel motion when entering a lock chamber. The unknowns in this mathematical model are: x_0 , v_x , Q , ξ .

For a one-digit solution of the problem, the basic unknowns must satisfy the additional conditions:

– initial (with t = 0);

– boundary (with x = 0 and $x = l$).

Here l – the length of the concerned section in the lock.

Conclusion

This problem can only be solved numerically in its complete formulation. However, the main regularities with sufficient accuracy for practice can be obtained with the help of a number of simplifying assumptions that allow us to find an analytical solution.

Литература:

1. Дорофеев , В.В. Гидравлическое исследование процесса ввода судна в камеру шлюза / Г.И. Мелконян, В.В. Дорофеев // Тр. ЛИВТ. – 1971. – ч.1. – с.33-43.
2. Кирьяков С.С. Современное состояние теории расчета дополнительной осадки судов при движении в шлюзах / С.С. Кирьяков// Тр. ЛИВТ. – 1972. – Вып.132 – с.144- 154.
3. Михайлов, А.В. Водные пути и порты Текст : учебник / А. В. Михайлов, С. Н. Левачев. - М. : Высш.школа, 1982.
4. Клементьев, А.Н., Исследование и моделирование особенностей процесса захода судна в камеру шлюза / А.Д. Васянин А.Н. Клементьев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.- 2009. - № 26. С. 31-34.
5. Клементьев, А.Н., Результаты натурных наблюдений по определению скоростей захода (выхода) судов в шлюзы Горьковского гидроузла / А.Н. Клементьев, П.Н. Токарев // Деп. в ЦБНТИ Минречфлота РСФСР № 229- РФ.
6. Коротков С.Н. Анализ и метод определения характеристик движения речных судов в каналах. Автореферат дисс. на соискание степ. к.т.н. Л.: 1985, с.18.
7. Седов, Л.И. Механика сплошной среды Текст : учебник. Т.1 / Л. И. Седов. - 3-е изд.,испр.и доп. - М. : Наука, 1976. - 536 с.
8. Васильев, О.Ф. Присоединенная масса жидкости для судна в камере судоходного сооружения. /О.Ф. Васильев // Прикладная механика и теоретическая физика. – 1961.– № 2.– с.61- 71.
9. Комиссаров, В.А. Особенности маневрирования при проводке судна через шлюз с большим коэффициентом стесненности камеры корпусом судна / Н.М. Комиссаров, М.Н. Чуркин // - Речной транспорт. – 1967. №2 с.40-42.

References:

1. 1. *Dorofeev , V.V.* Gidravlicheskoe issledovanie processa vvoda sudna v kameru shlyuza G.I. Melkonyan, V.V. Dorofeev Tr. LIVT. – 1971. – ch.1. – s.33-43.
2. *Kir'yakov S.S.* Sovremennoe sostoyanie teorii rascheta dopolnitel'noj osadki sudov pri dvizhenii v shlyuzah S.S. Kir'yakov Tr. LIVT. – 1972. – Vyp.132 – s.144- 154.
3. *Mihajlov, A.V.* Vodnye puti i porty Tekst : uchebnik A. V. Mihajlov, S. N. Levachev. - M. : Vyssh.shkola, 1982.
4. *Klement'ev, A.N.,* Issledovanie i modelirovanie osobennostej processa zahoda sudna v kameru shlyuza A.D. Vasyanin A.N. Klement'ev Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta.- 2009. - № 26. S. 31-34.
5. *Klement'ev, A.N.,* Rezul'taty naturnyh nablyudenij po opredeleniyu skorostej zahoda (vyhoda) sudov v shlyuzy Gor'kovskogo gidrouzla A.N. Klement'ev, P.N. Tokarev Dep. v CBNTI Minrechflota RSFSR № 229- RF.
6. *Korotkov S.N.* Analiz i metod opredeleniya harakteristik dvizheniya rechnyh sudov v kanalah. Avtoreferat diss. na soiskanie step. k.t.n. L.: 1985, s.18.
7. *Sedov, L.I.* Mekhanika sploshnoj sredy Tekst : uchebnik. T.1 L. I. Sedov. - 3-e izd.,ispr.i dop. - M. : Nauka, 1976. - 536 s.
8. *Vasil'ev, O.F.* Prisoedinennaya massa zhidkosti dlya sudna v kamere sudohodnogo sooruzheniya. O.F. Vasil'ev Prikladnaya mekhanika i teoreticheskaya fizika. – 1961.– № 2.– s.61- 71.
9. *Komissarov, V.A.* Osobennosti manevrirovaniya pri provodke sudna cherez shlyuz s bol'shim koehfficientom stesnennosti kamery korpusom sudna N.M. Komissarov, M.N. CHurkin - Rechnoj transport. – 1967. №2 s.40-42.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 626.4:532.52

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В ТРАНСПОРТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Игорь Викторович Липатов
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5
e-mail: i_lipatov@mail.ru
Александр Николаевич Ситнов
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru
Олег Ильич Чичкин
Заведующий лабораторией кафедры водных путей и гидротехнических сооружений
Волжский государственный университет водного транспорта
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5
e-mail: chichkin_95@mail.ru

Аннотация

В статье представлен новый подход к анализу работы и конструированию элементов гашения энергии потока воды на гидротехнических сооружениях. В качестве объекта исследования авторами принята камера гашения энергии потока судоходного шлюза с головной системой питания.

