

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 12. № 1

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 1. — 214 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы».

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.

С 2019 года Вестник издается при поддержке ООО «СКФ Арктика», дочерней компании группы «Совкомфлот».



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Майоров Н. Н. Планирование маршрутных сетей морских круизных и паромных линий с учетом динамики изменений пассажиропотока 7

Купцов Н. В., Кузнецов А. Л., Шатилин А. В. Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала 17

Козик С. В., Денисова А. А., Алцыбеев Г. О. Математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере 35

Киселев В. С. Имитационное моделирование работы шельфовых сооружений с танкерами-челноками при отгрузке нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера 46

Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа 57

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 71

Холотцев А. В., Подпорин С. А. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX – начале XXI века 71

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 85

Барышников С. О., Красюк А. Б., Чистов В. Б. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации 85

Зубрилов С. П., Растрьгин Н. В. Нитевидные кавитационные полости и возможность снижения кавитационной эрозии 96

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 107

Жуков В. А., Пуляев А. А., Ерофеев В. Л. Исследование теплогидравлической эффективности высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей 107

Горлова Н. Н., Медведев Г. В., Кузьмина О. Г. Пути снижения количества образующихся твердых частиц в отработавших газах судовых дизелей в составе судовых энергетических установок 115

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 г. по выбросам оксидов азота 122

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 139

Каракаев А. Б., Галиев Г. А. Обзор исследований моделирования адаптивных систем автоматического управления компонентами электроэнергетических систем 139

Том 12. № 1

2020

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма

Морская академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски

проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

А. И. Пошивай

руководитель Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королёва, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
С. Е. Кузнецов, д.т.н.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
В. А. Логиновский, д.т.н.
В. Е. Марлей, д.т.н.
А. М. Никитин, д.т.н.
Т. А. Пантина, д.э.н.
Л. И. Погодаев, д.т.н.
В. И. Решняк, д.т.н.
В. В. Романовский, д.т.н.
А. В. Саушев, д.т.н.
С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

Егоров Л. Е., Виноградов А. А. Компьютерное моделирование режимов работы электродвигательного пропульсивного комплекса арктического танкера-газовоза проекта «Yamalmax»154
Терентьев В. Е., Очина Л. Б. Оптоэлектронные средства передачи энергии и информации в электромеханических преобразователях роботизированного цифрового комплекса управления и контроля движения маломерного судна165
Гельвер Ф. А. Структура электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока174
Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления189
Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения202

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Maivorov N. N.</i> Planning the route networks of marine cruises and ferry lines taking into account the passenger flow dynamics	7
<i>Kuptsov N. V., Kuznetsov A. L., Shatilin A. V.</i> Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal	17
<i>Kozik S. V., Denisova A. A., Alcybeev G. O.</i> Mathematical model of the navigational celestial bodies motion on the celestial sphere	35
<i>Kiselev V. S.</i> Simulation of the work of shelf constructions with shuttle tankers during shipping of oil products in the far north conditions	46
<i>Yuyukin I. V.</i> Interpolation of the navigational function by the Lagrange type spline	57
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	71
<i>Khoptsev A. V., Podporin S. A.</i> Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century	71
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	85
<i>Baryshnikov S. O., Krasiuk A. B., Chistov V. B.</i> A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation	85
<i>Zubrilov S. P., Rastrygin N. V.</i> Filamentous cavitation caverns and possibility to reduce the cavitation erosion	96
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	107
<i>Zhukov V. A., Pulyaev A. A., Erofeev V. L.</i> Studying the thermal-hydraulic efficiency of high-temperature cooling systems for marine diesel engines	107
<i>Gorlova N. N., Medvedev G. V., Kuzmina O. G.</i> Ways to reduce the amount of particulate matter in the exhaust gases of marine diesel engines in ship power plants	115
<i>Zhivljuk G. E., Petrov A. P.</i> Technical support for ship power plants compliance with the new requirements for nitrogen oxide emissions in 2021	122
ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	139
<i>Karakayev A. B., Galiev G. A.</i> Researches review of modelling adaptive automatic control systems of electrical power systems components	139
<i>Egorov L. E., Vinogradov A. A.</i> Computer simulation of electrical propulsion complex for «Yamal LNG» Arctic gas carrier	154

Volume 12. № 1

2020

EDITOR-IN-CHIEF

S. O. Baryshnikov
doctor of technical Sciences, Prof.
rector@gumrf.ru

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkovAP@gumrf.ru

S. Gutsma

Maritime Academy (g.Schetsin, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

G. V. Yegorov

General Director of “Marine Engineering Bureau - St. Petersburg”, doctor of technical Sciences, Prof.

R. Kachin’ski

Vice-Rector for Development and Cooperation of the Technical University (Bialystok, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

A. I. Poshivay

Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

A. Ye. Sazonov

doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

M. Yusupov

scientific leader of “St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS”, doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:

E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

**Editorial
Collegium:**

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
S. Ye. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences
A. L. Tezиков,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

Terentiev V. E., Ochina L. B. Optoelectronic means of energy
and information transmission in the electromechanical transformers
of the robotic digital complex for managing and controlling motion
of small-displacement surveying vessel.....165
Gelver F. A. Structure of the ship's electromotive complex
with dual DC buses174
Tyrva V. O. Modeling actions and reactions of ergatic system
with electromechanical control object189
Grigoryev A. V., Zaynullin R. R., Malyshev S. M. Perspectives of using
the static electric power sources on ships with electric propulsion plants.....202

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-7-16

PLANNING THE ROUTE NETWORKS OF MARINE CRUISES AND FERRY LINES TAKING INTO ACCOUNT THE PASSENGER FLOW DYNAMICS

N. N. Maiorov

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

An assessment of the maritime ferry market for the Baltic Sea region is carried out on the basis of a group of carrier companies and statistics for 2019. To assess the impact of sea passenger ports on each other, the pie charts are used. This research is carried out on the basis of the Princess Anastasia ferry ship and cruises using St. Petersburg port as a start and end point. Based on the research, it is established that there is a trend to increase the passenger traffic in this region and increase the size of cruise and ferry vessels. At the same time, it is found, that a trend of decreasing the cruise ships is observed, but their sizes are significantly increasing, which requires the modernization of passenger port infrastructure and investments in it. Based on the research, the assessment of constraints in the development of new route lines in the Baltic Sea region is given. To solve the route estimation problem, a mathematical model and an objective function that seeks to minimize possible costs are presented. Solving this problem requires observing a large number of boundary conditions, which in practice leads to a simplification of this objective function and finding only some boundary solutions. On the other hand, although this model has the accuracy of the process description, it does not allow taking into account the dynamics of passenger flows. To eliminate this circumstance, the maximum flow problem is stated and a new model for choosing a ferry transport network between different marine passenger ports is presented. The developed model takes into account the interests of passengers traveling on their own vehicles. It is established that the results of using the model can be used to build a methodological basis for the route ferry network for the selected region of the sea. The results of when building model should be used to evaluate the effectiveness of the systems «sea ferry line - passenger sea port - urban transport space near the terminal» and projected new ring ferry routes.

Keywords: marine passenger terminal, planning, sea ferry services, objective function, intensity pie charts, Baltic Sea.

For citation:

Maiorov, Nikolai N. "Planning the route networks of marine cruises and ferry lines taking into account the passenger flow dynamics." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-7-16.

УДК 65.012.1; 656.072

ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТНЫХ СЕТЕЙ МОРСКИХ КРУИЗНЫХ И ПАРОМНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАССАЖИРОПОТОКА

Н. Н. Майоров

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнена оценка рынка морских паромных перевозок для региона Балтийского моря на основе группы компаний перевозчиков и статистических данных за 2019 год. Для оценки влияния морских пассажирских портов друг на друга предложено использование круговых диаграмм связей и выполнено построение соответствующего графика. Проведено исследование на основе паромного судна «Принцесса Анастасия»

и круизов, использующих в качестве начального и конечного пункта порт Санкт-Петербург. На основании проведенного исследования установлено сохранение тренда на увеличение пассажиропотока в данном регионе и размеров круизных и паромных судов. При этом установлено, что при незначительном уменьшении круизных судов, их размеры существенно увеличиваются, что требует модернизации портовой инфраструктуры и инвестиций. На основании проведенного исследования выполнена оценка сдерживающих факторов в развитии новых маршрутных линий в регионе Балтийского моря. Для решения задачи оценки маршрута приводятся математическая модель и целевая функция, стремящаяся минимизировать возможные издержки. Реализация данной задачи требует соблюдения большого количества граничных условий, что на практике приводит к упрощению данной целевой функции и нахождению лишь некоторых граничных решений. Отмечается, что несмотря на то, что данная модель обладает точностью описания процесса, она не позволяет учитывать динамику пассажиропотоков. Для исключения данного обстоятельства приводится постановка задачи о максимальном потоке и новая модель выбора паромной транспортной сети между различными пассажирскими портами. Разработанная модель учитывает интересы пассажиров, путешествующих на собственных транспортных средствах. Установлено, что результаты использования модели можно применять при построении методологического базиса маршрутной паромной сети для выбранного региона моря. Результаты работы модели планирования необходимо использовать для оценки эффективности работы систем «морская паромная линия – морской пассажирский порт – околотерминальное городское транспортное пространство» и проектирования новых кольцевых паромных маршрутов.

Ключевые слова: морской пассажирский терминал, планирование, морские паромные перевозки, целевая функция, круговые диаграммы связей интенсивностей, Балтийское море.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Планирование маршрутных сетей морских круизных и паромных линий с учетом динамики изменений пассажиропотока / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-7-16.

Введение (Introduction)

Исторически сложилось, что спрос на морские паромные и круизные перевозки распределен между четырьмя основными регионами судоходства: Карибский бассейн, Средиземноморье, Азия и регион Балтийского моря. Балтийское море является особым регионом, так как, с одной стороны, это территория активного развития морского транспорта, объединяющая более 200 портов и терминалов, с другой — это крупная морская сеть, в которой между заявленными портами курсируют более 2000 судов. Балтийское море является особым регионом — важным элементом глобальной транспортной системы, обеспечивающим движение грузов и пассажиров с сопутствующим грузом между крупными портами и терминалами. Ввиду близости культурно-исторических центров различных стран и имеющейся сети паромных линий, в регионе Балтийского моря в большой степени развита мобильность пассажиров, путешествующих на собственных машинах. Кроме того, в течение последних пяти лет наблюдается тенденция значительного увеличения круизных лайнеров и пассажиропотока туристов. К странам Балтийского моря относятся: Дания, Швеция, Финляндия, Россия, Эстония, Латвия, Литва, Польша и Германия. Портовые и терминальные комплексы этих стран, расположенные на побережье Балтийского моря, образуют крупную морскую транспортную сеть.

Развитие морского транспорта в регионе Балтийского моря характеризуется увеличением объемов пассажирских перевозок и использованием более крупных круизных судов. В частности, по портам и терминалам после 2016 г. наблюдается значительное увеличение заходов больших круизных судов. К примеру, в течение навигации 2019 г. морской пассажирский порт «Морской фасад» принял 265 лайнеров [1], [2]. Количество пассажирских судов в течение последнего периода времени возросло незначительно в отличие от их размеров, которые существенно увеличились. При этом наблюдается значительный рост пассажиропотока. Все это свидетельствует о том, что возможное изменение количества стандартных лайнеров компенсируется увеличением их размеров. В этой связи пассажирским портом «Морской фасад» был разработан ряд проектов строительства выносных палов (увеличение длины причалов), что позволит одновременно

швартоваться судам длиной 294 и 330 м, а затем 333 м и более. Тем самым, конечно, в морском пассажирском порту произойдет централизация причалов. Данные инвестиции направлены на сохранение лидерских позиций единственного крупного специализированного морского пассажирского порта в регионе Балтики.

Однако близость различных культурных центров притяжения в странах Балтийского моря под воздействием внешней среды и экономики приводит к конкуренции терминалов и портов между собой в рамках одного региона. Известно много факторов, оказывающих влияние на географическую структуру спроса. Одним из них является то, что новые и улучшенные наземные транспортные связи околотерминального пространства со временем создадут условия конкуренции. Это особенно заметно для пассажиров, путешествующих самостоятельно.

Другим фактором является развитие пропускной способности порта и связанных с ним транспортных коридоров, которые могут значительно изменить существующую структуру транспортных потоков даже через соседние страны. Кроме того, прогнозы пассажирских перевозок являются особенно сложными и неопределенными, так как зависят от внешних условий и политической ситуации. Поэтому наиболее характерной является ситуация, в которой, с одной стороны, имеет место разветвленная маршрутная сеть между морскими пассажирскими, что создает дополнительный выбор для пассажиров, а с другой — порты и терминалы наращивают инфраструктуру для привлечения пассажиропотока от других регионов, конкурируя между собой. При исследовании данной ситуации необходимо рассматривать всю систему: «морская паромная / круизная линия – морской пассажирский порт – окотерминальное транспортное пространство».

Только таким образом можно решать задачу как исследования рынка, так и создания новых круизных или паромных маршрутов. Ввиду динамики процессов, использование методов линейного программирования ограничено и ведет к необходимости выполнения расчетов. Поэтому необходима разработка новых методик, которые позволили бы фиксировать взаимодействие морских терминалов в одном регионе и моделей для описания условий формирования новых маршрутов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим исходные данные системы морских паромных линий в регионе Балтийского моря. В настоящее время в регионе Балтийского моря имеется единственный специализированный морской пассажирский порт «Морской фасад». Количество пассажиров круизных и паромных судов в нем составляет 643 289 пассажиров. Помимо порта «Морской фасад» лайнеры принимают также причалы на Английской набережной и набережной Лейтенанта Шмидта. Их общий вклад, согласно источнику [2], составляет примерно 22 000 пассажиров в год. В общую статистику перевезенных пассажиров необходимо включить пассажиропоток Морского вокзала, через который осуществляются регулярные маршруты на пароме «Принцесса Анастасия» (SPL Princess Anastasia) компании St. Peter Line и оператора Moby SPL. Общее количество паромов, представленных в российском сегменте пассажирских и грузопассажирских перевозок, приведено на рис. 1.

Если рассматривать морские грузопассажирские перевозки, то по сравнению с другими странами Балтийского региона, количество паромов, имеющих в качестве порта начала круиза порты Санкт-Петербурга, незначительно. Для сравнения, паромные линии Tallink & Silja Line состоят из шестнадцати судов [3]–[5]. Данные линии соединяют Финляндию, Эстонию, Латвию, Швецию и Аландские острова круглогодично. При этом существует закрепление паромных судов за конкретными направлениями. На линии Хельсинки – Таллин работают паромные суда Silja Europa ferry вместимостью 3100 пассажиров и 400 машиномест и паром Tallink Megastar ferry вместимостью 2800 пассажиров и 150 машиномест. Аналогичным образом два других парома осуществляют регулярные морские перевозки по маршруту Стокгольм – Аландские острова – Таллин

и др. Общее количество пассажиров, которые может перевезти данная компания, соответствует 27 507 пассажиров и 3854 автомобилей.

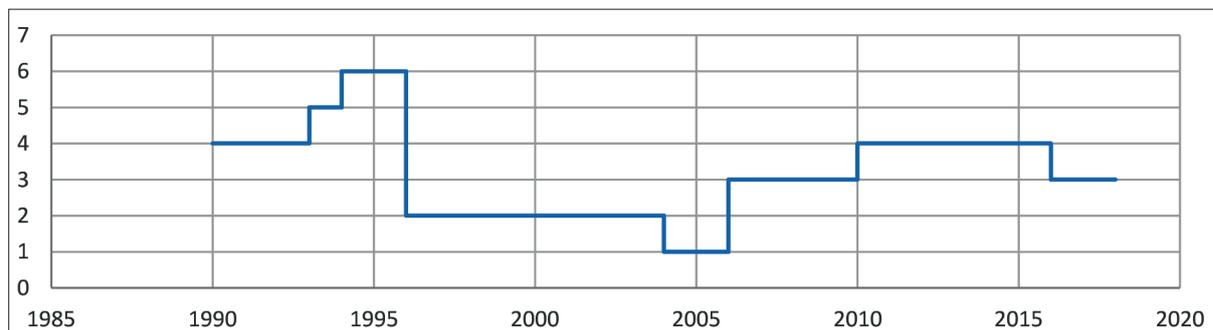


Рис. 1. Динамика изменения численности паромов и пассажирских терминалов с 1980-х гг. по настоящее время

В настоящее время из Санкт-Петербурга регулярные линии выполняет паром «Принцесса Анастасия» вместимостью 2 500 мест (834 каюты) и автомобильная палуба на 580 машин. На основе динамики расписания круизов на 2019 г. следует отметить, что маршрутная сеть состоит из пяти основных портов: Санкт-Петербург (Морской вокзал), Хельсинки, Таллин, Стокгольм, Рига, при этом основные интенсивности разделены на двухдневные и четырехдневные маршруты. В среднем за один месяц 2019 г. паромное судно выполняло 7–10 круговых рейсов, при этом начало и завершение маршрута происходило в порту Санкт-Петербурга. Основная маршрутная месячная сеть показана на рис. 2.

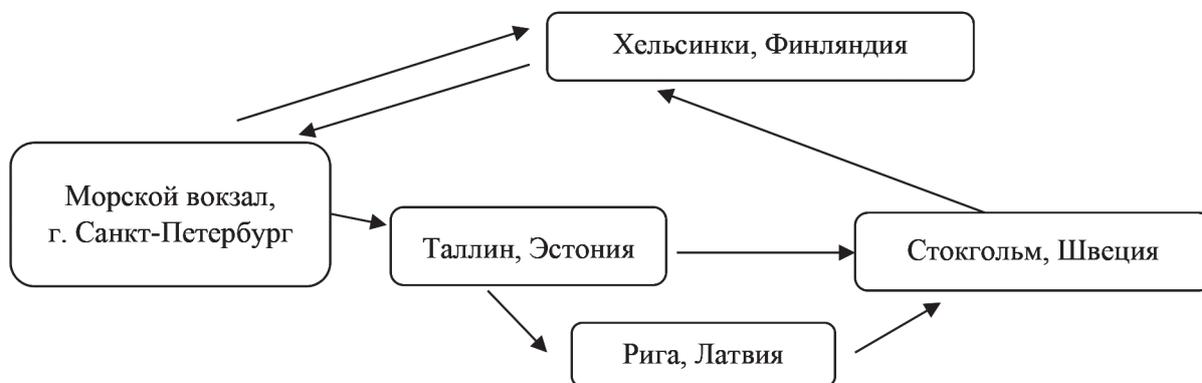


Рис. 2. Маршрутная сеть парома «Принцесса Анастасия» в 2019 г.

Если анализировать интенсивности движения между двумя морскими пассажирскими портами или терминалами, то можно интенсивности работы на участках парома представить на основе круговой диаграммы интенсивности [6] в следующем виде (рис. 3). На основании интенсивности работы морского парома видна сегментированность морских пассажирских перевозок. В современных условиях необходимо увеличивать число паромных судов и стремиться расширить маршрутную сеть. Для привлечения новых пассажиров необходимо, конечно, расширить количество морских портов и терминалов на маршруте. Это дополнительно будет служить стимулом для повторного привлечения туристов на круиз. Для описания маршрутных сетей недостаточно использовать только аналитические модели, так как они ограниченно учитывают динамику процессов. Ввиду наличия динамики процессов, необходимо использовать модели и методы исследования пассажирских потоков в сетях и требуется разработка новых моделей планирования для данных задач.

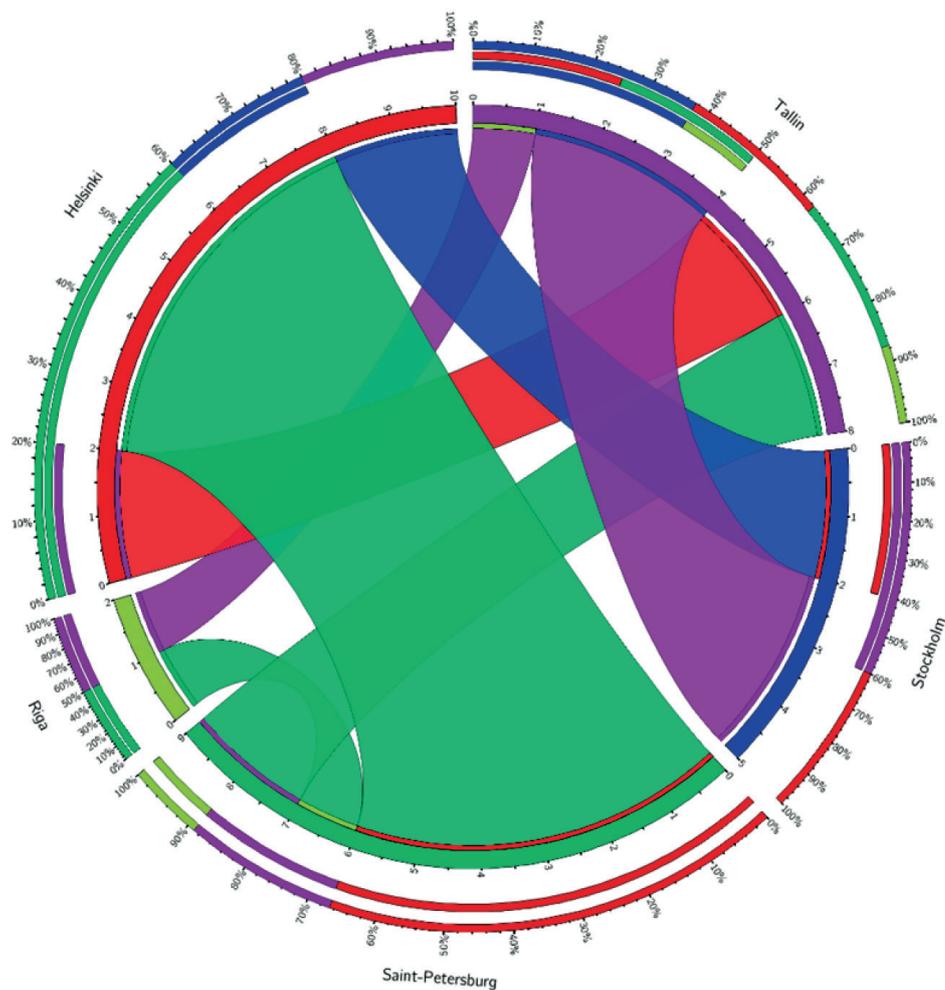


Рис. 3. Интенсивность движения парома «Принцесса Анастасия» между портами и терминалами Балтийского моря в среднем за один месяц 2019 г.

Модели и методы планирования новых маршрутов в морских паромных сетях. Примем начальное условие, когда известны порты и терминалы, между которыми будет налажено морское паромное сообщение. Количество различных вариантов загрузки паромного судна может быть определено. Учитывая требования интенсивности трафика при погрузке / разгрузке каждой партии, включая пассажиров или транспортных средств и для каждого порта, следует искать оптимальный план перевозки, который минимизирует затраты на погрузку / разгрузку и ожидание парома в портах для того, чтобы был реализован выгодный маршрут для перевозчика [7]–[10]. Однако на данный момент минимизация издержек не является одним из базовых критериев выбора маршрута через систему портов и терминалов. Базовая линейная модель в данном случае может быть представлена следующим функционалом:

$$\begin{aligned}
 \min : & \sum_{i \in N^b} \sum_{j \in N \setminus N^b} Y_{ij} cf + \sum_{i, j \in S} Y_{ij} c_{ij} + \sum_d \sum_{i, j \in (W_d, O_d)} x_{dij} \omega \cup \beta + \\
 & + \sum_d \left(\sum_{i, j \in S} X_{dij} t_{ij} - X_{dij} t_d \right) tv - \sum_d \sum_{i, j \in D_d} X_{dij} rev; \\
 & \sum_{i \in N^b} \sum_{j \in N \setminus N^b} Y_{ij} \leq f; \sum_d X_{dij} \leq Y_{ij} \cdot C; 0 \leq X_{dij} \leq u_{ij}; 0 \leq X_{dij} \leq u_{dij},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где cf — фиксированные затраты за фрахт парома в день; c_{ij} — затраты на организацию поездки между портами i и j ; f — максимальное количество паромов; dji — пассажирский спрос пары

отправления-назначения между портами; C — вместимость парома; t_{ij} — время в пути между портами i и j ; t_d — время в пути отправления пункта назначения d для прямого маршрута; β — время прохождения между двумя последовательными дугами обслуживания; rev — выручка для исходной пары назначения d ; d — набор пар портов отправления и назначения; D_d — дуги назначения пассажирской сети; ω — значение времени ожидания; tv — время поездки на пароме; u_{ij} — верхняя граница потока парома на дуге, соединяющей порты; u_{dij} — верхняя граница потока пассажиров на дуге, соединяющей гавани; X_{dij} — пассажирский поток в пространственно-временной сети отправления между парой портов; Y_{ij} — паромный поток в морской транспортной сети; S — набор дуг (связей) для паромной и пассажирской сети; O_d — дуги маршрутной сети; W_d — комплект дуг, отражающих задержки t ожидания для паромной и пассажирской сети; N^b — набор портов (узлов) в начале и в конце планирования интервала.

Граничные условия данной модели можно представить в следующем виде:

1. Выполняется требование сохранения пассажиропотока.
2. Выполняются ограничения, которые указывают, в какие узлы заходят пассажиры или как они покидают паром.
3. Ограничения суммируют все пассажирские потоки с тем, чтобы установить, что они не превышают пропускную способность самого парома.
4. Ограничения также формируют верхнюю и нижнюю границы для всех пассажиров и парома между портами i и j соответственно.

Одной из слабых мест данной модели является отсутствие переменных, учитывающих изменения в маршрутных сетях. Данная модель, которая применима только на небольшом отрезке времени в качестве интервала планирования, требует однозначного соответствия спроса пассажиров имеющемуся количеству паромов. В ряде случаев порт назначения и итоговый порт могут различаться. Если рассмотреть сеть, состоящую из N пассажирских портов и возможных маршрутов (дуг) A_{ij} , связывающих N_i и N_j , то каждому узлу сети N_i поставлена в соответствие его пропускная способность w_i (максимальное количество пассажиропотока или количества паромов, которое необходимо пропустить через узел (порт)). Пусть x_{ij} — поток по дуге A_{ij} из узла N_i и N_j равен $\sum x_{ij}$. Тогда задача о максимальном потоке в сети с ограничениями на пропускные способности узлов (портов) формируется при условии максимизирования v :

$$\sum_j x_{ij} - \sum_k x_{jk} = \begin{cases} -v, & j = s; \\ 0, & j \neq s, t; \\ v, & j = t; \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{ij} \geq 0, 0 \leq x_j \leq w_j; \sum_i x_{ij} = x_j.$$

Тогда используя модели (1) и (2) с учетом динамики пассажиропотока, можно представить на основе рис. 4 задачу принятия решения по выбору или планированию маршрута. Согласно работам [11]–[14], варианты маршрутов могут быть представлены блок-схемой ориентированной ациклической сети (см. рис. 3).

На рис. 4 приняты следующие условные обозначения: I, j — индексы загрузки судна; $1, 2, \dots, M$ — варианты портов на маршруте; $X_{1,m}$ — количество пассажиров, следующих на судно или покидающих судно в порту M ; $L_{i,m}$ — ограничения для порта; $I_{1,n}$ — количество пассажиров при прибытии в порт (в начальный момент на судне нет пассажиров и $I_{1,n} = 0$; в последней точке все пассажиры покидают судно и аналогично $I_{n,m} = 0$).

Математическая модель (1) позволяет сформировать задачу минимизации издержек и простоев в паромной сети, но данная модель не позволяет учитывать динамику процессов. На рис. 4 представлена модель задачи выбора маршрутной сети, которая учитывает динамику изменения, позволяя на этапе планирования сформировать наиболее выгодную маршрутную сеть. В статье [15] рассмотрен методологический базис маршрутных сетей, который при совмещении модели, пред-

ставленной на рис. 3, позволяет паромной компании обоснованно планировать и формировать маршрутную сеть на период навигации.

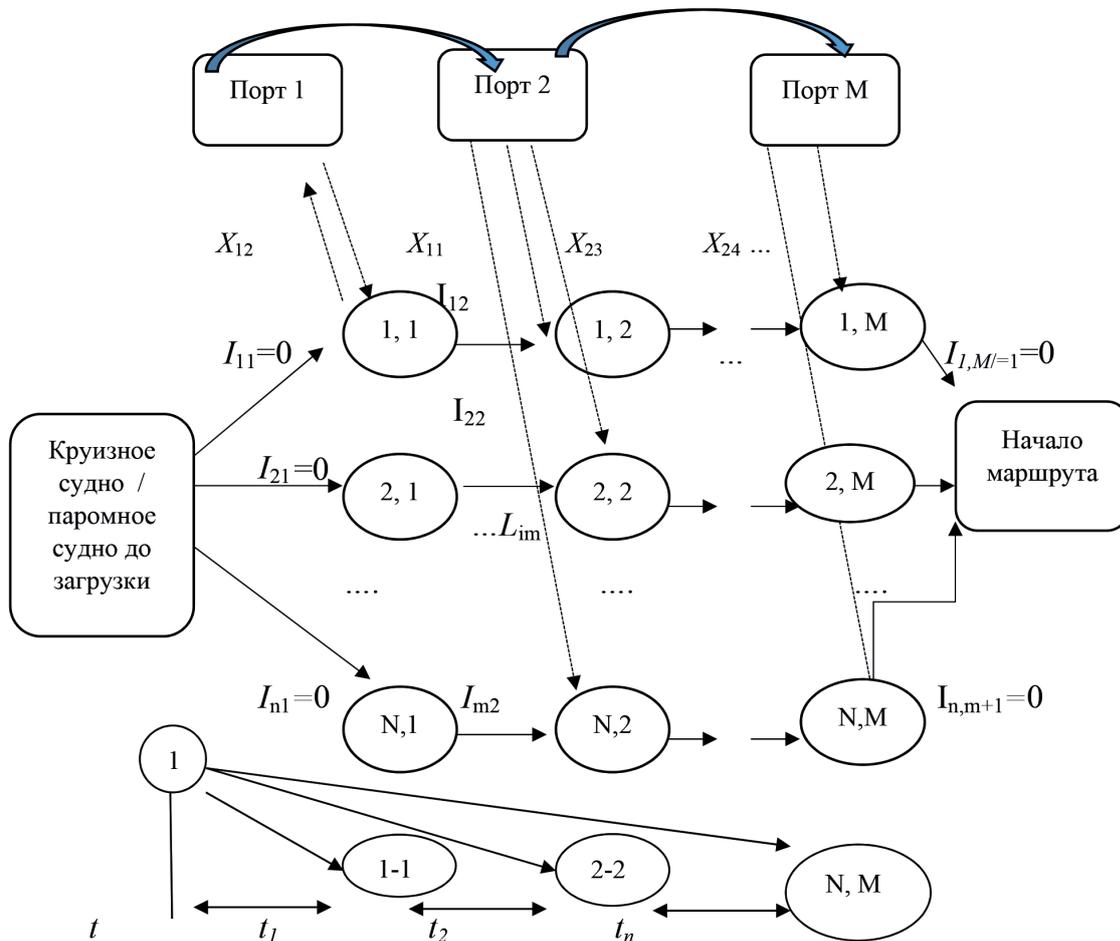


Рис. 4. Представление модели выбора паромной транспортной сети между различными портами в регионе моря

Порты и терминалы являются точками концентрации пассажиропотоков, причем специально введен учет в модели динамики пассажиров (количество пассажиров при прибытии в порт $I_{1,n}$). По мере анализа пассажиропотоков и конечного спроса [16] выстраивается маршрут движения. При этом в модели также включено повторное привлечение пассажиропотока, но уже на новый маршрут. Ввиду ограниченности вариантов между морскими портами и терминалами в регионах морей, для стимулирования пассажиропотока компании-перевозчики должны изменять маршрутные направления, тем самым изменяя туристические продукты.

Результаты (Results)

Морские паромные и круизные перевозки зависят от многих факторов, среди которых одними из основных являются динамика пассажиропотока и интерес пассажиров к выбранному маршруту. Линейные модели и целевые функции позволяют описать переменные процесса, формализовать задачу синтеза, но при практической реализации сводятся к значительным упрощениям. Данный способ не позволяет учитывать динамику изменений и решить задачу прогноза эффективности нового маршрута.

Рассматривается новая модель выбора морской паромной сети через систему пассажирских портов и терминалов, в которой предлагается рассматривать пассажирский порт как точку концентрации пассажиропотоков с учетом их динамики. На основе данных по спросу или опытных

данных паромной компании, с учетом разработанного методологического базиса маршрутных сетей, формируется новый маршрут. В этом случае можно решать задачу планирования и вносить динамические коррективы в существующие маршруты. Использование данной модели позволяет повысить качество принятия решений по планированию маршрутной сети в случае одновременной работы как одного, так и нескольких паромов на линии.

Обсуждение (Discussion)

Система морских паромных перевозок в регионах морей находится в зависимости от многих условий, как географических, технологических, так и экономических. Очень многое зависит от выстраивания качественной работы систем: «морская паромная линия – пассажирский порт / терминал – околотерминальное транспортное пространство». Различными являются возможные ситуации, когда туристы находятся в городе, во время стоянки паромного судна во время круиза, когда круиз начинается и заканчивается в одном городе (например, в г. Санкт-Петербурге). Конечно, чем больше таких маршрутов, тем интенсивнее будет развиваться сфера пассажирских перевозок в регионе. В настоящее время меняются целевые установки среднестатистического пассажира, который, стремясь к мобильности, путешествует со своим транспортным средством. При этом клиент, стремящийся к новизне, сталкивается с ситуацией ограниченности рынка. Увеличение пассажиропотока будет наблюдаться там, где появляются новые маршруты, а на Балтике на данный момент рынок ограничен исторически сложившимися центрами.

В настоящее время спрос на перевозки распределен между четырьмя основными регионами судоходства: Карибский бассейн, Средиземноморье, Азия и Балтика. Как правило, данный рост имеет циклический характер — вначале лучшую динамику показывает один рынок, затем вперед вырывается другой. Конечно, необходимо выработать инструменты для дополнительного привлечения туристов на паромы, чтобы пассажир выбрал паром в следующий раз из родного города в начале круиза. Для этого следует регулярно обновлять маршруты между системой портов, а это, в свою очередь, требует решения задачи планирования и прогнозирования. Для прогнозирования спроса имеет место использование математического аппарата матриц корреспонденций [17], так как при помощи использования этого метода можно смоделировать загруженность транспортных узлов и достичь удобства оценки околотерминального транспортного пространства. Пример моделирования спроса на основе комбинации различных портов и оценки околотерминального пространства дан на рис. 5.

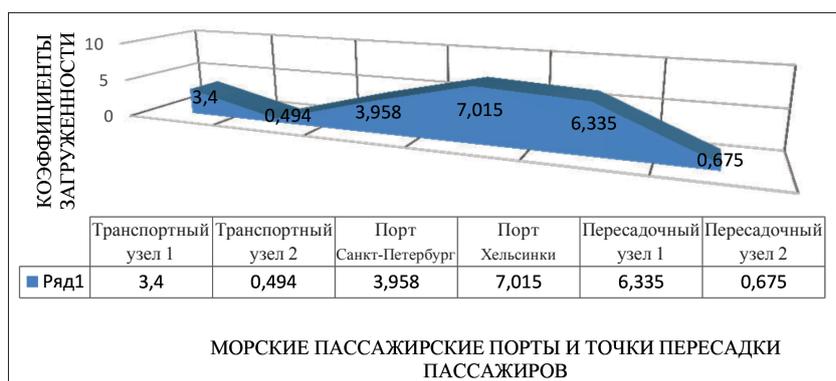


Рис. 5. Вариант результата моделирования нагрузки паромной линии Санкт-Петербург – Хельсинки с учетом наличия пересадочных узлов

Выводы (Conclusions)

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Наблюдается сохранение тенденции на увеличение спроса паромных сообщений на Санкт-Петербург и увеличение спроса в круизных и паромных линиях, что позволяет обосновать инфраструктурные проекты по модернизации морского пассажирского порта.

2. Между пассажирскими морскими портами и терминалами в регионе Балтийского моря наблюдается конкуренция за пассажиропоток, что в условиях ограниченности ввода новых маршрутов является значительным стимулом для развития окотерминального транспортного пространства.

3. Имеющимся регулярным паромным компаниям Санкт-Петербурга необходимо вводить новые маршруты для дополнительного привлечения пассажиров на круизы и стимулирования рынка.

4. В исследовании приведено оригинальное решение задачи планирования введения нового маршрута через систему портов и терминалов в начале навигации.

5. Приведены модели целевых функций, направленные на уменьшение простоев и возможных издержек, а также определена ограниченность их практического применения.

6. В исследовании на основании круговых диаграмм связей представлено решение задачи оценки рынка паромных перевозок и решена задача определения портов и терминалов, пользующихся наибольшим спросом у туристов и пассажиров круиза в выбранном регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порт «Морской вокзал» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mvokzal.ru/morskoj-vokzal> (дата обращения: 15.11.2019).

2. Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portspb.ru/> (дата обращения: 15.11.2019).

3. Baltic ports volumes in 2009 // *Baltic Transport Journal*. — 2010. — № 4. — Pp. 28–33.

4. Baltic Sea Sewage Port Reception Facilities 2018. Baltic Marine Environment Protection Commission [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.helcom.fi> (дата обращения: 15.11.2019).