Методом решения задачи является численное моделирование гидродинамики потока, проходящего через камеру гашения, эффективность работы которой оценивается в разработанном аналитическом способе количественного анализа энергии импульса водного потока.

Для решения задачи с использованием положений второго закона Ньютона получены векторные уравнения определения баланса внутреннего импульса потока. В качестве учитываемых факторов при составлении баланса энергии приняты: конвергенция потока внутри камеры гашения; внешние источники массы среды; внешние усилия по контуру исследуемой области; гравитация и совокупность внутренних сил (кавитация, аэрация, сжимаемость потока). Для удобства анализа расчетных величин использованы векторно-топографические диаграммы, наглядно и информативно показывающие пути оптимизации и совершенствования работы системы гасительных элементов.

Предложенная методика апробирована на примере анализа эффективности работы камеры гашения при устройстве в ней балки гашения в двух вариантах конструкции и местоположения. Дана оценка предложенных решений на базе разработанного аналитического подхода.

Ключевые слова: Судоходный шлюз, камера гашения. уравнения Навье-Стокса, закон сохранения импульса, балка гашения, потеря энергии, шлюзование судна.

ANALYTICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF OPERATION EFFICIENCY OF THE ELEMENTS OF ENERGY DISSIPATION IN TRANSPORT HYDROTECHNICAL FACILITIES

Igor V. Lipatov
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: i_lipatov@mail.ru
Alexander N. Sitnov
Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Waterways and Hydraulic Structures
Volga State University of Water Transport
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru
Oleg I. Chichkin
Head of the Laboratory of the Department of Waterways and Hydraulic Structures
Volga State University of Water Transport

603950, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5
e-mail: chichkin_95@mail.ru

Abstract

The article presents a new approach to the analysis of operation and design of elements for water energy dissipation in hydraulic structures. As a facility of study, the authors adopted a stilling basin for energy dissipation of a shipping lock with filling and emptying “through the heads” system.

The method of solving the problem is the numerical simulation of hydrodynamics of the flow passing through the stilling basin, the efficiency of which is assessed in the developed analytical method for the quantitative analysis of the momentum energy of water flow.

To solve the problem using the provisions of the second Newton's law, the vector equations for determining the balance of the internal flow momentum are obtained. The following factors were taken into account when drawing up the energy balance: convergence of flow inside the stilling basin; external sources of medium mass; external forces along the contour of the studied area; gravity and the synergy of internal forces (cavitation, aeration, compressibility of flow). For the convenience of analyzing the calculated values, vector topographic diagrams were used, which visually and informatively show ways to optimize and improve operation of the stilling elements system.

The proposed method was tested on the example of effectiveness of stilling basin analysis when the stilling beam is arranged in the basin with two options of design and location. An assessment of the proposed solutions based on the developed analytical approach is given.

Keywords: Shipping lock, stilling basin, Navier-Stokes equations, the law of conservation of momentum, stilling beam, energy loss, ship's locking.

Введение

Гидротехнические сооружения являются неотъемлемой частью Единой глубоководной системы Европейской части России. Решая энергетические, транспортные и другие народно-хозяйственные задачи гидроузлами создается локальный напор воды в своем створе, который трансформирует водный поток из верхнего бьефа в нижний и сопровождается переходом потенциальной энергии потока в кинетическую. Львиная доля этой энергии перенаправляется на лопасти гидротурбин и генерирует электроэнергию. Часть потока вхолостую сбрасывается в нижний бьеф или используется для транспортных нужд, в хозяйственных и других целях.

Высокие градиенты скоростей потока воды, сбрасываемой в нижний бьеф, активизируют эрозионные процессы в донной и боковой частях русла, а также подмывают фундаменты бетонных конструкций гидроузла. Для борьбы с этими негативными явлениями нижний бьеф укрепляется железобетонными конструкциями и создается сложная конструкция системы гасителей энергии потока в воднотранспортных гидротехнических сооружениях – шлюзах.

Поток, попадающий в камеру шлюза в процессе ее наполнения при головной системе питания, образует волну. Сложная картина прямых и обратных волн в камере негативно влияет на безопасность отстоя судна и в целом на интенсивность судоходства на шлюзованном участке. Поэтому для минимизации отрицательного воздействия волн головные системы питания шлюза обязательно оборудуются таким элементом как камера гашения.