5. Directferries.com [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.directferries.com/routes.htm> (дата обращения: 11.11.2019).

6. *Майоров Н. Н.* Исследование работы морских пассажирских терминалов на основе диаграмм связей / Н. Н. Майоров // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2019. — № 1. — С. 119–126. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-119-126.

7. *Agarwal R.* Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping / R. Agarwal, O. Ergun // *Transportation Science*. — 2008. — Vol. 42. — Is. 2. — Pp. 175–196. DOI: 10.1287/trsc.1070.0205.

8. *Fagerholt K.* Fleet deployment in liner shipping: a case study / K. Fagerholt, T.A.V. Johnsen, H. Lindstad // *Maritime Policy & Management*. — 2009. — Vol. 36. — Is. 5. — Pp. 397–409. DOI: 10.1080/03088830903187143.

9. *Krile S.* Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // *Transport Problems*. — 2018. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 27–36. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.3.

10. *Mulder J.* Methods for strategic liner shipping network design / J. Mulder, R. Dekker // *European Journal of Operational Research*. — 2014. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 367–377. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.041.

11. *Krile S.* Logistic Support for Loading/Unloading in Shipping with Multiple Ports / S. Krile // *Proc. of 31st International Conference of Automation in Transportation (Korema), Pula – Milan*. — 2011. — Pp. 94–97.

12. *Lun Y. H. V.* Fleet mix in container shipping operations / Y.H.V. Lun, M. Browne // *International Journal of Shipping and Transport Logistics*. — 2009. — Vol. 1. — Is. 2. — Pp. 103–118. DOI: 10.1504/IJSTL.2009.024491

13. *Maiorov N.* Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circo plot intensity diagram / N. Maiorov, V. Fetisov, S. Krile, D. Miskovic // *Transport Problems*. — 2019. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 21–31. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.

14. *Krile S.* New approach in definition of multi-stop flight routes / S. Krile, M. Krile // *Transport Problems*. — 2015. — Vol. 10. — Is. 1. — Pp. 87–96.

15. *Майоров Н. Н.* Методологический базис организации сети морских пассажирских перевозок / Н. Н. Майоров // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 2. — С. 28–37. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.

16. *Barron P.* Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market / P. Barron, A. B. Greenwood // *Tourism in Marine Environments*. — 2006. — Vol. 3. — Num. 2. — Pp. 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.

17. *Wang J.* The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction / J. Wang // *Ningxia Engineering Technology*. — 2002. — Vol. 1. — No. 4. — Pp. 362–365.

REFERENCES

1. Port Morskoy vokzal. Web. 15 Nov. 2019 <<http://www.mvokzal.ru/morskoy-vokzal>>.
2. Port Sankt-Peterburg Morskoi Fasad. Web. 15 Nov. 2019 <<https://www.portspb.ru/>>.
3. “Baltic ports volumes in 2009.” *Baltic Transport Journal*. 2010. № 4. P. 28–33.
4. Baltic Sea Sewage Port Reception Facilities. Baltic Marine Environment Protection Commission. Web 15 Nov. 2019 <<http://www.helcom.fi>>.
5. Directferries.com. Web. 11 Nov. 2019 <<https://www.directferries.com/routes.htm>>.
6. Maiorov, Nikolai Nikolaevich. “Research of functioning of maritime passenger terminals with application of mind maps.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2019): 119–126. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-119-126.
7. Agarwal, Richa, and Özlem Ergun. “Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping.” *Transportation Science* 42.2 (2008): 175–196. DOI: 10.1287/trsc.1070.0205
8. Fagerholt, Kjetil, Trond AV Johnsen, and Haakon Lindstad. “Fleet deployment in liner shipping: a case study.” *Maritime Policy & Management* 36.5 (2009): 397–409. DOI: 10.1080/03088830903187143.
9. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. “Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies.” *Transport Problems* 13.1 (2018): 27–36. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.3
10. Mulder, Judith, and Rommert Dekker. “Methods for strategic liner shipping network design.” *European Journal of Operational Research* 235.2 (2014): 367–377. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.041.
11. Krile, S. “Logistic Support for Loading/Unloading in Shipping with Multiple Ports.” *Proc. of 31st International Conference of Automation in Transportation (Korema). Pula – Milan*. 2011. 94–97.
12. Lun, YH Venus, and Michael Browne. “Fleet mix in container shipping operations.” *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 1.2 (2009): 103–118. DOI: 10.1504/IJSTL.2009.024491.
13. Maiorov, N., V. Fetisov, S. Krile, and D. Miskovic. “Simulation of the route network and ferry traffic intensity based on the process of discretization and circos plot intensity diagram” *Transport Problems* 14.4 (2019): 21-31. DOI: 10.20858/tp.2019.14.4.2.
14. Krile, Srećko, and Marina Krile. “New approach in definition of multi-stop flight routes.” *Transport Problems* 10.1 (2015): 87–96.
15. Maiorov, Nikolaj Nikolaevich. “Methodological principles of the organization of the marine passenger transport network.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2018): 28–37. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.
16. Barron, Paul, and Ana Bartolome Greenwood. “Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market.” *Tourism in Marine Environments* 3.2 (2006): 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238
17. Wang, Jin-mei. “The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction.” *Ningxia Engineering Technology* 1.4 (2002): 362–365.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Майоров Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская 67, лит. А
e-mail: nmssoft@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Maiorov, Nikolai N. — PhD, associate professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: nmssoft@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2019 г.
Received: November 24, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE PROBABILISTIC ASSESSMENT OF ANNUAL THROUGHPUT OF THE MARINE LOADING COMPLEX OF THE EXPORT COAL TERMINAL

N. V. Kuptsov¹, A. L. Kuznetsov², A. V. Shatilin¹

¹ — Gazprom Neft PJSC, St Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St Petersburg, Russian Federation

The probabilistic assessment (using stochastic methods) of the design annual capacity of the marine loading complex of specialized coal export sea ports and terminals, the technological loading and unloading operations of which are carried out by high-performance conveyor transport is considered in the study. This task is complex and covers the various topics: technological processes of the fleet and port equipment, operational and technical characteristics of sea port transshipment complexes and the commercial fleet. The object of research is the technological processes of marine fleet operation and modern marine export coal terminal using conveyor mechanization. Marine loading complex is defined as the boundaries, as the key and most complex technological zone of the terminal. Subject of the study is stochastic modeling methods for obtaining the functional range of results of probabilistic estimation of marine loading complex throughput. In the paper, the type of model and its logic are substantiated, the structure of the model with the composition and the elements interconnection is formed, the boundaries of the model are designated, the probability distributions of the initial parameters are determined, a computational algorithm for the model of probabilistic assessment of the annual capacity of marine loading complex is developed, a computational experiment with model is performed. As a result of the research, the main goal has been achieved - a stochastic model for the probabilistic assessment of throughput of marine loading complex of coal export terminals has been created and approved. The scientific newness of the study is that for the first time for specialized export coal terminals a methodology for probabilistic estimation of marine loading complex throughput using stochastic modeling has been developed. The stochastic modeling allows you to increase the accuracy and correspondence of the designed throughput of marine loading complex to the real cargo turnover of operating coal terminals. Stochastic modeling of transport systems opens up new possibilities in terms of solving scientific, technological design problems and has a high research potential. For logistics and technical systems, the developed stochastic model has the potential to be applied for optimization of inefficient processes and throughput increase.

Keywords: seaports, coal sea terminals, marine loading complex, ship loading operations, technological design of seaports, stochastic modeling, probabilistic assessment.

For citation:

Kuptsov, Nikolay V., Aleksandr L. Kuznetsov, and Andrey V. Shatilin. "Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

УДК 05.22.19

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОРСКОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА ЭКСПОРТНОГО УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

Н. В. Купцов¹, А. Л. Кузнецов², А. В. Шатилин¹

¹ — ПАО «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследование посвящено вероятностной оценке стохастическими методами проектной пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) для специализированных угольных экспортных морских

портов и терминалов, технологические погрузочно-разгрузочные операции которых выполняются высокопроизводительным конвейерным транспортом. Данная задача является комплексной и затрагивает различные аспекты: технологические процессы работы флота и портового оборудования, эксплуатационно-технические характеристики морских портовых перегрузочных комплексов и коммерческого флота. Объектом исследования являются технологические процессы работы морского флота и современного морского экспортного угольного терминала с применением конвейерной механизации. Границами определены МГФ как ключевая и наиболее сложная технологическая зона терминала. Предметом исследования являются методы стохастического моделирования, направленные на получение функционального диапазона результатов вероятностной оценки пропускной способности МГФ. В статье выполнено обоснование типа модели и ее логики, сформирована структура модели с составом и взаимосвязями элементов, обозначены границы модели, определены распределения вероятности исходных параметров, разработан расчетный алгоритм модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ, выполнен расчетный эксперимент с моделью. В результате проведенных исследований достигнута основная цель: создана и апробирована методика стохастического моделирования для вероятностной оценки пропускной способности МГФ угольных экспортных терминалов. Научная новизна исследования состоит в том, что в рамках исследования впервые для специализированных экспортных угольных терминалов разработана методика вероятностной оценки пропускной способности МГФ с применением стохастического моделирования, которое позволяет увеличить точность и соответствие пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых угольных терминалов. Стохастическое моделирование транспортных систем открывает новые возможности с точки зрения решения прикладных задач и обладает высоким исследовательским потенциалом. Для логистических и технических систем разработанная методика обладает потенциалом для применения с целью оптимизации неэффективных процессов и увеличения пропускной способности.

Ключевые слова: морские порты, угольные морские терминалы, морской грузовой фронт, судопогрузочные операции, технологическое проектирование морских портов, стохастическое моделирование, вероятностная оценка.

Для цитирования:

Купцов Н. В. Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала / Н. В. Купцов, А. Л. Кузнецов, А. В. Шатилин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

Введение (Introduction)

В соответствии с нормами технологического проектирования морских портов¹ результат расчетов пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) фиксируется детерминированной величиной, т. е. одним численным значением. Полученный в таком виде результат зачастую сильно занижает возможности и потенциал грузооборота экспортных терминалов, что способствует появлению взаимного недоверия между научно-проектным сообществом (исполнителем) и промышленными компаниями (заказчиком). Во многом это связано с необходимостью использования коэффициентов «технического незнания» [1]: простая причала по метеорологическим факторам — $K_{мет}$, перехода от технической к эксплуатационной производительности — K_c , занятости причалов обработкой судов — $K_{зан}$. Получается, что существующая нормативная база в области технологических решений морских портов оперирует *аналитическим методом моделирования*, позволяющим получать дискретные результаты. Выполняется перемножение средних значений расчетных параметров, результатом расчета является единственное значение, что приводит к получению приблизительных консервативных результатов. Существующее противоречие формирует научную проблему отсутствия современных качественных методов определения пропускной способности МГФ портовых терминалов, удовлетворяющих потребности вводимых в Российской Федерации к 2030 г. объектов. Это стимулирует разработку и развитие новых методов моделирования, в том числе стохастических. Стохастические модели расчета позволяют учитывать влияние нескольких параметров и получить диапазон результатов как наиболее вероятный базовый вариант развития событий (вероятность P50 — вероятность 50 %, от англ. «Prob-

¹ СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов». Введ. 01.09.2018.

ability»), а также оптимистическую (вероятность P10) и пессимистическую (вероятность P90) оценки целевых значений грузооборота. Вероятностный подход предусматривает учет влияния неопределенности оценки каждого из исходных параметров уравнения подсчета, т. е. возможность их увеличения или уменьшения, и по полученным диапазонам неопределенностей позволяет получить широкий диапазон результатов.

В работах отечественных и зарубежных авторов по тематике современных морских портов значительное внимание уделено исследованиям контейнерных терминалов. Касательно угольных навалочных терминалов существует небольшое количество публикаций и наработок различных направлений и специализаций, что обусловлено относительной давностью данного направления. В то же время радикально изменившаяся технико-экономическая и коммерческая среда требует нового подхода, который в полной мере в существующих работах не отображен.

Наибольший вклад в решение научных задач, связанных с деятельностью угольных экспортных терминалов, внесли иностранные специалисты: V. H. Barros [2], U. S. Bugaric [3], T. A. Van Vianen [4]–[6], A. J. A. Kleinheerenbrink [7], H. Ligteringen [8], T. A. Robenek [9], C. A. Thorensen [10], N. Umang [11]. В международном научном сообществе существуют различные школы: в Нидерландах (Delft University of Technology) исследуют навалочные терминалы в качестве комплексной взаимосвязанной технологической системы, в Австралии (The University of Newcastle TUNRA Bulk Solids) большее внимание уделяют исследованиям оборудования для перевалки и транспортировки потока груза, в Южной Кореи (Pohang University of Science and Technology) внимание акцентировано на составлении расписаний и планирование операций судов-балкеров.

Среди работ отечественных ученых существует ограниченное количество исследований о навалочных терминалах, среди которых необходимо выделить работы Я. Б. Спасского [12], [13], посвященные повышению эффективности управления перегрузочными процессами и математическому имитационному моделированию навалочных терминалов. Исследованием общих вопросов моделирования и технологических процессов ненавалочных терминалов проводилось следующими авторами: И. О. Бондаревой [14], С. С. Павленко [15], В. А. Погодиным [16], А. Л. Степановым [17], А. А. Хановой [18]. Большие исследования по моделированию процессов контейнерных терминалов выполнены в работах А. Л. Кузнецова, А. В. Кириченко, А. Д. Семенова и В. Н. Щербаковой-Слюсаренко [19]–[23], что позволяет сформировать базис для проведения подобных исследований для навалочных угольных терминалов.

Российские исследователи в большей степени рассматривают фундаментальные задачи функционирования морских терминалов, в то время как зарубежные в качестве объекта изучения выбирают численные методики моделирования и расчетов как отдельных технологических зон (МГФ, складская зона, железнодорожный грузовой фронт), так и терминалов в целом. Вероятностная оценка грузопотоков стохастическими методами моделирования находится на ранних стадиях проработок некоторых авторов, что связано с недавним возникновением направления и развитием программного обеспечения в течение последних десятилетий.

Стохастическое моделирование базируется на использовании статистических технологий, наиболее распространенной из которых является *моделирование методом Монте-Карло*. В процессе моделирования из произвольной выборки значений вероятностного распределения данных для каждого параметра выполняется подстановка в заданное уравнение подсчета. Цикл повторяется многократно, что позволяет построить график вероятностного распределения результатов. В мировой практике стохастическое моделирование является актуальной современной методикой, применяемой для вероятностной статистической оценки характеристик сложных динамических систем в различных сферах деятельности. В качестве научного направления стохастическое моделирование интенсивно развивается при инвестиционной оценке проектов и риск-менеджменте, а также при решении прикладных задач различных отраслей: аэрокосмическая отрасль, сельское хозяйство, банковская сфера, строительство, армия, спорт, медиапространство, окружающая среда, медицина, фармацевтика, безопасность, юриспруденция, недвижимость, продажи, телекоммуникации, энергетика, страхование, нефтегазовая отрасль. В за-

рубежной практике наблюдается рост интереса к стохастическому моделированию, в частности, транспортно-логистические вероятностные исследования выполняют зарубежные университеты: Technical University of Denmark, Ohio State University и Pennsylvania State University, при этом в российском научном и проектном сообществе данная методика не распространена.

Целью исследования является увеличение точности и соответствия расчетной пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых экспортных угольных терминалов. Основной научной гипотезой, которая находится в основе данного исследования, служит положение о том, что для решения этой сложной научной задачи создание и апробация методики стохастического моделирования позволят повысить качество результатов, что, в свою очередь, обеспечит конкурентоспособность портов и эффективность логистических цепочек поставок угля. Достижение сформулированной цели предполагает решение следующих частных задач исследования:

- разработка логики, структуры и состава элементов модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ методами стохастического моделирования;
- разработка методики вероятностной оценки пропускной способности МГФ с применением стохастического моделирования, рекомендаций по ее использованию и средствам доказательства адекватности модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье выполнена разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) угольных экспортных терминалов, использующих конвейерную механизацию. Помимо моделирования использованы следующие методы:

- для формирования технологической схемы МГФ выполнен анализ нормативных, публицистических и научных источников; глубинный анализ (Data Mining) судопогрузочного оборудования и характеристик судов-балкеров; проектной документации российских терминалов: эксплуатируемых «Ростерминалуголь» и «Дальтрансуголь», проектируемых перспективных «Таманский терминал навалочных грузов» и «УППК Север»;
- для формирования распределений вероятности выполнен анализ судопогрузочных циклов при эксплуатации существующих современных терминалов по экспортной перевалке угля, анализ производственной статистики и таймшитов терминала «Дальтрансуголь»;
- при составлении вероятностной модели применялись анализ и аппроксимация подходов к стохастическим методам моделирования и вероятностной оценки из смежных областей науки, а именно: подсчет запасов в нефтегазовой отрасли [24], оценка надежности инженерных систем [25], расчет электрических нагрузок сложных систем [26].

Для дальнейшего моделирования составлена технологическая схема МГФ, выбраны технологическая схема и характеристики оборудования. Технологическая схема представляет симбиоз существующих в Российской Федерации высокопроизводительных угольных терминалов «Ростерминалуголь» (Усть-Луга) и «Дальтрансуголь» (Ванино). Во второй половине 2010–2020 гг. указанные терминалы имели схожесть в производительности конвейерного оборудования и годовых грузооборотах при существовании некоторых различий (благодаря двустороннему глубоководному пирсу терминал «Дальтрансуголь» может принимать суда Capesize дедвейтом до 150 000–180 000 т). Выбранная универсальная технологическая схема МГФ, где складская зона не входит в границы моделирования (рис. 1), имеет следующие характеристики:

- эксплуатационная производительность конвейерного оборудования 3500 т/ч (конвейерно-транспортная система, реclaimer, СПМ);
- дискретный тип одностороннего причала с двумя местами для швартовки судов и двумя координатными СПМ;
- приемка судов дедвейтом 25 000–185 000 т;
- целевой пропускная способность МГФ порядка 20 млн т/год грузооборота.

Применение подобной технологической схемы обладает преимуществами с точки зрения верификации полученных при исследовании результатов с фактическим грузооборотом эксплу-

атируемых терминалов «Ростерминалуголь» и «Дальтрансуголь», а также она является типовой для перспективных планируемых в будущем терминалов Российской Федерации.

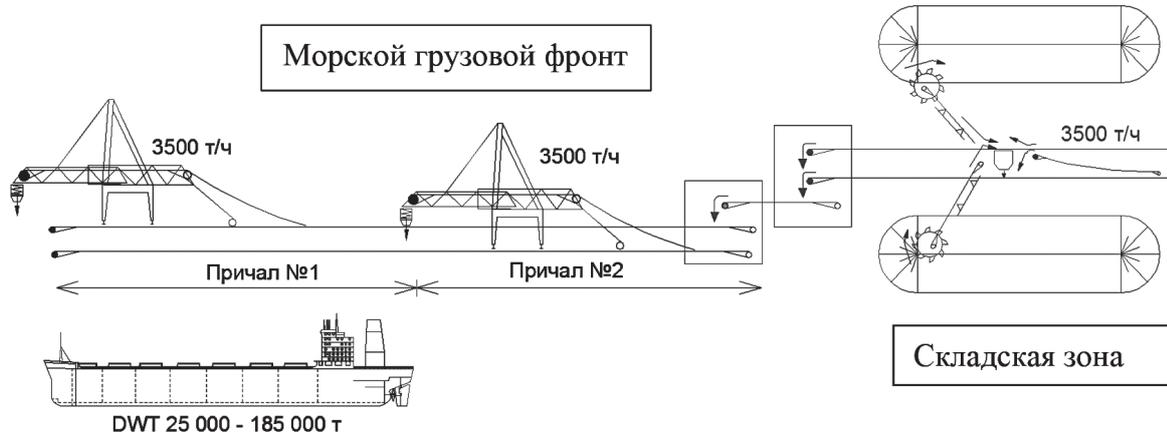


Рис. 1. Технологическая схема МГФ для выполнения моделирования

Для формирования распределения вероятностей входящих в модель исходных данных выполнены анализ и обработка следующей производственной статистики терминала «Дальтрансуголь»:

- статистика по простоям МГФ;
- распределение результатов МГФ (грузооборот, судозаходы) по тоннажным группам;
- средняя загрузка судов по тоннажным группам;
- распределение между судами с нормальной и ограниченной погрузкой;
- судовые партии судов с нормальной и ограниченной осадкой.

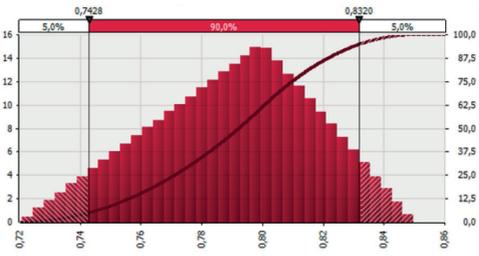
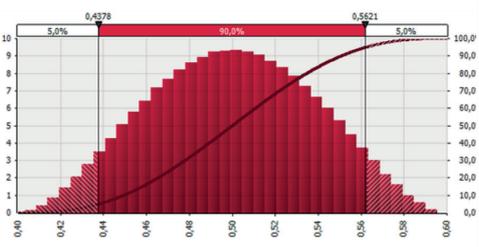
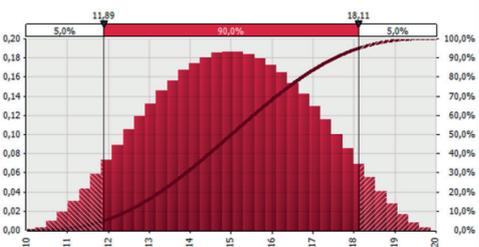
Сформированы допущения по распределениям вероятности параметров фонда рабочего времени, цикла судопогрузочных операций и судозоборота. На основе результатов обработки производственной статистики выполнена оценка минимального, среднего и максимального значений каждого параметра. Была выполнена проверка корректности подбора распределений по пяти критериям: информационный критерий Акайке, информационный критерий Байеса, статистика хи-квадрат, статистика Колмогорова – Смирнова, статистика Андерсона – Дарлингга. В итоге для большинства параметров выбраны треугольное или PERT распределения, что связано с имеющейся статистической выборкой и выполненной проверкой. В табл. 1 в качестве примера представлены распределения вероятности параметров для части исходных данных внутри цикла судопогрузочных операций.

Таблица 1

Распределение вероятностей параметров внутри цикла судопогрузочных операций

№ п/п.	Наименование параметра	Распределение вероятности	Графическое отображение
1	Судовая партия судов с нормальной осадкой, т	распределение Pert: – DWT 10–25: мин. 17900, ср. 18800, макс. 19300; – DWT 25–50: мин. 31800, ср. 32900, макс. 34800; – DWT 50–80: мин. 61300, ср. 63700, макс. 65400; – DWT 80–120: мин. 77600, ср. 80540, макс. 82500; – DWT >120: мин. 133900, ср. 146100, макс. 158500	<p>для судов DWT 50-80</p>

Окончание табл. 1

2	Наполненность трюма с ограниченной осадкой, %	треугольное распределение – DWT 10–25: мин. 77 %, ср. 80%, макс. 83 % – DWT 25–50: мин. 70 %, ср. 81 %, макс. 85 % – DWT 50–80: мин. 72 %, ср. 80 %, макс. 85 % – DWT 80–120: мин. 71 %, ср. 78 %, макс. 84 % – DWT >120: мин. 78 %, ср. 80 %, макс. 82 %	 <p>для судов DWT 50-80</p>
3	Подход к причалу, ч; швартовка, ч; отшвартовка, ч; отход от причала, ч	распределение Pert: мин. 0,4; ср. 0,5; макс. 0,6 %	
4	Скорость перемещения СПМ между трюмами, м/мин	распределение Pert: мин. 10, ср. 15, макс. 20	

Для формирования алгоритма вычислений модели в качестве первого шага подготовлена детерминированная модель определения пропускной способности терминала, в которой однозначно определены расчетная логика, последовательность операций и учтены все факторы, скрытые в коэффициентах «инженерного незнания». Затем на основе детерминированной модели сформирована стохастическая модель, учитываются распределения параметров.

Модель состоит из трех взаимозависимых модулей:

- фонда рабочего времени;
- судопогрузочных операций;
- пропускной способности.

Элементы внутри расчетных модулей обладают связями, которые влияют на пропускную способность МГФ. Общая блок-схема связей элементов модели представлена на рис. 2.

В рамках модуля «Фонд рабочего времени» (рис. 3) вычисляется доступное время работы СПМ. Для его вычисления из максимально теоретически возможного фонда рабочего времени вычитаются суммы времени простоев СПМ по различным факторам:

$$T_{\text{раб}} = T_{\text{max}} - T_{\text{пр}}$$

T_{max} — максимально возможный фонд рабочего времени, ч;

$T_{\text{пр}}$ — сумма простоев (неуправляемые и управляемые), ч.

В рамках модуля «Судопогрузочные операции» (рис. 4) определяется длительность цикла судопогрузочных операций, зависящая от судовой партии, подготовительных операций на рейде, маневровых операций в акватории, производственных операций по погрузке угля в судно, операций по оформлению документации при нахождении судна у причала.

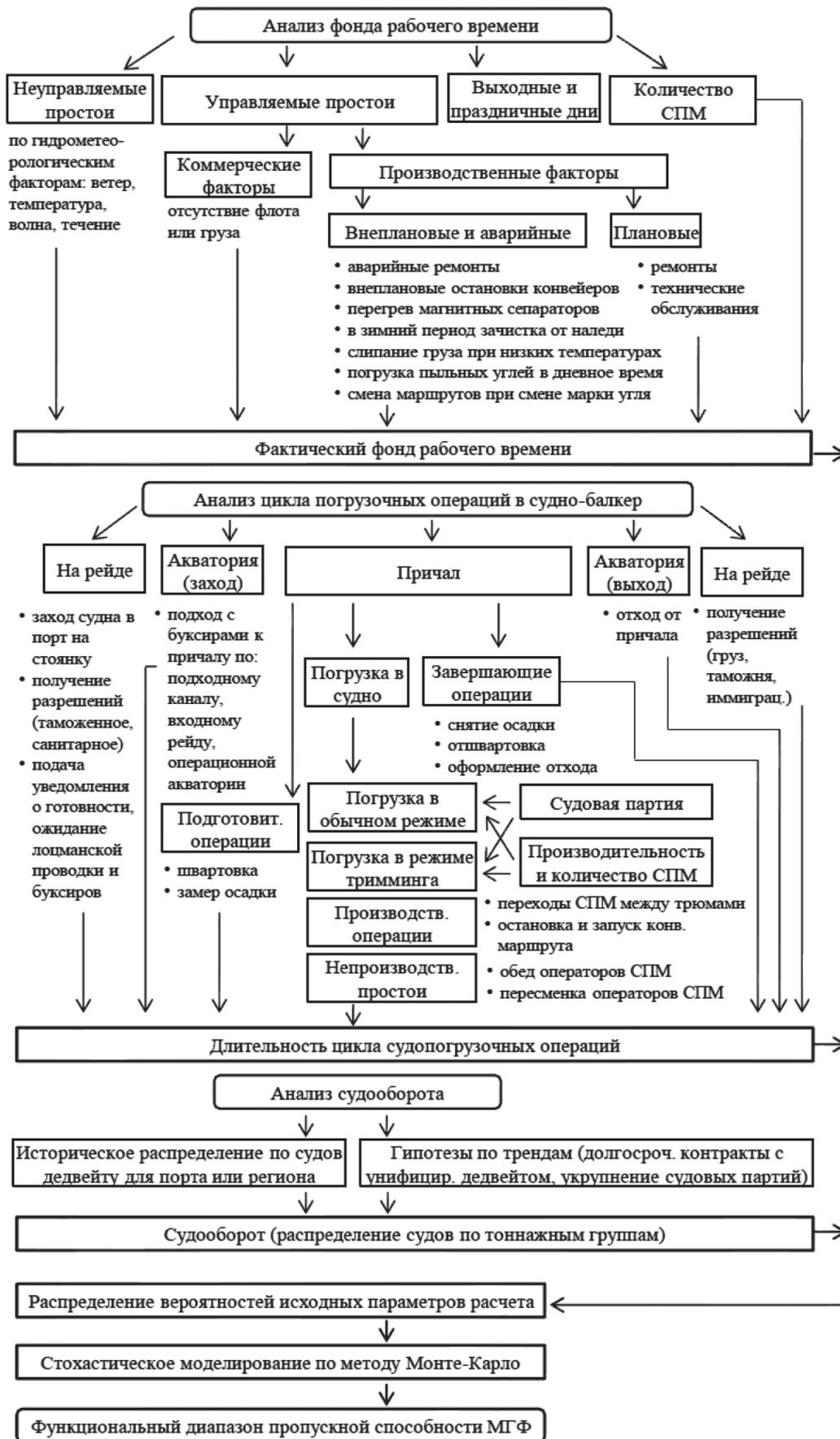


Рис. 2. Блок-схема модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ

Максимально возможный фонд рабочего времени (на одну СПМ)

8 760 ч/год

Количество СПМ

2 шт

Максимально возможный фонд рабочего времени (все СПМ)

17 520 ч/год

Неуправляемые простои								
а	Простой метео (непогода + ледовая обстановка), лето-весна	6	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
б	Простой метео (непогода + ледовая обстановка), зима	6	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
Управляемые простои								
2.1 Коммерческие факторы								
а	Отсутствие флота, лето-весна	6	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
б	Отсутствие флота, зима	6	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
в	Отсутствие груза	12	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
2.2 Производственные факторы								
2.2.1 Плановые								
а	Плановые ремонты (СПМ, конвейеров)	5	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
б	Плановые технические обслуживания	7	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
2.2.2 Внеплановые и аварийные								
а	Аварийные ремонты (СПМ, конвейеров)	да/нет		x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
б	Внеплановые остановки конвейеров (некорректный ход ленты; перегревы; перекос ленты; сработал тяговый шнур)	12	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
в	Перегрев магнитов	7	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
г	В зимний период доп. зачистки от наледи (барабаны и др.)	6	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
д	Сползание угля при низких температурах	4	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
е	Смена маршрутов при смене марки угля	12	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
ж	Погрузка пыльных углей (в дневное время), лето-весна-осень	8	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
з	Погрузка пыльных углей (в дневное время), зима	4	мес	x	<input type="radio"/>	ч =	<input type="radio"/>	ч
ИТОГО фонд рабочего времени: <input type="radio"/> ч								

Рис. 3. Модуль
«Фонд рабочего времени»

При этом наибольшую длительность занимает погрузка на судно, выполняемая в режимах обычной погрузки и тримминга, при этом производительность СПМ снижается при переходах между трюмами и простоях из-за необходимых действий операторов СПМ (обед, пересменка). Длительность цикла судопогрузочных операций определяется по формуле

$$T_{\text{судопогр}} = T_{\text{рейд}} + T_{\text{подх}} + T_{\text{шварг}} + T_{\text{погр}} + T_{\text{пр}} + T_{\text{отх}}$$

где $T_{\text{судопогр}}$ — длительность цикла судопогрузочных операций, ч;

$T_{\text{рейд}}$ — длительность подготовительных операций оформления на рейде, ч;

$T_{\text{подх}}$ — длительность подхода по подходному каналу в сопровождении буксиров и швартовки, ч;

$T_{\text{погр}}$ — длительность погрузки угля в судно, учитывая длительность обычной погрузки, тримминга, обедов и пересменок операторов СПМ, ч;

$T_{\text{пр}}$ — длительность отшвартовки и операций по оформлению у причала (снятие осадки, оформление отхода портнадзором), ч;

$T_{\text{отх}}$ — длительность отхода по каналу в сопровождении буксиров, ч.

Внутри модуля «Пропускная способность» (рис. 5) необходимо задать доли судов каждой тоннажной группы. Затем выполняется расчет судозаходов и пропускной способности:

$$P_{\Gamma} = \sum_{j=1}^m P_{\Gamma j} = T_{\text{раб}} \sum_{j=1}^m \frac{A_j D_j}{T_{\text{судопогр} j}}$$

где $\sum P_{\Gamma j}$ — сумма пропускных способностей для всех тоннажных групп судов, т/год;

A_j — доля расчетных судов типа j в общем объеме грузооборота, %;

D_j — судовая партия судна типа j , т;

$T_{\text{судопогр}}$ — длительность цикла судопогрузочных операций для расчетных судов типа j , ч.

Характеристики судов		DWT 10-25		DWT 25-50		DWT 50-80		DWT 80-120		DWT >120	
		норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.
	Дедвейт, т	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
	Длина (LOA), м	159	159	185	159	215	159	230	159	270	159
	Длина между трюмами (LOH), м	132	132	154	132	178	132	191	132	224	132
	Количество трюмов, шт	5	5	5	5	7	7	7	7	9	9
	Расстояние между трюмами, м	33	33	38	33	30	22	32	22	28	16
	Судовая партия, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Наполненность трюма	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
Цикл погрузки судов											
а	На рейде: заход судна в порт на стоянку, ч										0
б	На рейде: получение разрешений (таможенное, санитарное), ч										0
в	На рейде: Подача уведомления о готовности, ожидание лоцмана/буксиров, ч										0
г	Акватория: подход к причалу, ч	○ около 0,5 ч									
д	Причал: швартовка, ч	○ около 0,5 ч									
е	Причал: замер осадки (initial draught survey) ч	○ около 1 ч									
Погрузка в судно											
	Производительность обьной погрузки в судно, т/ч	○ около 3500 т/ч									
	Судовая партия обьной погрузки, %	95%	80%	96%	80%	97%	80%	97%	80%	97%	80%
	Партия, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Судовая партия на каждую СПМ, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ж	Длительность обьной погрузки, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Производительность тримминга, т/ч	○ 10% от обьной погрузки									
	Судовая партия тримминга, %	5%	20%	4%	20%	3%	20%	3%	20%	3%	20%
	Партия, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Судовая партия тримминга на каждую СПМ, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
и	Длительность тримминга, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Время на непроизводственные операции СПМ											
1) Переходы между трюмами											
	Количество подходов к каждому трюму, шт.	○ обьно 3 подхода к каждому трюму									
	Количество трюмов на каждую СПМ, шт.	2,5	2,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	4,5	
	Скорость перемещения СПМ между трюмами, м/мин	○ около 15 м/мин									
	Остановка конвейерного маршрута, мин	○ конвейерный маршрут 2 км; скорость ленты 4,5 м/с									
	Время на одно раскрепление СПМ, мин	○ около 1 мин									
	Время на одно перемещение между трюмами, мин	○ около 1 мин									
	Время на одно закрепление СПМ, мин	○ конвейерный маршрут 2 км; скорость ленты 4,5 м/с									
	Запуск конвейерного маршрута	○ конвейерный маршрут 2 км; скорость ленты 4,5 м/с									
	Итого, мин:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
к	Итого время на переходы между трюмами, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2) Обед операторов СПМ (30 мин, 2 раза в день)											
	Обедов в течение цикла судопогрузочных операций, шт.	○ 1 шт. каждые 12 ч									
л	Длительность обедов, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3) Пересменка операторов СПМ (30 мин, 2 раза в день)											
	Пересменок в течение цикла судопогрузочных операций, шт.	○ 1 шт. каждые 12 ч									
м	Длительность пересменок, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
н	Причал: Снятие осадки (final draught survey)	○ около 1 ч									
п	Причал: Отшвартовка	○ около 0,5 ч									
р	Причал: Оформление отхода портнадзором	○ около 1 ч									
с	Акватория: отход от причала	○ около 0,5 ч									
т	На рейде: получение разрешений (cargo documents issuing/clearance, custom, immigration), ч										0
Длительность цикла судопогрузочных операций, ч		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Рис. 4. Модуль «Судопогрузочные операции»

	Доля по тоннажным группам, %	Суда с нормальной и ограниченной осадкой		Пропускная способность, т/год
		Норм.	Огранич	
DWT 10-25	○	72,5% ○ шт.	27,5% ○ шт.	○
DWT 25-50	○	70% ○ шт.	30% ○ шт.	○
DWT 50-80	○	75% ○ шт.	25% ○ шт.	○
DWT 80-120	○	90% ○ шт.	10% ○ шт.	○
		ИТОГО:		○ шт.

Рис. 5. Модуль
«Пропускная способность»

Таким образом, в детерминированном варианте последовательного алгоритма вычислений сформирован расчетный алгоритм модели расчета пропускной способности МГФ экспортного угольного терминала. Сформированная функционально-логическая целостность позволяет, применив программный продукт @Risk, выполнить стохастическое моделирование с использованием распределений вероятности расчетных параметров.

В процессе моделирования для каждого параметра, который может принимать любое значение в соответствии с описанным статистическим законом (вероятностным распределением), выполняется подстановка в заданное уравнение подсчета, описанного математической моделью. Цикл повторяется многократно, результат каждой итерации фиксируется. Итогом становится распределение вероятностей возможных последствий. Моделирование по методу Монте-Карло дает гораздо более полное представление о возможных событиях, позволяя оценить не только результат, но и вероятности такого исхода. Для параметров, оказывающих влияние на пропускную способность МГФ, заданы распределения вероятности, а также отражены причинно-следственные закономерности. Благодаря этому сформирована стохастическая модель пропускной способности МГФ экспортного угольного терминала. В разработанной модели выполнены эксперименты, результаты которых представлены далее.