От эффективности работы гасительных устройств, определяемой характером взаимодействия гидротехнического сооружения с потоком, зависит эффективность и безопасность эксплуатации судна и шлюза. Традиционно задача оценки эффективности решалась с помощью лабораторного эксперимента или анализом работы объектов – аналогов. При этом объект изучался как «черный ящик», на входе которого задаются исходные параметры и фиксируется отклик системы на воздействие водного потока. В этом случае из рассмотрения полностью выпадает физическая картина и характер гидродинамических процессов. В результате окончательное решение принималось на основе случайно полученного более или менее приемлемого решения, зачастую весьма далекого от оптимального. Такой технологии получения требуемых решений свойственны недостатки лабораторных экспериментов (некорректности масштабного фактора, условности воспроизведения ряда ключевых параметров, погрешности измерений точечных параметров и т.д.); невозможность измерения многих параметров как по экономическим, так и техническим соображениям и сложность многовариантного рассмотрения решений.

Выходом из затруднительного положения может стать применение современных методов исследования на базе инновационных подходов к решению задачи. В данной статье предлагается использовать в качестве такого подхода численное моделирование сложных гидродинамических процессов. Это дает возможность выполнить анализ как точечных, так и интегральных энергетических характеристик, сопровождающих процесс гашения энергии воды; позволит на качественно новом уровне проанализировать процесс гашения энергии потока на гидротехнических сооружениях и наметить пути его совершенствования.

Из теории и практики гидротехники известно, что наиболее сложная ситуация с гашением энергии наблюдается на судоходных шлюзах с головной системой наполнения. Вода с верхнего подходного канала из под рабочих ворот попадает в камеру гашения, а затем в ту часть камеры, где находится шлюзующееся судно (рис. 1). В процессе перетекания воды из подходного канала поток соскальзывает с напорной грани рабочих ворот и порога верхней головы камеры шлюза. В результате образуются циркуляционные зоны 7 и 8, а также водоворотная зона 6. Наличие циркуляционных зон 7 и 8 значительно активизирует турбулентные процессы в данных областях, забирая часть энергии потока, которая активно из потенциальной переходит в кинетическую.

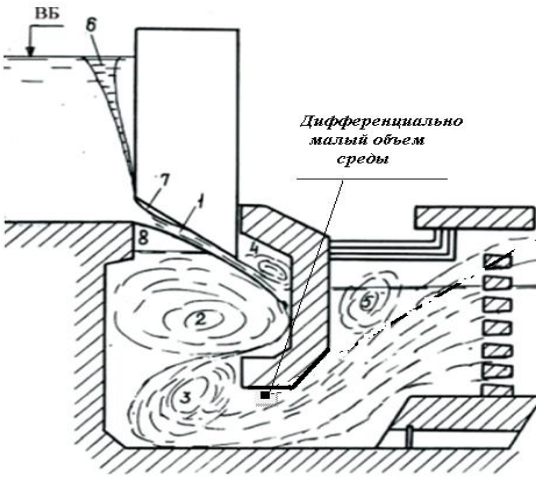


Рис. 1 Фрагмент камеры шлюза у верхней головы

Поток под рабочими воротами концентрируется в струю, которая ударяется о гасящий экран. В результате часть импульса энергии отбивается в виде реакции бетонной конструкции гасительного экрана. Одновременно с этим формируется кинематическая структура попадающего в камеру гашения и проходящего ее потока и образуются турбулентные вихри 2, 3, 4, 5. После удара о гасительный экран поток перенаправляется на стенку падения и поворачивается на дно камеры гашения в области гасительного колодца. Выходя из него, поток отдает часть своей энергии балкам гашения и окончательно выходит в камеру шлюза.

Потенциальная энергия воды, подающаяся в камеру из верхнего подходного канала, трансформируется в кинетическую энергию и значительно увеличивается из-за резкого роста скорости потока в отдельных точках. При этом энергия потока частично теряется: в турбулентных вихрях из-за специфики кинематической структуры потока; при ударе о гасительные и конструктивные элементы (обмен импульсом силы при контакте потока с бетоном); в кавитационных, аэрационных и прочих явлениях. В зависимости от того, насколько камера гашения активно забирает энергию у транзитного потока, оценивается эффективность ее работы и качество работы шлюза в целом. Последнее выражается через интенсивность волновых процессов и условия отстоя судна в камере при шлюзовании, которыми определяется время шлюзования судна, влияющее на показатели его работы, и безопасность нахождения судна в камере.

2. Постановка задачи и вывод расчетных зависимостей

Проанализируем динамику изменения энергии потока, проходящего через камеру гашения. Для этого рассмотрим элементарный объем потока dV (рис. 2) при движении которого закон сохранения импульса на основе положений второго закона Ньютона можно записать в виде:

$$(\rho \cdot \vec{v}) = (\sum \vec{F}) \cdot dt, \qquad (1)$$

где : ρ – плотность среды в точке дифференциально малого объема *dV;*

$\vec{v}$ - вектор скорости точки ;

$\sum \vec{F}$ - суммарный вектор сил в точке дифференциально малого объема.