Результаты (Results)

Моделирование методом Монте-Карло для каждого эксперимента выполнено в 5000 перерасчетов-итераций (рис. 6), что позволяет благодаря генерации случайных чисел в каждом из «прогнозов» получить усредненные результаты. При вероятностном расчете модель непрерывно пересчитывается на каждой из итераций.

В каждой итерации расчетная модель пересчитывается с новым набором исходных параметров, что приводит к новым значениям результатов. Результат каждой итерации фиксируется, что позволяет благодаря собранной статистике в итоге сформировать графическое распределение вероятных результатов (оптимистичных, средних, пессимистичных) и выполнить анализ чувствительности параметров, наиболее оказывающих влияние на результат.

Выполнен эксперимент с условным терминалом, приближенным по параметрам к существ-

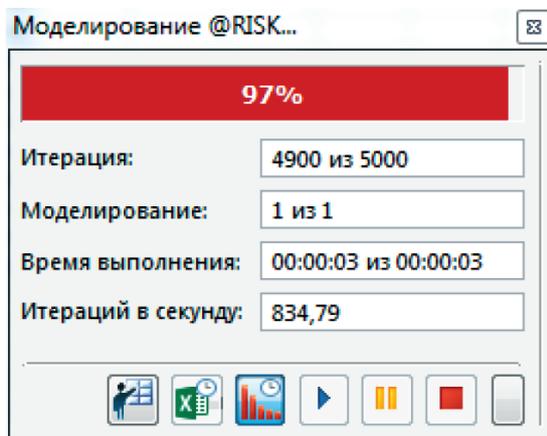


Рис. 6. Моделирование
методом Монте-Карло

вующему терминалу «Дальтрансуголь». Терминал расположен в порту Ванино, для отгрузки в суда используется глубоководный пирс. Ситуационный план терминала и МГФ представлен на рис. 7.

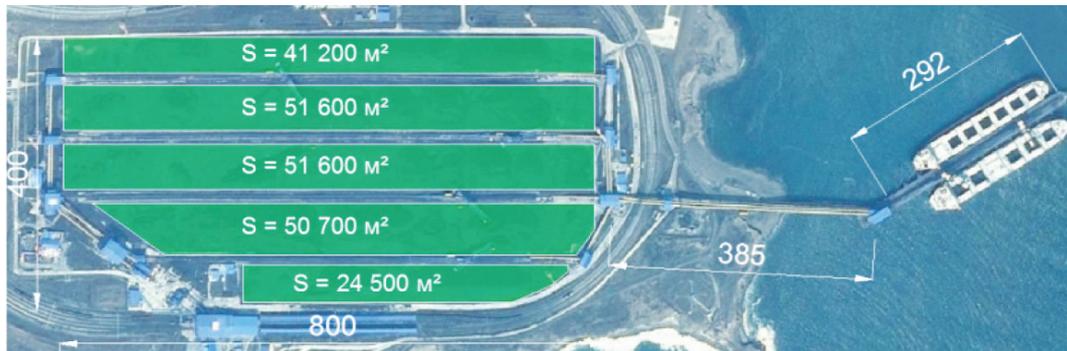


Рис. 7. Ситуационный план терминала «Дальтрансуголь»

В целом моделируемую систему можно охарактеризовать следующим образом. МГФ экспортного угольного терминала выполняет перевалку грузов в суда-балкеры дедевитом до 220 000 т с помощью двух СПМ, производительность каждой из которых составляет 3500 т/ч (производительность соответствует заполнению 75% черпаков на колесе реклаймера). Наиболее распространенными тоннажными группами судов являются 50 000–80 000 т и 80 000–120 000 т, обеспечивающие по 40 % грузооборота каждая. Для 25 % судов выполняется отгрузка неполной судовой партии в связи с конструктивными особенностями или ограничениями по осадке у причала. Для экономии дорогостоящего времени стоянки у причала оформление судов выполняется на рейде. Из-за климатического расположения, терминал подвержен длительному зимнему периоду с не всегда пригодными для погрузки гидрометеорологическими условиями. Периодически возникает простой судопогрузочных операций, когда складская зона (СЗ) не может в полной мере обеспечить необходимое количество груза для МГФ. В некоторые суда выполняется отгрузка различных марок угля в соответствии с потребностью покупателя и контрактными обязательствами. Выполнено стохастическое моделирование в соответствии с логикой модели и исходными параметрами, приведенным в разделе «Методы и материалы».

С точки зрения квантильной оценки результатов медиане x_2 (50 % квантиль) соответствует пропускная способность 20, 47 млн т/год, а квантилям x_1 (25 % квантиль) = 22,81 млн т/год и x_3 (75 % квантиль) = 17,96 млн т/год. Интегральная кривая квантильной оценки представлена на рис. 8.

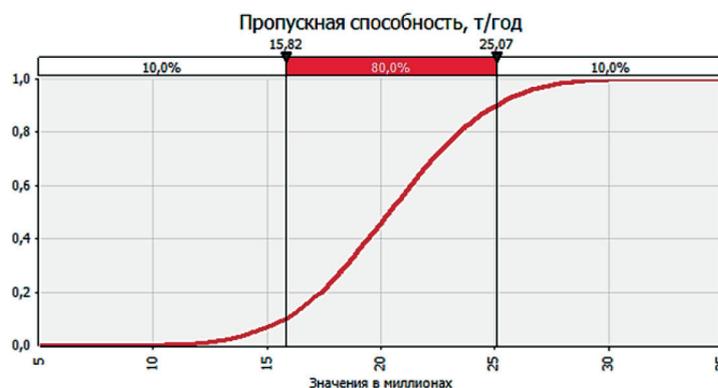


Рис. 8. Интегральная кривая

При этом для выборки в 100 итераций (лет) при 95 % доверительном интервале нижний лимит пропускной способности составит 19,69 млн т/год и верхний лимит 21,10 млн т/год — узкий

интервал указывает на точную оценку. Получается, что при генерировании случайных исходных параметров в итоге средним результатом (вероятность P50, медиана) для моделируемого терминала «Дальтрансуголь» является пропускная способность 20,47 млн т/год, оптимистичным (P10) — 24,94 млн т/год, пессимистичным (P90) — 15,75 млн т/год. Диапазон полученных результатов является адекватным, принимая во внимание фактические значения грузооборота от 17,0 млн т в 2015 г. до 20,1 млн т в 2018 г. Плотность вероятности пропускной способности МГФ приведена на рис. 9.

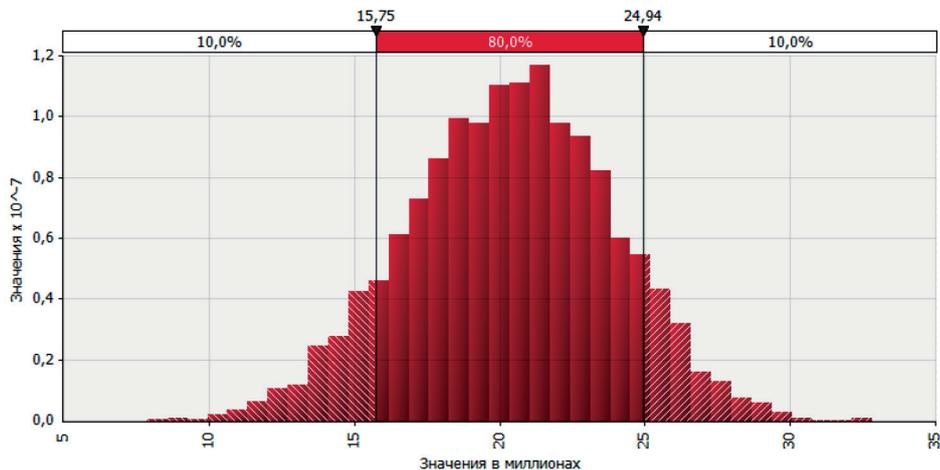


Рис. 9. Плотность вероятности пропускной способности МГФ

Влияние на возможность выполнения судопогрузочных операций оказывает расчетный фонд рабочего времени. Для двух СПМ максимальное теоретическое время работы 17 520 ч/год, что недостижимо в реальности в связи с неуправляемыми простоями в связи с метеоусловиями и управляемыми производственными простоями. При выполнении стохастического моделирования получены следующие значения фонда рабочего времени (рис. 10): среднее (P50) — 7 449 ч, оптимистичное (P90) — 9 071 ч, пессимистичное (P10) — 5 728 ч.

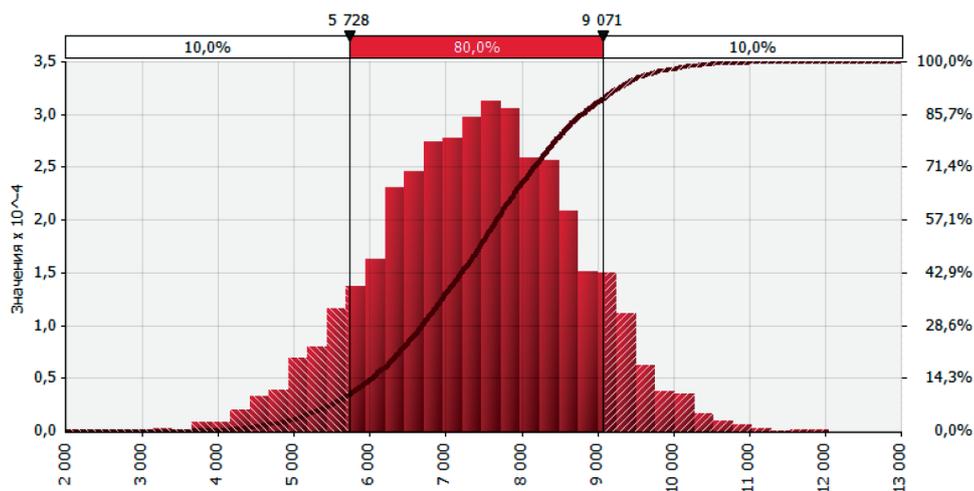


Рис. 10. Фонд рабочего времени

Чтобы оценить степень влияния исходных параметров, построен график чувствительности к изменению параметров, позволяющий определить как меняется результат пропускной способности в зависимости от варьирования значения основных входных параметров. При анализе графика определены наиболее влияющие на результат параметры. График чувствительности представлен на рис. 11.

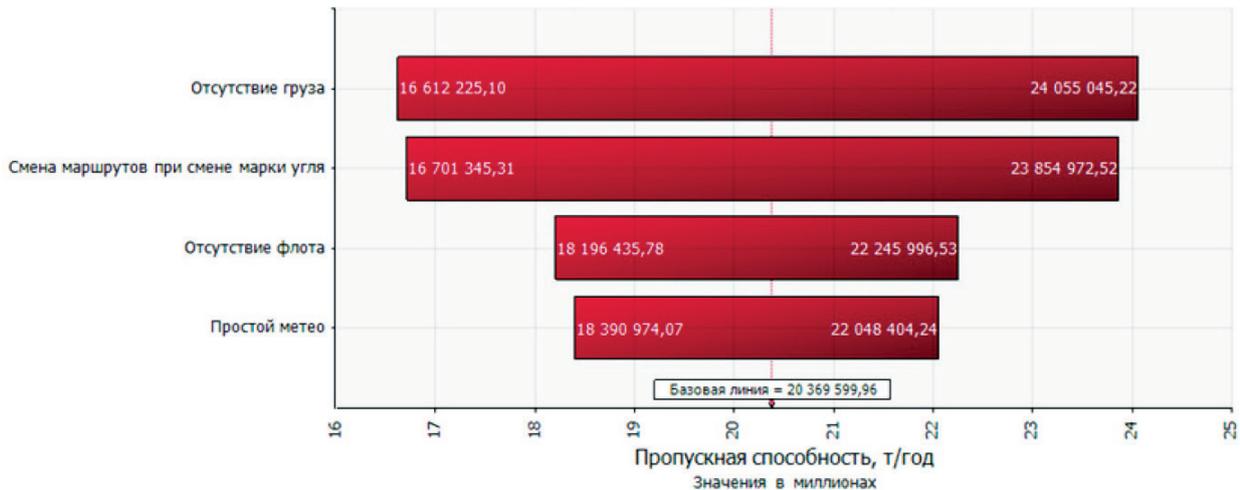


Рис. 11. Анализ чувствительности

Наибольшее влияние на результат оказывают операции, во время которых МГФ простаивает в длительном ожидании. К таковым относятся отсутствие груза в СЗ (влияние на результаты $\pm 3,8$ млн т/год), смена конвейерных маршрутов при смене марки угля ($\pm 3,6$ млн т/год), отсутствие флота ($\pm 2,0$ млн т/год), простои по метеоусловиям ($\pm 2,0$ млн т/год). Простои по метеоусловиям относятся к неуправляемым параметрам, в то время как терминал может улучшать эффективность при воздействии на управляемые простои, связанные с наличием угля, заблаговременным заключением контрактов коммерческого флота, накоплением резервных судовых партий в СЗ.

Обсуждение (Discussion)

По результатам выполненных экспериментов и анализа результатов стохастического моделирования выполнена проверка модели, при этом было отмечено следующее.

В целом результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что поведение разработанной в исследовании стохастической математической модели достаточно точно совпадает с поведением моделируемых объектов. Модель позволяет с уверенностью определить свойства системы экспортной перевалки угольных грузов через МГФ с получением диапазона результатов пропускной способности МГФ, что и требуется от прогнозирования результатов при помощи модели. Таким образом, установлена *адекватность* модели.

Разработанная модель вероятностной оценки пропускной способности МГФ экспортных угольных терминалов с высокой точностью позволяет определять свойства элементов и их влияние на результат, на основании которых можно сделать вывод, что модель *валидна*.

При изменении исходных данных модель сохраняет устойчивость. При пересчете одного или нескольких параметров возникает изменение результатов пропускной способности в разумном диапазоне, что свидетельствует о достаточной *чувствительности* модели.

При использовании алгоритма модели для абсолютно новых исходных данных модель с достаточной точностью позволяет прогнозировать диапазон пропускной способности МГФ. Получается, что модель удовлетворяет требованиям *устойчивости*.

Анализ функционирования сложной транспортной системы с условием высокой детализации с помощью только численных методов сталкивается со значительными трудностями, приводящими к необходимости существенного упрощения моделей и получению недостоверных результатов. Поэтому в зарубежной науке XXI в. для исследования транспортных систем получают популярность вероятностные модели, редко применяемые в РФ в связи с нехваткой знаний и опыта [27]. Технологические процессы в порту отличаются разнообразием по характеру, динамике и интенсивности, а именно: различия в интенсивности грузовых операций технологических зон, конструктивные и технологические особенности транспорта и оборудования, непрерывно

изменяющаяся гидрометеорологическая обстановка в порту, динамичное перемещение грузов между технологическими зонами [28]. Порой без моделирования продемонстрировать заказчику корректную общую картину представляется затруднительным. Функциональный диапазон результатов, полученный в результате разработки детализированной стохастической модели, позволят укрепить доверие во взаимоотношениях «исследователь / проектировщик – заказчик» благодаря более прозрачной и точной оценке пропускной способности МГФ, а также возможности формирования гипотез по потенциалу увеличения грузооборота.

Доверие к результатам расчета формируется за счет детализированной декомпозиция процессов и численных исходных данных, а наглядность предоставления результатов моделирования — в виде гистограммы вероятностного распределения. Моделирование по методу Монте-Карло дает гораздо более полное представление о возможных вариантах развития событий и имеет ряд преимуществ по сравнению с детерминистическим анализом (табл. 2).

Таблица 2

Преимущества моделирования по методу Монте-Карло

Преимущество	Описание
Вероятностные результаты	Имеется возможность получить в качестве результата значения медианы искомой величины (в проведенном эксперименте порядка 20 млн т/год в качестве пропускной способности МГФ) и наименьших/наибольших результатов с вероятностью их наступления
Графическое представление результатов	Результаты каждой из множества итераций фиксируются, а итогом становится распределение вероятностей возможных последствий. Характер используемого аппарата позволяет получать графики распределения результатов в зависимости от вероятности их наступления, что формирует наглядность при демонстрации результатов заказчиком и передаче внешним заинтересованным лицам
Анализ чувствительности	Детерминистский анализ затрудняет определение того, какая из переменных в наибольшей степени оказывает влияние на результаты. При проведении моделирования по методу Монте-Карло несложно определить, какие исходные данные оказывают наибольшее воздействие на конечные результаты
Корреляция исходных данных	Метод Монте-Карло позволяет моделировать взаимозависимые отношения между исходными переменными. Для получения достоверных сведений необходимо описать, в каких случаях при увеличении некоторых факторов соответствующим образом возрастают или снижаются другие

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования создана и апробирована стохастическая модель для вероятностной оценки пропускной способности МГФ угольных экспортных терминалов. Применение стохастического моделирования позволяет увеличить точность, а также соответствие пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых угольных терминалов, что подтверждают вычислительные эксперименты. Разработаны расчетные инструменты, появилась возможность выполнения анализа чувствительности влияющих на результат факторов.

Стохастическое моделирование транспортных систем открывает новые возможности с точки зрения решения прикладных задач и обладает высоким исследовательским потенциалом. В современной российской и мировой науке не исчерпано развитие данного направления. При технологическом проектировании морских портов стохастический метод моделирования практически неизвестен специалистам в РФ. Для логистических и технических систем разработанная методика обладает потенциалом для применения с целью оптимизации неэффективных процессов и увеличения пропускной способности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение стохастического моделирования для получения диапазона пропускной способности МГФ в качестве исследовательского подхода является актуальным и логичным шагом с точки зрения развития более глубокого понима-

ния процессов и получения более точных расчетных результатов. Применение стохастического моделирования позволит повысить эксплуатационную эффективность работы и грузооборот терминалов, что способствует решению стратегической задачи отраслевого развития портовой инфраструктуры РФ.

На основе использования методов стохастического моделирования при должном уровне детализации и декомпозиции процессов возникает высокая технологическая гибкость и прозрачность демонстрации результатов. Данная методика позволяет осуществлять проектирование новых перспективных терминалов с использованием допущений по проектам-аналогам и повышать эффективность технологических операций существующих эксплуатируемых терминалов с использованием существующей производственной статистики. Помимо указанных направлений разработанная методика имеет потенциал для дальнейшего использования в следующем виде:

- в качестве альтернативного направления технологических расчетов МГФ;
- в качестве прикладного расчетного продукта для морских терминалов, в который будут интегрированы базы усредненных показателей (бенчмаркинга) и выполнена проверка эффективности получаемых результатов;
- в качестве базиса для создания отдельных методик вероятностного моделирования для прочих технологических зон терминала (складская зона, железнодорожный грузовой фронт);
- расширение методики модулями стоимостного инжиниринга и оценки экономической эффективности;
- расширение методики для формирования интегрированных моделей цельного морского терминала;
- аппроксимация алгоритма на другие промышленно-транспортные объекты и отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валькова С. С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
2. Barros V. H. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints / V. H. Barros, T. S. Costa, A. C. Oliveira, L. A. Lorena // Computers & Industrial Engineering. — 2011. — Vol. 60. — Is. 4. — Pp. 606–613. DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018.
3. Bugaric U. S. Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading / U. S. Bugaric, P. B. Petrovic, Z. V. Jeli, D. V. Petrovic // Simulation. — 2012. — Vol. 88. — Is. 12. — Pp. 1508–1521. DOI: 10.1177/0037549712459773.
4. van Vianen T. Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2014. — Vol. 42. — Pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.010.
5. van Vianen T. Belt conveyor network design using simulation / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Journal of Simulation. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 157–165. DOI: 10.1057/jos.2014.38.
6. van Vianen T. Simulation-based rescheduling of the stacker–reclaimer operation / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Journal of Computational Science. — 2015. — Vol. 10. — Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004
7. Kleinheerenbrink A. J. A. A Design Tool for Dry Bulk Terminals / A. J. A. Kleinheerenbrink. — Delft University of Technology, 2012. — 142 p.
8. Ligteringen H. Ports and terminals / H. Ligteringen, H. Velsink. — CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012. — 276 p.
9. Robenek T. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports / T. Robenek, N. Umang, M. Bierlaire, S. Ropke // European Journal of Operational Research. — 2014. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 399–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.08.015.
10. Thorensen C.A. Port designer’s handbook / C. A. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
11. Umang N. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports / N. Umang, M. Bierlaire, I. Vacca // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2013. — Vol. 54. — Pp. 14–31. DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003.

12. *Спасский Я. Б.* Автоматизация технологического проектирования портовых терминалов на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Ярослав Борисович Спасский. — СПб., 2012. — 214 с.
13. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование работы порта с учетом дифференцированных метеоусловий / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 3–8.
14. *Бондарева И. О.* Оценка качества логистического обслуживания грузового порта на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10 / Ирина Олеговна Бондарева. — Астрахань, 2010. — 226 с.
15. *Павленко С. С.* Организация системы управления грузораспределением морских контейнерных терминалов на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / Сергей Сергеевич Павленко. — СПб., 2016. — 179 с.
16. *Погодин В. А.* Обоснование оптимальных технологических параметров контейнерных комплексов: дис. ... канд. техн. наук / Владимир Алексеевич Погодин. — Л., 1989. — 201 с.
17. *Степанов А. Л.* Перегрузочное оборудование портов и транспортных терминалов / А. Л. Степанов. — СПб.: Политехника, 2013. — 427 с.
18. *Ханова А. А.* Методология стратегического управления грузовым портом на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Анна Алексеевна Ханова. — Астрахань, 2013. — 32 с.
19. *Кузнецов А. Л.* Бенчмаркинг-показатели в технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
20. *Щербакова-Слюсаренко В. Н.* Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
21. *Кузнецов А. Л.* Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.
22. *Кузнецов А. Л.* Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.
23. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
24. *Емельянова Н. М.* Возможность использования вероятностных оценок запасов при управлении углеводородными ресурсами / Н. М. Емельянова, В. И. Пороскун // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2006. — № 12. — С. 67–71.
25. *Белов В. П.* Аналитико-статистический метод оценки надёжности систем управления и навигации подвижных объектов / В. П. Белов, А. Д. Голяков, С. Я. Старков // Сборник докладов НТК «Радиолокация, навигация, связь». — 2003.
26. *Соколянский П. А.* Вероятностные методы расчета электроэнергетической системы предприятия / П. А. Соколянский, В. И. Хименко // Фундаментальные исследования. — 2005. — № 7. — С. 42–44.
27. *Фетисов В. А.* Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 3–7.
28. *Проталинский О. М.* Концепция интеллектуального управления технологическими процессами грузового порта на основе имитационных моделей / О. М. Проталинский, А. А. Ханова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2007. — № 1 (36). — С. 46–49.

REFERENCES

1. Valkova, Svetlana S. “Stochastic method for sea port storage capacity calculation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
2. Barros, Victor Hugo, T.S. Costa, A.C. Oliveira, and L.A. Lorena. “Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints.” *Computers & Industrial Engineering* 60.4 (2011): 606–613. DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018.
3. Bugarcic, Ugljesa S., P.B. Petrovic, Z.V. Jeli, and D.V. Petrovic. “Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading.” *Simulation* 88.12 (2012): 1508–1521. DOI: 10.1177/0037549712459773.
4. Van Vianen, Teus, Jaap Ottjes, and Gabriël Lodewijks. “Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals.” *Simulation Modelling Practice and Theory* 42 (2014): 119–128. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.010
5. van Vianen, T., J. Ottjes, and Gabriël Lodewijks. “Belt conveyor network design using simulation.” *Journal of Simulation* 10.3 (2016): 157–165. DOI: 10.1057/jos.2014.38.
6. Van Vianen, Teus, Jaap Ottjes, and Gabriël Lodewijks. “Simulation-based rescheduling of the stacker–reclaimer operation.” *Journal of Computational Science* 10 (2015): 149–154. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004.
7. Kleinheerenbrink, A. J. A. *A Design Tool for Dry Bulk Terminals*. Delft University of Technology, 2012.
8. Ligteringen, H., and H. Velsink. *Ports and terminals*. CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012.
9. Robenek, Tomáš, N. Umang, M. Bierlaire, and S. Ropke. “A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports.” *European Journal of Operational Research* 235.2 (2014): 399–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.08.015.
10. Thorensen, C. A. *Port designer’s handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
11. Umang, Nitish, Michel Bierlaire, and Ilaria Vacca. “Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 54 (2013): 14–31. DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003.
12. Spasskii, Ya. B. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo proektirovaniya portovykh terminalov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. SPb., 2012.
13. Kuznetsov, A. L., V. A. Pogodin, and Y. B. Spasskiy. “The simulation modeling of the port operations subject to differentiated weather conditions.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 3–8.
14. Bondareva, I. O. *Otsenka kachestva logisticheskogo obsluzhivaniya gruzovogo porta na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. Astrakhan’, 2010.
15. Pavlenko, S. S. *Organizatsiya sistemy upravleniya gruzoraspredeleniem morskikh konteynernykh terminalov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. SPb., 2016.
16. Pogodin, V. A. *Obosnovanie optimal’nykh tekhnologicheskikh parametrov konteynernykh kompleksov*. PhD diss. Leningrad, 1989.
17. Stepanov, A. L. *Peregruzochnoe oborudovanie portov i transportnykh terminalov*. SPb.: Politehnika, 2013.
18. Khanova, A. A. *Metodologiya strategicheskogo upravleniya gruzovym portom na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. Abstract of Dr. diss. Astrakhan’, 2013.
19. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Benchmarking indicators in technological design of container terminals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
20. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. “The development of the functional model for the “dry port” type container terminal and principles of its use in the technologic design.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
21. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Set theory model for the assessment of the container terminal’s operational resources.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-5-1094-1103.
22. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. “Application the simulation modeling methods for planning a container terminal internal operations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

23. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

24. Emel'yanova, N. M., and V. I. Poroskun. "Vozmozhnost' ispol'zovaniya veroyatnostnykh otsenok zapasov pri upravlenii uglevodorodnymi resursami." *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* 12 (2006): 67–71.

25. Belov, V. P., A. D. Golyakov, and S. Ya. Starkov. "Analitiko-statisticheskii metod otsenki nadezhnosti sistem upravleniya i navigatsii podvizhnykh ob'ektov." *Sbornik dokladov NTK «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'.* 2003.

26. Sokolyanskii, P. A., and V. I. Khimenko. "Veroyatnostnye metody rascheta elektroenergeticheskoi sistemy predpriyatiya." *Fundamental'nye issledovaniya* 7 (2005): 42–44.

27. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 3–7.

28. Protalinsky, O. M., and A. A. Khanova. "The concept of intellectual management of technological processes of cargo port on the basis of imitating models." *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 1(36) (2007): 46–49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Купцов Николай Владимирович —
руководитель направления
ПАО «Газпром нефть»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, 3-5
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Шатилин Андрей Валерьевич —
руководитель направления
ПАО «Газпром нефть»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, 3-5
e-mail: shatilin.av@gazprom-neft.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuptsov, Nikolay V. —
Lead specialist
Gazprom Neft PJSC
3-5 Pochtamtskaya Str., St Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Shatilin, Andrey V. —
Lead specialist
Gazprom Neft PJSC
3-5 Pochtamtskaya Str., St Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: shatilin.av@gazprom-neft.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.

Received: December 25, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-35-45

MATHEMATICAL MODEL OF THE NAVIGATIONAL CELESTIAL BODIES MOTION ON THE CELESTIAL SPHERE

S. V. Kozik, A. A. Denisova, G. O. Alcybeev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Currently, in the Russian part of the shipping industry, when solving the tasks of nautical astronomy, a printed edition of the Nautical Astronomical Almanac (NAY, in Russian), every year produced by the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, is used. In the context of the digital technologies development, there is a need to create its digital analogue, capable to automatically calculate the spherical coordinates of the bodies and other navigation parameters at any given time. In the process of performing this work, a number of mathematical theories and algorithms that are necessary to implement the digital analogue of the Marine Astronomical Yearbook are analyzed. In the paper, a method for calculating the equatorial coordinates of the navigational celestial bodies (Sun, Moon, navigational stars and Venus, Mars, Jupiter and Saturn planets) for any given time is described. For the algorithm for calculating the equatorial coordinates of the navigational stars, the principles of taking into account the precession and nutation of the Earth axis, as well as aberrations, are described. Optimal numerical theories of motion (planetary theories) are selected to calculate the ecliptic coordinates of the planets, and their use is described directly for calculating the equatorial coordinates. The expansion of planetary theory DE200 proposed by J. Chapront and the theory of Variations Séculaires des Orbites Planétaires 87 proposed by P. Bretagnon are considered. A generalized set of algorithms based on the theories of the moon motion, which is necessary to calculate the equatorial coordinates of this celestial body, is considered. As a result of the analysis, the structure of the mathematical model is formed. It will form the basis of the developed «Astronomical Almanac» software, which will be an improved version of the Marine Astronomical Yearbook.

Keywords: celestial navigation, ephemerides, equatorial coordinates of planets, equatorial coordinates of the Moon, equatorial coordinates of the Sun, equatorial coordinates of stars, planetary theory.

For citation:

Kozik, Sergey V., Anastasia A. Denisova, and Gleb O. Alcybeev. "Mathematical model of the navigational celestial bodies motion on the celestial sphere." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 35–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-35-45.

УДК 527.62:521.98

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СВЕТИЛ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ

С. В. Козик, А. А. Денисова, Г. О. Алцыбеев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что в настоящее время в российском сегменте судоходной отрасли при решении навигационных задач применяется печатное издание «Морской астрономический ежегодник» (МАЕ), ежегодно издаваемое Институтом прикладной астрономии Российской академии наук. В условиях развития цифровых технологий возникает необходимость создания его цифрового аналога, способного на любой заданный момент времени автоматически рассчитывать сферические координаты светил и другие навигационные параметры. В процессе выполнения настоящей работы был проанализирован ряд математических теории и алгоритмов, необходимых для реализации цифрового аналога «Морского астрономического ежегодника». В статье описан способ вычисления экваториальных координат навигационных светил (Солнце, Луна, навигационные звезды и планеты Венера, Марс, Юпитер и Сатурн) на любой момент времени. Для алгоритма расчета экваториальных координат светил описаны принципы учета прецессии и нутации земной оси, а также aberrации. Для расчета эклиптических координат

планет выбраны оптимальные численные теории движения планет (планетарные теории), а также описано их применение непосредственно для расчета экваториальных координат. Рассмотрено расширение планетарной теории DE200, предложенное Ж. Шапроном, и теория *Variations Séculaires des Orbites Planétaires* 87, предложенная П. Бретаньоном. Рассмотрен обобщенный комплекс алгоритмов, основанный на теориях движения Луны, необходимый для расчета экваториальных координат этого светила. В результате анализа сформирована математическая модель, которая войдет в основу разрабатываемого программного обеспечения «*Astronomical Almanac*». Данное программное обеспечение будет служить альтернативной версией «Морского астрономического ежегодника» или его зарубежных аналогов.

Ключевые слова: мореходная астрономия, эфемериды, экваториальные координаты планет, экваториальные координаты Луны, экваториальные координаты Солнца, экваториальные координаты звезд, планетарные теории, эфемеридные теории.

Для цитирования:

Козик С. В. Математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере / С. В. Козик, А. А. Денисова, Г. О. Алцыбеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 35–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-35-45.

Введение (Introduction)

Мореходная астрономия (морская астронавигация) включает комплекс практических методов, необходимых для определения координат места судна в море по измеряемым высотам небесных светил. Несмотря на активное развитие спутниковой навигации, мореходная астрономия, по решению Международной морской организации, включена в «Международную конвенцию о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года» (далее — Международная конвенция) [1] как необходимая компетенция для всех судоводителей [2]. Это решение связано с тем, что средства мореходной астрономии можно использовать в качестве резервного способа определения координат судна, особенно в аварийных и форс-мажорных ситуациях [3]. Также астрономический способ определения места имеет ряд преимуществ: повсеместная доступность, полная автономность и достаточная точность для открытого моря [4]. Однако использование светил в качестве навигационных ориентиров возможно только при наличии на борту судна каталога с координатами небесных светил (например, «Морской астрономический ежегодник», выпускаемый Институтом прикладной астрономии Российской академии наук, *The Nautical Almanac*, выпускаемый совместно Военно-морской обсерваторией США и Гидрографической службой Великобритании, *Ephemerides Nautiques*, выпускаемый французским Бюро долгот и др.).

Положение Международной конвенции [1, п. 20 разд. В-II/1] гласит: «Подготовка по мореходной астрономии может включать использование электронного астрономического ежегодника и программного обеспечения машинных расчетов мореходной астрономии». Тем не менее программное обеспечение, которое способно, в должной мере, заменить «Морской астрономический ежегодник» отсутствует, а имеющиеся аналоги неудобны для решения задач мореходной астрономии, так как требуют дополнительных ручных расчетов. Исходя из этого было принято решение разработать программное обеспечение «*Astronomical Almanac*», которое сможет, в определенной степени, заменить «Морской астрономический ежегодник», обеспечивая вычисление экваториальных координат светил с точностью не хуже чем $0,1'$ на любой момент времени и некоторых других величин, используемых при решении задач мореходной астрономии.

Формирование целостной математической модели, описывающей движение навигационных светил на небесной сфере, является главной целью при разработке программного обеспечения «*Astronomical Almanac*». Для достижения поставленной цели необходимо выполнить задачи систематизации и адаптации имеющихся научных математических теорий, на основе которых осуществляется расчет экваториальных координат навигационных светил (Солнце, Луна, навигационные звезды и планеты Венера, Марс, Юпитер и Сатурн) на заданный момент времени.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для определения координат места судна в море в мореходной астрономии используются небесные светила, видимые невооруженным глазом: Солнце, Луна, наиболее яркие (навигационные) звезды, планеты Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Положение светила на небесной сфере определяется его экваториальными координатами, к которым относятся прямое восхождение α (длина дуги небесного экватора от точки весеннего равноденствия до круга склонения светила) и склонение δ (угловое расстояние на небесной сфере от плоскости небесного экватора до светила).

Исходными данными для расчета экваториальных координат являются Всемирное (гринвичское) время UT1 и дата. Так как при расчетах координат светил в теории используется равномерное эфемеридное время ET (точное земное динамическое TDT, но для точностей координат светил в представленной работе эти понятия будем считать тождественными), то Всемирное время преобразуется в эфемеридное с помощью эфемеридной поправки. В представленной работе при расчетах были учтены поправки с 1620 г. по настоящее время. При осуществлении вычислений на будущее поправка может быть экстраполирована по имеющимся значениям. Для расчета поправки на периоды до 1620 г. используется аппроксимация Далмау.

Экваториальные координаты светил непостоянны, они изменяются из-за собственного движения светила по небесной сфере, прецессии и нутации земной оси, а также аберрации. Таким образом, расчет экваториальных координат светил в общем виде можно представить в виде следующих формул:

$$\begin{cases} \alpha = \tilde{\alpha}_m + \Delta\alpha_{AB}; \\ \delta = \tilde{\delta}_m + \Delta\delta_{AB}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\tilde{\alpha}_m, \tilde{\delta}_m$ — средние места светил на текущую эпоху с учетом прецессии и нутации; $\Delta\alpha_{AB}, \Delta\delta_{AB}$ — поправки для учета аберрации [5]; α_m, δ_m — средние места светил на текущую эпоху без учета прецессии и нутации, расчет которых для различных типов светил осуществляется разными способами.

Для учета прецессии и нутации, т. е. для перехода от среднего равноденствия начальной эпохи к истинному равноденствию даты, используются следующие матрицы вращения в прямоугольной системе координат: P — матрица прецессии; N — матрица нутации. Поэтому для дальнейшего расчета необходимо сферические координаты α_m, δ_m преобразовать в прямоугольные координаты x_m, y_m, z_m . Переход от сферических координат к прямоугольным координатам осуществляется по формулам:

$$\begin{cases} x_m = \rho \cos \delta_m \cos \alpha_m; \\ y_m = \rho \cos \delta_m \sin \alpha_m; \\ z_m = \rho \sin \delta_m. \end{cases} \quad (2)$$

где ρ — расстояние от Земли до светила.

Формула для расчета матрицы прецессии имеет вид

$$P = r(-z_A)q(\theta_A)r(-\zeta_A), \quad (3)$$

где r и q — матрицы-операторы вращения относительно осей координат, которые для произвольного угла a заданы выражениями:

$$r(a) = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; q(a) = \begin{bmatrix} \cos a & 0 & -\sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin a & 0 & \cos a \end{bmatrix}, \quad (4)$$

В формуле (3) z_A, θ_A, ζ_A — прецессионные параметры, определяющие положение среднего равноденствия и экватора даты относительно среднего равноденствия и экватора начальной эпохи.

Для перехода от среднего равноденствия и экватора стандартной эпохи J2000.0 к среднему равноденствию и экватору даты используются следующие выражения для прецессионных параметров [6]:

$$z_A = 2306,2181''T + 1,09468''T^2 + 0,018203''T^3;$$

$$\theta_A = 2004,3109''T - 0,42665''T^2 - 0,041833''T^3;$$

$$\zeta_A = 2306,2181''T + 0,30188''T^2 + 0,017998''T^3,$$

где T — промежуток времени от стандартной эпохи J2000.0 в юлианских столетиях по 36525 сут.