Рассматриваемый поток ограничивается непроницаемыми стенками. Внутри исследуемой области нет никаких внутренних источников жидкости и среда рассматривается как несжимаемая. Основным источником импульса (количества движения) в расчетную область является конвергентный перенос количества движения с границ расчетной области (*M*) и внешние силы, действующие на границах (*F*). Эти два фактора изменяют суммарный импульс системы с учетом знака их действия. Помимо этого, каждая частица потока подвергается воздействию внешнего гравитационного силового поля (*g*) и группы внутренних сил, отнимающих часть импульса у частиц (турбулентные, аэрационные, кавитационные). Среди напряжений указанных сил выделяется вязкостное напряжение, распределенное по длине потока и являющееся результатом турбулизации потока; распределенное напряжение, возникающие в результате взаимодействия водной и воздушной фаз потока; аэрационное, кавитационное напряжения.

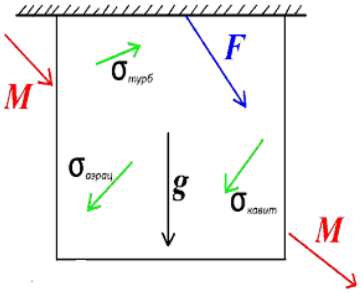


Рис. 2 Воздействие на дифференциально малый объем потока

С точки зрения последующего анализа сил, действующих на шлюзующееся судно, принципиальным является только сам факт увеличения или уменьшения суммарного количества энергии импульса в потоке. При снижении суммарной величины импульса потока, покидающего камеру гашения и перетекающего в основную часть камеры шлюза, его энергия уменьшается и следует ожидать уменьшения величины волнового гидродинамического воздействия на судно. В случае увеличения суммарного импульса безопасность и условия отстоя судна в процессе наполнения камеры ухудшаются.

Таким образом, отпадает принципиальная необходимость в анализе исходной природы внутренних усилий и появляется возможность их объединения в одну интегральную величину. Условно будем называть это усилие внутренним. Очевидно, что основными по величине будут турбулентные напряжения, но и влиянием аэрационных, кавитационных и прочих составляющих вряд ли стоит пренебрегать. Это следует из практического опыта, хотя из-за сложности явления оно очень слабо изучено на натуре. Попытки численного моделирования этих процессов упираются в необходимость привлечения значительного вычислительного ресурса, пока недоступного рядовому исследователю.

Резюмируя вышеприведенные соображения принимаем, что суммарное изменение импульса в произвольной точке потока по камере гашения будет определяться как сумма конвергентного переноса количества движения в расчетную область и импульса от действия внешних сил на границах, увеличенное на воздействие внешнего гравитационного силового поля за вычетом импульса внутренних сил. Суммарное значение импульса в системе будет складываться из величин импульса в каждой точке потока посредством интегрирования по объему расчетной области. Для удобства работы преобразуем формулу (1) и проинтегрируем каждую составляющую по объему *V* (контуру поверхности *S*). В результате общее уравнение сохранения импульса во всем потоке камеры гашения запишется в следующем виде:

$$-\iiint_{\mathbb{V}} \frac{d(\rho\vec{v})}{dt} dV = \iint_{S} |\vec{v}| \cdot (\rho\vec{v}) d\vec{S} + \iint_{s} (p)\, d\vec{S} + \iiint_{\mathbb{V}} \rho\vec{q}\, dV - \iiint_{\mathbb{V}} q_{\text{свн}}\, dV \quad (2)$$

Анализ размерностей всех пяти составляющих формулы (2) показывает, что они имеют размерность в единицах силы (в ньютонах).

Преобразуем составляющие формулы (2) с целью дальнейшего вычисления величины внутренних сил, уменьшающих импульс потока, проходящего через камеру гашения. Для преобразования первой составляющей воспользуемся теоремой Остроградского-Гаусса [10] и тем, что поле плотностей является скалярным, а скорость – векторным полем :

$$\begin{aligned}
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{d(\rho\vec{v})}{dt} dV = \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho\vec{v})\partial x}{\partial x\, \partial t} dV + \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho\vec{v})\partial y}{\partial y\, \partial t} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho\vec{v})\partial z}{\partial z\, \partial t} dV == \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial\rho\vec{v}}{\partial t} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_x)\, v_x}{\partial x} dV + \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_x)\, v_y}{\partial y} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_x)\, v_z}{\partial z} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_y)\, v_x}{\partial x} dV \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_y)\, v_y}{\partial y} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_y)\, v_z}{\partial z} dV + + \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_z)\, v_x}{\partial x} dV + \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_z)\, v_y}{\partial y} dV + \iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial(\rho v_z)\, v_z}{\partial z} dV = \\
&\iiint_{\mathbb{V}} \frac{\partial\rho\vec{v}}{\partial t} dV + \iiint_{\mathbb{V}} \left([grad(\rho v_x) \cdot (\vec{v})] + \right. \\
&\left. [grad(\rho v_y) \cdot (\vec{v})] + [grad(\rho v_z) \cdot (\vec{v})]\right) dV
\end{aligned} \quad (3)$$

Так как предполагается исследовать квазистационарное состояние потока в тот момент, когда система достигнет стационарного состояния, дифференциал по времени будет равен нулю. В связи с этим первую составляющую в формуле (2) с учетом формулы (3) можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned}
&\frac{\iiint_{\mathbb{V}} d(\rho\cdot\vec{v})dV}{dt} = \iiint_{\mathbb{V}} [(grad(\rho) \cdot v_x + grad(v_x) \cdot \\
&\rho)] \cdot \vec{v}\, dV + \iiint_{\mathbb{V}} [(grad(\rho) \cdot v_y + grad(v_y) \cdot \\
&\rho)] \cdot \vec{v}\, dV + \iiint_{\mathbb{V}} [(grad(\rho) \cdot v_z + grad(v_z) \cdot \\
&\rho)] \cdot \vec{v}\, dV
\end{aligned} \quad (4)$$

Вторую составляющую преобразуем следующим образом :

$$\begin{aligned}
\iint_{S} |\vec{v}| \cdot (\rho\vec{v}) d\vec{S} &= \iint_{S} |v_x| (\rho v_x) dS_x \\
&+ \iint_{S} |v_y| (\rho v_y) dS_y + \\
\iint_{S} |v_z| (\rho v_z) dS_z &= \iint_{S} (|v_x| \cdot M) dS_x \\
&+ \iint_{S} (|v_y| \cdot M) dS_y + \\
\iint_{S} (|v_z| \cdot M) dS_z,&
\end{aligned} \quad (5)$$

где: *M* - массовый расход через граничную область [кг/(м^2·с)].

Третью составляющую приведем к виду :

$$\iint_{s} (p)\, d\vec{S} = \iint_{S} p dS_x + \iint_{S} p dS_y + \iint_{S} p\, dS_z = \sum F_x + \sum F_y + \sum F_z \quad (6)$$

Четвертая составляющая, описывающая воздействие гравитационного поля, преобразуется к следующему виду :

$$\iiint_{\mathbb{V}} \rho\vec{g}\, dV = \iiint_{\mathbb{V}} \rho\vec{0}\, dV + \iiint_{\mathbb{V}} \rho\vec{q}\, dV + \iiint_{\mathbb{V}} \rho\vec{0}\, dV = m\vec{0} - m\vec{g} + m\vec{0} \quad (7)$$

Последняя составляющая, с помощью которой предполагается оценивать гасящий эффект конструкции, находится по следующему выражению :

$$\iiint_{\mathbb{V}} q_{\text{свн}}\, dV = \vec{F}_{x\text{свн}} + \vec{F}_{y\text{свн}} + \vec{F}_{z\text{свн}} \quad (8)$$

Систематизируем формулы (3) – (8) с целью получения окончательных значений сил $\vec{F}$ по координатам x, y, z:

$$\begin{aligned}
&\vec{F}_{x\text{свн}} = \iiint_{V} \nabla_{\text{x}}(\rho v_x)\, dV + \iint_{S} (|v_x| \cdot M) dS_x + \\
&\iint_{S} p dS_x - 0 = \iiint_{V} \text{grad}(\rho v_x) \cdot (\vec{v})\, dV + \\
&\sum |v_x| \cdot M + \sum F_x \\
&\vec{F}_{y\text{свн}} = \iiint_{V} \nabla_{\text{y}}(\rho v_y)\, dV + \iint_{S} (|v_y| \cdot M) dS_y + \\
&\iint_{S} p dS_y + m\vec{g} = \iiint_{V} \text{grad}(\rho v_y) \cdot (\vec{v}) dV + \\
&\sum |v_y| \cdot M + \sum F_y + m\vec{g} \\
&\vec{F}_{z\text{свн}} = \iiint_{V} \nabla_{\text{z}}(\rho v_z)\, dV + \iint_{S} (|v_z| \cdot M) dS_z + \\
&\iint_{S} p dS_z - 0 = \iiint_{V} \text{grad}(\rho v_z) \cdot (\vec{v})\, dV + \\
&\sum |v_z| \cdot M + \sum F_z
\end{aligned} \quad (9)$$