Расчет матрицы нутации имеет вид

$$N = p(-\varepsilon - \Delta\varepsilon - d\varepsilon)r(-\Delta\psi - d\psi)p(\varepsilon), \quad (5)$$

где p и r — матрицы-операторы вращения относительно осей координат, матрица r для произвольного угла a указана в выражении (4), матрица p для произвольного угла a имеет следующий вид:

$$p(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a \\ 0 & -\sin a & \cos a \end{bmatrix},$$

$\Delta\psi$ — долгопериодическая часть нутации по долготе; $d\psi$ — короткопериодическая часть нутации по долготе; $\Delta\varepsilon$ — долгопериодическая часть нутации наклона; $d\varepsilon$ — короткопериодическая часть нутации наклона; ε — истинный наклон эклиптики к экватору, который задан следующим разложением:

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21,448'' - 46,8150''T - 0,00059''T^2 + 0,001813''T^3. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что $\Delta\psi$, $d\psi$, $\Delta\varepsilon$ и $d\varepsilon$ рассчитываются с помощью Таблиц долгопериодической и короткопериодической нутации. В настоящее время нутация разложена в ряд со 106 членами, из них 30 — для долгопериодической нутации, остальные — для короткопериодической. В этих таблицах представлены коэффициенты нутации и скорости их изменения за юлианское столетие в угловых секундах умноженные на 10^4 . Помимо табличных значений, для расчета необходимы значения фундаментальных аргументов: l — средняя аномалия Луны; l^\odot — средняя аномалия Солнца; F — средний аргумент широты Луны; D — средняя элонгация (разность средних долгот) Луны и Солнца. Разложение указанных фундаментальных аргументов имеет следующий вид [7]:

$$l = 485866,733'' + 1717915922,633''T + 31,310''T^2 + 0,064''T^3;$$

$$l^\odot = 1287099,804'' + 129596581,224''T - 0,577''T^2 - 0,012''T^3;$$

$$F = 335778,877'' + 1739527263,137''T - 13,257''T^2 + 0,011''T^3;$$

$$D = 1072261,307'' + 1602961601,328''T - 6,891''T^2 + 0,019''T^3;$$

$$\Omega = 450160,280'' - 6962890,539''T + 7,455''T^2 + 0,008''T^3.$$

В качестве примера приведены первые пять строк из таблицы долгопериодической нутации. Полные версии таблиц указаны, например, в «Астрономическом ежегоднике СССР на 1986 год» [7]. Рассмотрим таблицу долгопериодической нутации (табл. 1).

Таблица 1

Долгопериодическая нутация

Коэффициенты при синусах для расчета $\Delta\psi$ или косинусах для расчета $\Delta\varepsilon$					Период в сут.	Коэффициенты при сумме синусов		Коэффициенты при сумме косинусов	
k_l	k_{l^\odot}	k_F	k_D	k_Ω		$U_{\Delta\psi}$	$V_{\Delta\psi}$	$U_{\Delta\varepsilon}$	$U_{\Delta\varepsilon}$
0	0	0	0	1	6798,4	-171996''	-174,2''	92025''	8,9''
0	0	0	0	2	3399,2	2062''	0,2''	-895''	0,5''
-2	0	2	0	1	1305,5	46''	0''	-24''	0''
2	0	-2	0	0	1095,2	11''	0''	0''	0''
-2	0	2	0	2	1615,7	-3''	0''	1''	0''

Для расчета $\Delta\psi$ и $\Delta\varepsilon$ на момент времени T необходимо выполнить суммирование значений, полученных из табл. 1, по формулам:

$$\Delta\psi = \sum_{n=1}^{30} (U_{\Delta\psi}^n + V_{\Delta\psi}^n T) (k_l^n \sin l + k_{l^\circ}^n \sin l^\circ + k_F^n \sin F + k_D^n \sin D + k_\Omega^n \sin \Omega); \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{n=1}^{30} (U_{\Delta\varepsilon}^n + V_{\Delta\varepsilon}^n T) \cdot (k_l^n \cos l + k_{l^\circ}^n \cos l^\circ + k_F^n \cos F + k_D^n \cos D + k_\Omega^n \cos \Omega). \quad (8)$$

Необходимо отметить, что n , как в формулах (7) и (8), так и в последующих формулах (9) и (10) является *индексом суммирования*. Аналогично вычисляются $d\psi$ и $d\varepsilon$:

$$d\psi = \sum_{n=31}^{106} (U_{d\psi}^n + V_{d\psi}^n T) (k_l^n \sin l + k_{l^\circ}^n \sin l^\circ + k_F^n \sin F + k_D^n \sin D + k_\Omega^n \sin \Omega); \quad (9)$$

$$d\varepsilon = \sum_{n=31}^{106} (U_{d\varepsilon}^n + V_{d\varepsilon}^n T) (k_l^n \cos l + k_{l^\circ}^n \cos l^\circ + k_F^n \cos F + k_D^n \cos D + k_\Omega^n \cos \Omega). \quad (10)$$

Результаты формул (7)–(10) необходимо разделить на 10^4 , при этом полученные значения будут в угловых секундах [7]. После расчета матрицы P из (3) и N из (5) осуществляется преобразование прямоугольных координат средних мест светил x_m, y_m, z_m для учета влияния прецессии и нутации, выполняемое по формуле

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_m \\ \tilde{y}_m \\ \tilde{z}_m \end{bmatrix} = PN \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Полученные прямоугольные координаты $\tilde{x}_m, \tilde{y}_m, \tilde{z}_m$ преобразуются в сферические координаты с помощью формул:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\tilde{x}_m^2 + \tilde{y}_m^2 + \tilde{z}_m^2}; \\ \sin \tilde{\delta}_m = \frac{\tilde{z}_m}{\rho}; \\ \sin \tilde{\alpha}_m = \frac{\tilde{y}_m}{\sqrt{\tilde{x}_m^2 + \tilde{y}_m^2}}; \\ \cos \tilde{\alpha}_m = \frac{\tilde{x}_m}{\sqrt{\tilde{x}_m^2 + \tilde{y}_m^2}}. \end{cases} \quad (12)$$

Поправки за аберрацию $\Delta\alpha_{AB}$ и $\Delta\delta_{AB}$ вычисляются по формулам:

$$\Delta\alpha_{AB} = -\frac{k}{\cos \delta_m} (\sin \alpha_m \sin L + \cos \alpha_m \cos L \cos \varepsilon); \quad (13)$$

$$\Delta\delta_{AB} = -k [\cos L (\sin \varepsilon \cos \delta_m - \cos \varepsilon \sin \delta_m \sin \alpha_m) + \sin L - \cos \alpha_m \sin \delta_m],$$

где $k = 20,49552''$ — постоянная аберрации; $L = 280^\circ 27' 57,85'' + 129602771,27''T + 1,089''T^2$ — средняя долгота Солнца [8].

Таким образом, подставляя результаты из формул (12) и (13) в формулу (1), получим экваториальные координаты светила в общем виде. Однако, как отмечалось ранее, для различных типов светил средние места α_m и δ_m рассчитываются по-разному.

Рассмотрим расчет средних мест звезд. Средние места звезд на текущую эпоху вычисляются из средних мест звезд на начальную эпоху путем прибавления собственного движения:

$$\begin{cases} \alpha_m^* = \alpha_0^* + \mu_\alpha T; \\ \delta_m^* = \delta_0^* + \mu_\delta T, \end{cases}$$

где α_0^* и δ_0^* — средние места на начальную эпоху, которые можно получить, например, из Йельского каталога ярких звезд [9]; μ_α , μ_δ — собственное движение звезды по прямому восхождению и склонению за юлианское столетие.

Если пренебречь гравитационным притяжением между планетами и брать в расчет только модели притяжения между Солнцем и планетами, то с некоторыми дальнейшими идеализациями результирующими орбитами будут эллипсы. В данной идеализированной модели форма и ориентация этих эллипсов будут постоянными во времени. В действительности, в то время как планеты всегда движутся примерно по Кеплеровым орбитам, форма и ориентация этих эллипсов медленно меняется с течением времени. Поэтому для решения задачи нахождения положения планет разработаны специальные планетарные теории. В настоящее время широко используются такие теории, как ILE, DE, VSOP, EPM и др.

В современных планетарных теориях учитывается большое количество различных возмущающих факторов, учет которых позволяет рассчитывать положение планет с миллисекундной точностью и выше, однако при решении задач мореходной астрономии высокий показатель точности не требуется, и теории с чрезмерно высокой точностью можно считать неоптимальными [10], [11]. Заявленная точность в актуальных морских астрономических ежегодниках, составляет 0,1'. В процессе выбора оптимальной теории были рассмотрены следующие теории: некоторые версии EPM, DE и VSOP [10]. В итоге были выбраны две теории: теория *Agations Séculaires des Orbites Planétaires 87* (VSOP87), разработанная П. Бретаньоном [12], и расширение теории DE200, предложенное французским астрофизиком Ж. Шапроном, представленное в работе [13] (далее — CHAP).

С помощью теории VSOP87 рассчитываются эклиптические гелиоцентрические координаты планет Земной группы: β_h , λ_h и ρ_h . Координаты представлены в виде гармоник, при суммировании которых достигается точность, вплоть до 0,00023", в зависимости от планеты, однако, как отмечалось ранее, в такой точности нет необходимости. Суммирование минимально возможного количества гармоник, допускаемое в теории, позволяет рассчитать координаты с точностью около 0,3". Такая точность будет несколько превышать современные стандарты, однако из всех рассмотренных теорий этот вариант можно считать оптимальным. Формулы расчета координат некоторой планеты земной группы:

$$\begin{cases} \beta_h = f_{VSOP}^{[\beta]}(t); \\ \lambda_h = f_{VSOP}^{[\lambda]}(t); \\ \rho_h = f_{VSOP}^{[\rho]}(t), \end{cases} \quad (14)$$

где t — количество юлианских суток, прошедших с эпохи J2000.0.

Тогда $f_{VSOP}^{[\xi]}(t)$ в зависимости от некоторой координаты ξ имеет вид

$$f_{VSOP}^{[\xi]}(t) = \sum_{n=1}^k A_n^{[\xi]} \cos(B_n^{[\xi]} + C_n^{[\xi]}t).$$

Здесь используются коэффициенты: A — амплитуда, B — сдвиг фазы и C — скорость изменения угла, для которых $[\xi]$ — указатель принадлежности коэффициента к заданной координате [14].

CHAP превосходит минимальную точность теории VSOP87, а именно точность достигает 0,02", но, тем не менее, это не отражается на скорости расчета. В представленной работе теория CHAP необходима для расчета гелиоцентрических эклиптических координат планет-гигантов для временного диапазона от 19.03.1689 до 01.10.2247, координаты вне этого диапазона рассчитываются по формуле (14). Расчет положения некоторой планеты с использованием теории CHAP выполняется в прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned} x_m, y_m \text{ или } z_m = & \sum_{n=0}^{Q_0} \left(K_n^{[0]} \cos(W_n t) + S_n^{[0]} \sin(W_n t) \right) + \frac{T}{100} \sum_n^{Q_1} \left(K_n^{[1]} \cos(W_n t) + \right. \\ & \left. + S_n^{[1]} \sin(W_n t) \right) + \left(\frac{T}{100} \right)^2 \sum_n^{Q_2} \left(K_n^{[2]} \cos(W_n t) + S_n^{[2]} \sin(W_n t) \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $K^{[\xi]}$ и $S^{[\xi]}$ — коэффициенты с указателем $[\xi]$ на одну из трех строк со значениями коэффициентов при n -й итерации.

В качестве примера в табл. 2 приведены значения коэффициентов для первых пяти итераций расчета координат Юпитера.

Таблица 2

Коэффициенты для расчета координат Юпитера

[ξ]	x_m		y_m		z_m		W
	$K^{[\xi]}$	$S^{[\xi]}$	$K^{[\xi]}$	$S^{[\xi]}$	$K^{[\xi]}$	$S^{[\xi]}$	
[0]	-3658015942	0	-908357166	0	-300271978	0	0
[1]	3211736	0	-12066362	0	-5380492	0	
[0]	4891337	5430776	-9059458	4045908	-3979137	1598300	0,01686
[1]	-1952368	3224556	-3665363	-6161184	-1519962	-2703058	
[0]	589280	-62004	-1226982	1326111	-536148	568311	0,03192
[0]	-132797	113059	332715	-538044	144358	-232591	0,04049
[0]	19390	-8208	-31003	153367	-13456	65630	0,05955
[0]	-2479	-51303	154576	368773	65961	157222	0,08320

Преобразование сферических гелиоцентрических координат из формул (14) осуществляется с помощью системы (2). Из полученных прямоугольных координат системы (2) или формулы (15) вычитаются прямоугольные координаты Земли, рассчитанные аналогично. В результате получаются геоцентрические прямоугольные координаты, которые, в свою очередь, переводятся в эклиптические геоцентрические координаты β_{geo}^p и λ_{geo}^p аналогично системе (12). Так как свет распространяется не мгновенно, видимое положение планеты на небесной сфере будет отличаться от рассчитанного, поэтому необходимо учесть скорость света:

$$\Delta\tau = \frac{D}{c}, \tag{16}$$

где $\Delta\tau$ — поправка времени; c — скорость света.

От аргумента t в формулах (14) или (15) необходимо отнять $\Delta\tau$ и повторить вычисление еще раз. После повторного вычисления с учетом скорости света полученные геоцентрические координаты β_{geo}^p и λ_{geo}^p и ε из разложения (6) для получения α_m^p и δ_m^p подставляются в формулы:

$$\begin{aligned} \sin \delta_m^p &= \sin \varepsilon \sin \lambda_{geo}^p \cos \beta_{geo}^p + \cos \varepsilon \sin \beta_{geo}^p; \\ \cos \delta_m^p \cos \alpha_m^p &= \cos \lambda_{geo}^p \cos \beta_{geo}^p; \\ \cos \delta_m^p \sin \alpha_m^p &= \cos \varepsilon \sin \lambda_{geo}^p \cos \beta_{geo}^p - \sin \varepsilon \sin \beta_{geo}^p. \end{aligned} \tag{17}$$

Средние места Луны вычисляются с помощью алгоритмов, основанных на теории движения Луны, обобщенных С. Л. Мошером. Алгоритмы условно обозначим в виде:

$$\begin{cases} \alpha_m^m = f_M(t); \\ \delta_m^m = f_M(t). \end{cases}$$

На полученные средние места Луны накладываются поправки P и N , рассчитанные по формуле (11), после чего результирующие значения $\tilde{\alpha}_m^m$ и $\tilde{\delta}_m^m$ подставляются в формулы (1), при этом $\Delta\alpha_{AB} = 0$ и $\Delta\delta_{AB} = 0$, так как Луна движется вместе с Землей.

Для вычисления средних мест Солнца α_m^\odot и δ_m^\odot необходимо вычислить гелиоцентрические координаты Земли β_h^{geo} и λ_h^{geo} средствами теории VSOP87 по формулам (14). На основании полученных координат можно рассчитать геоцентрические координаты Солнца β_{geo}^\odot и λ_{geo}^\odot :

$$\begin{cases} \beta_{geo}^{\circ} = -\beta^{geo} = 0; \\ \lambda_{geo}^{\circ} = \lambda^{geo} \pm 180^{\circ}. \end{cases}$$

Аналогично расчету координат планет выполняется повторное вычисление β_h^{geo} и λ_h^{geo} с учетом поправки времени по формуле (16). Переход от β_{geo}° и λ_{geo}° к α_m° и δ_m° выполняется по формулам (17).

Результаты (Results)

Для подтверждения достоверности и возможности практического применения выработанной математической модели был проведен предварительный эксперимент, заключающийся в сопоставлении рассчитанных параметров для четырех светил с параметрами, представленными в «Морском астрономическом ежегоднике». В данном эксперименте были рассмотрены следующие светила: Луна, Солнце, Марс и звезда Альциона (№ 21 в МАЕ). Параметры, рассчитанные с помощью представленной математической модели, полностью совпадают со значениями параметров из различных изданий «Морского астрономического ежегодника», что подтверждает соответствие современным стандартам.

На рис. 1 и 2 приведены примеры расчетов параметров для четырех светил, описывающих их местоположение на небесной сфере. На рис. 1, а показаны результаты расчетов параметров, описывающих положение Солнца на небесной сфере. Параметры рассчитаны на заданный момент Гринвичского среднего времени (UT1): 29.04.2010 8:07:44, для географических координат: $\varphi = 59^{\circ}59,0' N$ и $\lambda = 29^{\circ}46,0' E$. Рассчитываемые параметры: RA — прямое восхождение Солнца; Dec — склонение Солнца; R — видимый радиус Солнца; GHA — Гринвичский часовой угол Солнца; LHA — местный часовой угол Солнца; EqT — уравнение времени; Alt — высота Солнца над горизонтом; Az — азимут Солнца.

а)

```
C:\Users\Admin\Desktop\test.exe
RA:      36  grad 31.5 min
Dec:     14  grad 28.1 min N
R:       15.9 min
GHA:     302 grad 35.4 min
LHA:     332 grad 21.4 min
EqT:     -2^m37.4^s
Alt:     40  grad 11.9 min (*)
Az:      143 grad 58.3 min (*)
Для продолжения нажмите любую клавишу . . .
```

б)

```
C:\Users\Admin\Desktop\test.exe
RA:      63  grad 59.3 min
Dec:     17  grad 40.7 min N
R:       15.7 min
GHA:     121 grad 36.4 min
LHA:     151 grad 22.4 min
HP:      57.4 min
Alt:     -9  grad 34.0 min
Az:      332 grad 28.6 min
Для продолжения нажмите любую клавишу . . .
```

Рис. 1. Примеры расчета параметров: а — для Солнца; б — для Луны

На рис. 1, б приведен пример работы программы, отвечающей за расчет параметров местоположения Луны на небесной сфере для заданного времени UT1: 27.07.2019 16:02:12 и географических координат: $\varphi = 59^{\circ}59,0' N$ и $\lambda = 29^{\circ}46,0' E$. Рассчитываемые параметры: RA — прямое восхождение Луны; Dec — склонение Луны; R — видимый радиус Луны; GHA — Гринвичский часовой угол Луны; LHA — местный часовой угол Луны; HP — горизонтальный экваториальный параллакс Луны; Alt — высота Луны над горизонтом; Az — азимут Луны.

На рис. 2, а показан пример расчета параметров, описывающих положение на небесной сфере планеты Юпитер. В данном примере показан результат расчета параметров для Юпитера на момент времени UT1: 27.07.2019 16:02:12, для географических координат: $\varphi = 59^{\circ}59,0' N$ и $\lambda = 29^{\circ}46,0' E$. В данном случае: RA — прямое восхождение Юпитера; Dec — склонение Юпитера; m — видимая звездная величина Юпитера; GHA — Гринвичский часовой угол Юпитера; LHA — местный часовой угол Юпитера; HP — горизонтальный экваториальный параллакс Юпитера; Alt — высота Юпитера над горизонтом; Az — азимут Юпитера.