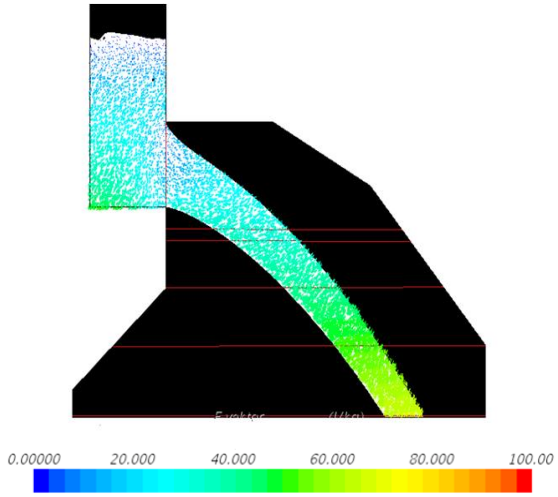
3. Результаты расчетов и практическая апробация

Данный подход был апробирован авторами на примере анализа эффективности работы горизонтальной балки гашения, расположенной в центре гасительной камеры (двухмерный случай). В

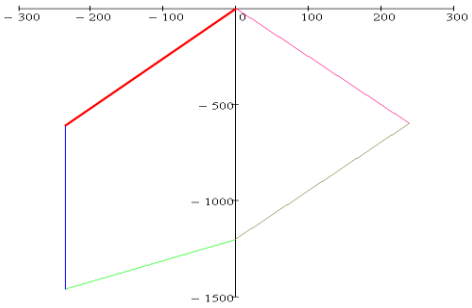
исходном состоянии (см. рис. 3). поток из верхнего подходного канала попадает в камеру гашения через входное вертикальное отверстие. Далее в виде свободной струи поток перемещается по камере гашения и покидает ее через нижнее горизонтальное сечение. Кинематическая и энергическая структуры потока получаются из численного решения уравнений Навье-Стокса, дополненных высокорейнольдсовской гипотезой турбулентности и уравнением маркера сред (VOF скаляр) [4,6,7.8]. Последний показывает характер распределения сред «вода-воздух» [5]. Решение выполнялось с помощью метода контрольных объемов, который описан в литературе [1,2,9]. Обработка данных, полученных численным моделированием, производится предложенным методом (формула (9)).

Так как струя при падении не встречает никаких преград, то вся ее потенциальная и кинетическая энергия идет на увеличение импульса энергии исследуемой среды. При работе с формулой (9) придется иметь дело с векторными величинами. Поэтому для наглядности и удобства анализа численные результаты систематизируем в виде векторно-топографических диаграмм силовых компонент, присутствующих в исследуемой области. Подобный подход часто применяется в электротехнике для анализа энергетических потенциалов в различных точках электрической цепи [3].

а) Удельная энергия в потоке (Дж/кг)



б) Векторно-топографическая диаграмма импульсов усилий в потоке



Конвергенция внутри области
Внешние источники массы среды
Внешние усилия по контуру
Гравитация
Внутренние силы

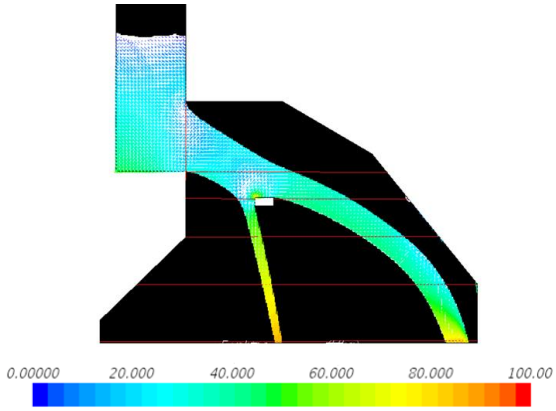
Рис. 3 Истечение струи без гасителей

Векторно-топографическая диаграмма представляет собой отображение геометрической суммы векторов усилий, воздействующих на исследуемое пространство. Если весь импульс (вся энергия) сосредотачивается и гасится в границах исследуемого пространства, то все четыре вектора в правой части формулы (9) начинаются и заканчиваются в одной точке. Такой случай будет идеальным с точки зрения гашения энергии. Если часть энергетического импульса не гасится, то величина вектора импульса внутренних становится отличной от нуля. Модуль вектора внутренних сил является оценкой эффективности гасящего эффекта камеры, а его компоненты показывают оптимальные пути по его минимизации.

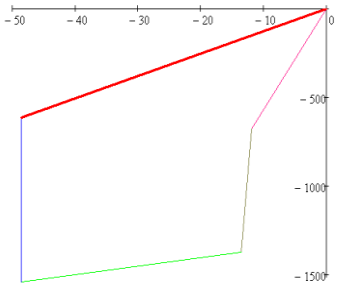
Как видно из рис.3 свободный импульс внутренних сил при свободном истечении из отверстия равен 654 н·с (F_x= -242 н·с; F_y=-607 н·с). В первую очередь это объясняется тем, что струя в своем падении не испытывает никаких препятствий и внутренние конвергентные процессы внутри струи минимальны.

Для минимизации величины импульса внутренних сил и усиления функциональных свойств камеры гашения, в область свободного падения струи поместим горизонтальную балку шириной 0.5 м. Результаты исследования энергии и импульса движущегося потока представлены на рис. 4.

а) Удельная энергия в потоке (Дж/кг)



б) Векторно-топографическая диаграмма импульсов усилий в потоке



Конвергенция внутри области
Внешние источники массы среды
Внешние усилия по контуру
Гравитация
Внутренние силы

Рис. 4 Истечение струи с гашением о балку

Как видно из рис.4 векторно-топографическая диаграмма имеет принципиально новое очертание. В процессе обтекания балки в границах свободной струи стали формироваться турбулентные вихревые зоны и области отрыва потока. Специфика этих гидродинамических явлений резко изменила конвергентную составляющую. Если при свободном истечении горизонтальная составляющая этого слагаемого равнялась 242 н·с, то при обтекании балки она уменьшилась до -12 н·с. В тоже время импульс от внешних источников также существенно уменьшился. В первую очередь это связано с тем, что поток покидает расчетную область будучи разделенным на две струи. Такое разделение ведет к диссипации массовых потоков импульса и более интенсивной потере энергии в среде.

Характер поведения вертикальной составляющей импульса конвергентного слагаемого и внешнего источника массы практически неизменны. Это связано с доминирующим влиянием потенциальной энергии в вертикальном направлении и нулевым влиянием вдоль горизонтальной оси. При этом на шлюзующееся судно наиболее значимое воздействие оказывает горизонтальная составляющая импульса, так как именно она срывает судно со швартовых. Помимо этого, вертикальное воздействие от импульса среды безболезненно компенсируется смещением судна вверх и значительными масса- инерционными характеристиками корпуса судна.

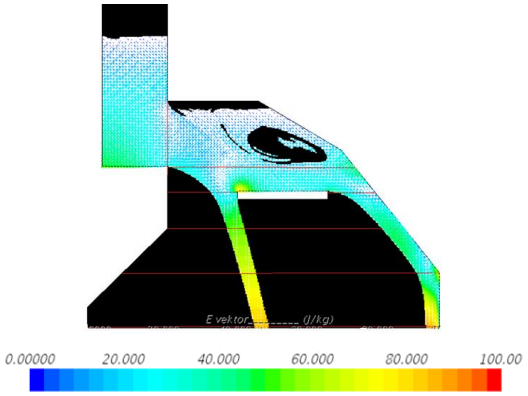
При обтекании балки на исследуемый поток начинает воздействовать дополнительная реакция, которая идет как со стороны верхней горизонтальной части балки, так и со стороны левой грани. В результате величина вертикальной составляющей импульса от воздействия внешних сил уменьшается в 1.5 раза (с -252 н·с до -168 н·с), а горизонтальной составляющей- в 6.6 раза (с -233 н·с до -35 н·с).

Величина гравитационной составляющей как в базовом, так и в рассматриваемом вариантах практически не изменяется, что объясняется нулевым значением горизонтальной составляющей ускорения свободного падения и параметрами объемно-весового фактора состояния среды в вертикальной составляющей. Как видно из рис. 3 и 4 объем воды, заполняющий расчетную область, в обоих вариантах существенно не различается.

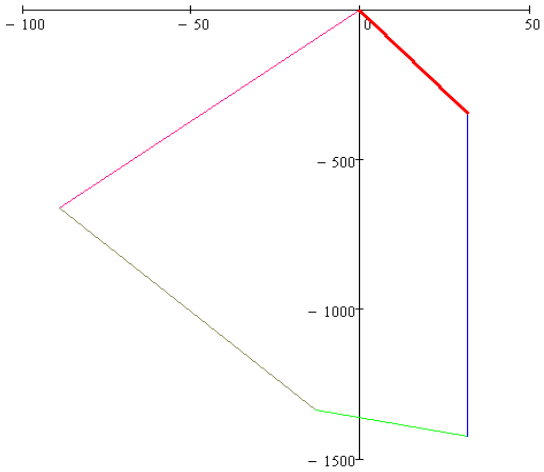
Поэтому в результате добавления балки гашения в существующую конструкцию камеры горизонтальная составляющая импульса потока изменяется с -242 н·с до -49 н·с, что благотворно скажется на условиях отстоя судна в камере шлюза.

С целью возможного дальнейшего улучшения гасительных свойств конструкции камеры был рассмотрен еще один вариант модификации горизонтальной балки гашения с увеличением ее ширины до 2.5 м. Результаты моделирования иллюстрированы данными рис. 5.

а) Удельная энергия в потоке (Дж/кг)



б) Векторно-топографическая диаграмма импульсов усилий в потоке



Конвергенция внутри области
Внешние источники массы среды
Внешние усилия по контуру
Гравитация
Внутренние силы

Рис. 5 Истечение струи с гашением об уширенную балку

Как видно из рис.5 поведение потока в камере гашения имеет принципиально другой характер, при котором в камере замедляется движение значительного количества воды. В надбалочной области формируется большая турбулентная зона и ее вращение существенно активизирует конвергентные потоки. Как и в предыдущем случае (рис. 4) поток с двух сторон обтекает балку, однако в варианте с уширенной балкой поток не только

диссипирует энергию на две части, но и стекает по границе бетона.

В результате горизонтальная составляющая конвергирующей компоненты импульса изменяется с -12 н·с до -89 н·с (без гасителей она составляет 239 н·с). Это объясняется следующими факторами: из-за дополнительных реакций со стороны правой бетонной стенки камеры гашения увеличивается отъем импульса в результате действия внешних сил по контуру; возрастает реакция со стороны уширенной балки гашения; увеличивается импульс от гравитационной силы со стороны среды, заполняющей исследуемую область. В результате импульс внутренних сил, действующих в камере гашения, уменьшается до 370 н·с (F_x = 32 н·с ; F_y=-345 н·с) против 654 н·с в исходном варианте и 615 н·с при узкой балке.

Заключение

Таким образом, использование предложенного подхода позволяет без дорогостоящих экспериментов проанализировать гасящие свойства конструкции камеры гашения и осуществлять варианты ее оптимизации, а полученные в формуле (9) выражения - определять силовую характеристику энергетического потенциала потока, изменяющегося при его перемещении из верхнего подходного канала в камеру шлюза. Создается достаточно дешевый и информативный способ исследования эффективности работы гасительных элементов гидротехнических сооружений, при реализации которого, помимо интегральных характеристик работы гасительного устройства, появляется возможность оценки работы каждого элемента в процессе нестационарного наполнения камеры шлюза.

Литература

1. Чичкин О.И. Численное моделирование гидродинамических процессов а камере гашения типового Волгл-Донского шлюза. // Сборник материалов юбилейной научно-практической конференции, посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени В.Е. Тиманова. Издательство ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова- СПб, 2018. с. 73 – 81.
2. Липатов И.В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений. – Монография/– Н.Новгород: Издательско-полиграфический комплекс ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 97 с.
3. Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.-4-еизд., доп. для самост. изучения курса. -СПб.:Питер.-(Учебник для вузов).- Т.2.-2003.-576с.:ил
4. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.E. Welch, //- Phys. Fluids, 1982, №8, pp 2182-2187.
5. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries /C. W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
6. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D. B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269- 289.
7. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows- 1979, v. 1, pp. 25-31.
8. Schlichting, H. Boundary Layer Theory / Schlichting, Ш/. 6th Edition, McGraw-Hill, New York, - 1968, 90p.
9. Липатов И.В, Торенц К.. Численное моделирование волновых процессов в нижнем бьефе Нюрнбергского шлюза. // Сборник трудов «Великие реки 2005». Н.Новгород : ННГАСУ, - 372-373 с.
10. Корн Г. Корн Т. Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров. М: Наука, 1974. – 980 с.

References

1. Chichkin O.I. Chislennoye modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov a kamere gasheniya tipovogo Volgl-Donskogo shlyuza. – Sbornik materialov yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu sozdaniya gidrotekhnicheskoy laboratorii imeni V.Ye. Timanova. Izdatel'stvo GUMRF im. adm. S.O. makarova. S-Peterburg – 2018 g. s. 73 – 81.
2. Lipatov I.V. Gidrodinamika rechnykh potokov i yeye vliyaniye na ekspluatatsionnyye parametry sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. – Monografiya/ I.V. Lipatov. – N.Novgorod: Izdatel'sko poligraficheskiy kompleks FGOU VPO VGAVT, 2006. – 97 s.
3. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Ucheb. dlya vuzov/ K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin.-4-yeizd., dop. dlya samost. izucheniya kursa. -SPb.:Piter.-(Uchebnikdlya vuzov).- T.2.-2003.-576s.:il
4. Harlow, F.H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flows of fluid with free surface / F.H. Harlow, J.E. Welch, //- Phys. Fluids, 1982, №8, pp 2182-2187.
5. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries /C. W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
6. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D. B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269- 289.
7. Rodi, W. Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale / Rodi, W.//, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows- 1979, v. 1, pp. 25-31.
8. Schlichting, H. Boundary Layer Theory / Schlichting, Ш/. 6th Edition, McGraw-Hill, New York, - 1968, 90p.
9. Lipatov I.V. Chislennoye modelirovaniye volnovykh protsessov v Nizhnem B'yefe Nyurnbergskogo shlyuza./ I.V. Lipatov, K.Torents // «Velikiye reki 2005». N.Novgorod : NNGASU, - 372-373 s.
10. Korn G. Korn T. Spravochnik po vysshey matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moskva Nauka - 1974 g. – 980 s.

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 выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала

"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫЕ 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 из агаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).
Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**