а)

```
C:\Users\Admin\Desktop\test.exe
RA: 253 grad 36.7 min
Dec: 22 grad 07.6 min S
m: -2.3
GHA: 291 grad 59.0 min
LHA: 321 grad 45.0 min
HP: 0.0 min
Alt: 2 grad 26.2 min
Az: 144 grad 58.6 min
Для продолжения нажмите любую клавишу . . .
```

б)

```
C:\Users\Admin\Desktop\test.exe
RA: 253 grad 36.7 min
Dec: 22 grad 07.6 min S
m: -2.3
GHA: 291 grad 59.0 min
LHA: 321 grad 45.0 min
HP: 0.0 min
Alt: 2 grad 26.2 min
Az: 144 grad 58.6 min
Для продолжения нажмите любую клавишу . . .
```

Рис. 2. Примеры расчета параметров: а — для Юпитера; б — для звезды Альциона

На рис. 2, б представлен результат расчета параметров местоположения на небесной сфере навигационной звезды Альциона. В данном случае расчет осуществляется на момент времени UT1: 27.07.2022 21:02:12, для координат: $\varphi = 59^{\circ}59,0' N$ и $\lambda = 29^{\circ}46,0' E$. В данном случае: SHA — звездное дополнение ($360^{\circ} - \alpha$) звезды Альциона; Dec — склонение Альционы; m — видимая звездная величина Альционы; GHA — Гринвичский часовой угол Альционы; LHA — местный часовой угол Альционы; Agies — Гринвичский часовой угол точки Овна; Alt — высота Альционы над горизонтом; Az — азимут Альционы.

На рис. 1, а параметры Alt и Az отмечены знаком (*), что означает высоту и азимут светила над истинным горизонтом. На рис. 1, б и 2 Alt и Az не отмечены, что означает высоту светила над видимым горизонтом с учетом текущих температуры воздуха, атмосферного давления и высоты глаза наблюдателя над уровнем моря.

Обсуждение (Discussion)

В настоящее время существуют электронные версии различных астрономических ежегодников (например, программная система «PersAY», разработанная Институтом прикладной астрономии Российской академии наук). Однако разработки подобного типа не обладают необходимыми функциональными возможностями для решения задач мореходной астрономии, так как их потенциал направлен на решение теоретических астрономических задач. Помимо программной системы «PersAY», Институтом прикладной астрономии также была разработана интерактивная система удаленного доступа для морской астронавигации «Штурман», однако для использования данного продукта необходимо постоянное подключение к сети Интернет. Кроме указанных крупных разработок, существует множество различных прикладных программ, предназначенных для анализа или обработки тех или иных астрономических параметров (например, программный комплекс StarCalc — разработчик А. Завалишин), программное обеспечение для операционной системы Android — «Астрономический альманах» — разработчик И. Бровин). Следует отметить, что для решения задач мореходной астрономии с помощью указанных программных комплексов требуются дополнительные ручные расчеты.

Главное преимущество представленной в данной статье концепции программного обеспечения «Astronomical Almanac» заключается в его автономности — для работы программного обеспечения не требуется постоянное подключение к сети Интернет. Второе не менее важное по значимости преимущество — это универсальность, так как разрабатываемая программа будет рассчитывать все параметры, указанные в различных изданиях «Морского астрономического ежегодника» и его зарубежных аналогов.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В процессе работы была сформирована целостная математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере. Данная модель охватывает светила, используемые

при определении местоположения способами мореходной астрономии, а именно: планеты (Венера, Марс, Юпитер и Сатурн), навигационные звезды, Луна и Солнце. В ходе работы был рассмотрен общий вид расчета экваториальных координат навигационных светил, описаны способы расчета прецессии и нутации земной оси, представлены формулы для расчета абберационной поправки, отдельно рассмотрено вычисление средних мест для различных типов светил: планет, навигационных звезд, Луны и Солнца.

2. На основе сформированного комплекса математических теорий можно решать следующие задачи: расчет экваториальных координат светил, расчет истинных геоцентрических горизонтальных координат светил, расчет видимых топоцентрических горизонтальных координат светил, расчет времени наступления явлений освещенности, расчет времени восхода и захода светил и некоторые другие.

3. В ходе выполненной работы были программно реализованы (программная реализация представленной математической модели выполнена на языке C++) алгоритмы и математическая теория, необходимые для разработки прикладного программного обеспечения для штурманов «Astronomical Almanac». Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для расчета экваториальных и горизонтальных координат светил и других величин, необходимых для решения задач мореходной астрономии. В перспективе разрабатываемое программное обеспечение может полностью заменить «Морской астрономический ежегодник» и его аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ–78) с поправками. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. — 806 с.
2. Гагарский Д. А. Отношение к мореходной астрономии в современном судовождении / Д. А. Гагарский // Материалы научно-практической конференции «Морское образование: традиции, реалии и перспективы». — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — С. 50–56.
3. Леонов В. Е. Анализ морских пособий, применяемых для определения места судна по наблюдениям Солнца / В. Е. Леонов, И. В. Сокол, А. С. Лазарь // Навигация и гидрография. — 2015. — № 14. — С. 42–46.
4. Панасенко А. Н. Об использовании иностранных таблиц для решения задач мореходной астрономии / А. Н. Панасенко // Вестник Морского государственного университета. — 2013. — № 62. — С. 92–98.
5. Алцыбеев Г. О. Математические методы получения астронавигационных параметров / Г. О. Алцыбеев // Современное развитие России через призму научных исследований. — 2018. — С. 30–34.
6. Lieske J. H. Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants / J. H. Lieske, T. Lederle, W. Fricke, B. Morando // *Astronomy and Astrophysics*. — 1977. — Vol. 58. — Pp. 1–16.
7. Астрономический ежегодник СССР на 1986 год. — Л.: Наука, 1984. — Т. 65. — 691 с.
8. Хлюстин Б. П. Мореходная астрономия: учеб. пособие вузов: в 2 ч. / Б. П. Хлюстин. — М.: Изд-во «Юрайт», 2018. — Ч. 1. — 267 с.
9. Tonry J. The ATLAS All-Sky Stellar Reference Catalog / J.L. Tonry, L. Denneau, H. Flewelling, A. N. Heinze, C. A. Onken, S. J. Smartt, B. Stalder, H. J. Weiland, C. Wolf // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 867. — Is. 2. — Pp. 105. DOI: 10.3847/1538-4357/aae386.
10. Алцыбеев Г. О. Применение численных теорий движения планет в задачах мореходной астрономии / Г. О. Алцыбеев, А. Р. Юрченко // Вестник современных исследований. — 2019. — № 1.2 (28). — С. 5–7.
11. Питьева Е. В. Повышение точности фундаментальных эфемерид планет ЕРМ / Е. В. Питьева, Д. А. Павлов, В. И. Скрипниченко // Труды Института прикладной астрономии РАН. — 2016. — № 36. — С. 41–48.
12. Bretagnon P. Planetary theories in rectangular and spherical variables-VSOP 87 solutions / P. Bretagnon, G. Francou // *Astronomy and Astrophysics*. — 1988. — Vol. 202. — Pp. 309–315.
13. Chapront J. Representation of planetary ephemerides by frequency analysis. Application to the five outer planets / J. Chapront // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. — 1995. — Vol. 109. — Pp. 181–192.
14. Feng G. Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory / G. Feng, X. Xiaojian // *Journal of System Simulation*. — 2015. — № 3. — С. 28.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaya konvenciya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenii vahty 1978 goda (PDMNV-78) s popravkami*. SPb.: ZAO «CNIIMF», 2010.
2. Gagarskij, D. A. “Otnoshenie k morekhodnoj astronomii v sovremennom sudovozhdenii.” *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii «Morskoe obrazovanie: Tradicii, Realii i Perspektivy»*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015. 50–56.
3. Leonov, V. E., I. V. Sokol, and A.S. Lazar. “Analiz morskikh posobij primenyaemyh dlya opredeleniya mesta sudna po nablyudeniya Solnca.” *Navigaciya i gidrografiya* 14 (2015): 42–26.
4. Panasenko, A. N. “Ob ispolzovanii inostrannyh tablic dlya resheniya zadach morekhodnoj astronomii.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 62 (2013): 92–98.
5. Alcybeev, G. O. “Mathematical methods of obtaining celestial navigation parameters.” *Sovremennoe razvitiye Rossii cherez prizmu nauchnyh issledovanij* (2018): 30–34.
6. Lieske, J. H., T. Lederle, W. Fricke, and B. Morando. “Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants.” *Astronomy and Astrophysics* 58 (1977): 1–16.
7. *Astronomicheskij ezhegodnik SSSR na 1986 god*. Vol.65. L.: Izdatelstvo «NAUKA», 1984.
8. Hlyustin, B.E. *Morekhodnaya astronomiya. V 2 ch. Chast 1: uchebnoe posobie dlya vuzov*. M.: Izdatelstvo Yurajt, 2018.
9. Tonry, J. L., C. A. Onken, S. J. Smartt, B. Stalder, H.J. Weiland, and C. Wolf. “The ATLAS All-Sky Stellar Reference Catalog.” *The Astrophysical Journal* 867.2 (2018): 105.
10. Alcybeev, G. O., and A. R. Yurchenko. “Primenenie chislennyh teorij dvizheniya planet v zadachah morekhodnoj astronomii.” *Vestnik sovremennyh issledovanij* 1.2(28) (2019): 5–7.
11. Piteva, E.V., D.A. Pavlov, and V.I. Skripnichenko. “Povyshenie tochnosti fundamentalnyh efemerid planet EPM.” *Trudy Instituta prikladnoi astronomii RAN* 36 (2016): 41–48.
12. Bretagnon, Pierre, and Gérard Francou. “Planetary theories in rectangular and spherical variables-VSOP 87 solutions.” *Astronomy and Astrophysics* 202 (1988): 309–315.
13. Chapront, J. “Representation of planetary ephemerides by frequency analysis. Application to the five outer planets.” *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 109 (1995): 181–192.
14. Feng, Guo, and Xu Xiaojian. “Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory.” *Journal of System Simulation* 3 (2015): 28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Козик Сергей Викторович —
 кандидат военных наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: koserbik@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Денисова Анастасия Александровна —
 кандидат физико-математических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: a.denisova75@yandex.ru, kaf_pm@gumrf.ru
Алцыбеев Глеб Олегович — техник
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: gleb.alcybeev@gmail.com

Kozik, Sergey V. —
 PhD, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: koserbik@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Denisova, Anastasia A. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: a.denisova75@yandex.ru, kaf_pm@gumrf.ru
Alcybeev, Gleb O. — Technician
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: gleb.alcybeev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 октября 2019 г.
 Received: October 13, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56

SIMULATION OF THE WORK OF SHELF CONSTRUCTIONS WITH SHUTTLE TANKERS DURING SHIPPING OF OIL PRODUCTS IN THE FAR NORTH CONDITIONS

V. S. Kiselev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The algorithm and program for the model of operation of the hydrocarbon loading complex, which consists of an ice class shuttle tanker and offshore platform equipped with an oil shipping system, are considered in the paper. The model allows you to analyze the process of carrying out cargo operations, taking into account the time the vessels stood at loading, waiting for the start of cargo operations, the downtime of the platform equipment in anticipation of the tankers arrival. By means of modeling, a statistical analysis of the system operation at specified time intervals is carried out, simulation modeling is carried out with arbitrary distributions of the intervals between the arrival times of ships and their service time, with various disciplines and service parameters. It is noted that solving the practical problem of ensuring the smooth operation of ships on the line, estimating the time intervals of oil loading on the platform under conditions of unsteady traffic flow can be successfully performed by simulating the problems of planning ice pilotage of vessels in the Arctic regions. The operability of the model based on the use of tools of computing environments and digital technologies is determined by the high level of adequacy of the studied characteristics to the real process of organizing the movement of tankers according to the established schedule, taking into account the time of technological operations during oil shipment and changes in fleet composition. Modeling using object programming technologies allows you to study the various schemes of the tanker fleet composition by simulating variable and observable alternating states and make informed decisions based on quantitative estimates of the results of a machine experiment. The program and examples of evaluating the operating parameters on the model are given.

Keywords: simulation, single-line queuing system, shuttle tanker, determination of the vessel downtime, port station with one loading place, matlab.

For citation:

Kiselev, Vadim S. "Simulation of the work of shelf constructions with shuttle tankers during shipping of oil products in the far north conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

УДК 656.073.2

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ С ТАНКЕРАМИ-ЧЕЛНОКАМИ ПРИ ОТГРУЗКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

В. С. Киселев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрен алгоритм и приведена программа модели работы погрузочного комплекса углеводородов, состоящего из танкера-«челнока» ледового класса и морской ледостойкой платформы, оборудованной системой отгрузки нефти. Модель позволяет анализировать процесс выполнения грузовых операций с учетом времени стоянки судов под погрузкой в ожидании начала грузовых операций и времени простоя оборудования платформы в ожидании прибытия танкеров. Путем моделирования производится статистический анализ работы системы на заданных временных интервалах, осуществляется имитационное моделирование при произвольных распределениях интервалов между моментами прибытия судов и времени их обслуживания с различными дисциплинами и параметрами обслуживания. Отмечается, что решение практической задачи по обеспечению ритмичности работы судов на линии и оценке временных интервалов погрузки нефти на платформе в условиях нестационарного транспортного пото-

ка может успешно выполняться путем имитации на модели задач планирования ледовых проводок судов в арктических районах. Работоспособность модели, построенной на основе использования инструментов вычислительных сред и цифровых технологий, определяется высоким уровнем адекватности исследуемых характеристик реальному процессу организации движения танкеров по установленному графику с учетом времени выполнения технологических операций при отгрузке нефти и изменении состава флота. Моделирование с применением технологий объектного программирования позволяет исследовать различные схемы состава танкерного флота путем имитации варьируемых и наблюдаемых переменных состояния и принимать обоснованные решения на основе количественных оценок результатов машинного эксперимента. Приведены программа и примеры оценки рабочих параметров на модели.

Ключевые слова: имитационное моделирование, однолинейная система массового обслуживания, шаттл-танкер, определение времени простоя судна, портпункт с одним погрузочным местом, Matlab.

Для цитирования:

Киселев В. С. Имитационное моделирование работы шельфовых сооружений с танкерами-челноками при отгрузке нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера / В. С. Киселев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

Введение (Introduction)

Уникальные природные богатства Арктической зоны Российской Федерации, составляющие, по предварительным оценкам, более десятка миллиардов тонн углеводородов определили на долгие годы стратегический курс государства на социально-экономическое развитие регионов отечественной Арктики и освоение месторождений континентального шельфа.

Увеличение объемов добычи нефти, газоконденсата, природного газа, их поставка на мировой рынок играют существенную роль в обеспечении устойчивого роста экономики, создании запасов углеводородного сырья для развития всех отраслей народного хозяйства и роста благосостояния населения. Согласно «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», важнейшей задачей освоения шельфовой зоны является развитие транспортной структуры регионов, создание условий для круглогодичного движения судов по Северному морскому пути как кратчайшему пути между портами Европы и Восточно-Азиатского региона. Специфика перевозок в Арктической зоне состоит в необходимости использования в основном судов ледового плавания с формированием составов и логистических схем, позволяющих обеспечить высокий уровень доходности работы флота. С этой целью в ближайшие годы для динамичного развития транспортной структуры и безаварийной проводки судов по Северному морскому пути планируется существенно пополнить действующий флот новыми судами арктического плавания, платформами и плавучими объектами обеспечения жизнедеятельности.

Обновление ледокольного флота, пополнение его атомными ледоколами большой мощности позволит осуществлять проводку иностранных судов с контейнерными и другими грузами по кратчайшему морскому пути из Европы в Азию, обеспечить высокую надежность и безаварийность работы с использованием развитых систем навигации, связи и управления судоходством. Решение комплексных задач развития транспортной инфраструктуры на качественно новом уровне должно основываться на глубоких научных исследованиях во всех областях хозяйственной деятельности, применении цифровых технологий и математических методов исследования операций при моделировании процессов организации перевозок, принятии научно обоснованных решений по управлению флотом и портами как единым транспортно-перегрузочным механизмом. Модельные решения с количественными оценками должны явиться надежным механизмом в выборе из рассмотренных «сценариев» наиболее приемлемого, исключить субъективные способы управления сложным транспортным процессом. Модели и алгоритмы, созданные на основе методов исследования операций, позволяют кардинально повысить аналитические возможности исследователя во всех сферах поиска оптимальных решений без существенных материальных затрат.

Управление флотом и портами при изменении ледовых и погодных условий существенно усложняется, что требует принятия адекватных мер на оперативном уровне по поддержанию

требуемых рабочих режимов комплекса. Поскольку внешние условия и информация о позиционировании судов на линии с течением времени изменяются, математическая модель становится простым и эффективным средством анализа последствий принятия оперативных решений. Потребность в моделях определяется тем, что конкретные задачи, вследствие их комбинаторной сложности и нестационарных транспортных потоков, плохо формализуются либо не поддаются аналитическому описанию в замкнутой форме. Применение количественных инструментов оптимизации с использованием моделей требуется для оценки и распределения ресурсов, формирования цепей поставок и финансовых потоков, анализа виртуальных организационных структур, а также диверсификации транспортных маршрутов поставки углеводородов на мировые рынки и др.

Важным для практики классом моделей, используемых для оценки загрузки оборудования портов и грузовых терминалов, с учетом свойств потоков прибывающих под обработку судов, являются модели массового обслуживания. Теория массового обслуживания востребована в моделях транспортной структуры регионов как средство раскрытия «феномена» ожидания, характеризующего транспортный процесс с позиций вероятности появления потребностей в сервисе при изменении характеристик обслуживаемых систем, каковыми являются продолжительность загрузки судов, время ожидания начала грузовых операций, условия образования очереди на обслуживание и др.

Специализированным портопунктом в Арктической зоне РФ может являться как грузовой район обособленной территории, имеющий оборудование для погрузочно-разгрузочных работ различной номенклатуры грузов, так и точечное шельфовое сооружение. Порожнее судно по прибытии в специализированный портопункт полностью загружается и по завершении погрузки отправляется в обратный рейс. Под портопунктом с одним погрузочным местом, к примеру, возможно принимать действующие арктические проекты, такие, например, как стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал Варандейского месторождения. На сегодняшний день подавляющее большинство судов, используемых для перевозки экспортного грузопотока на этом месторождении, имеют тип «танкер-челнок» («шаттл-танкер») [1]–[3]. Танкер-челнок¹ был сконструирован для перевозки нефти с нефтяных платформ арктического шельфа (рис. 1).



Рис. 1. Танкер-челнок под погрузкой

Как правило, танкеры-челноки оснащены специализированной грузовой системой, которая располагается только в носовой части судна и позволяет закачивать нефть в танкеры с шельфовых объектов даже в тяжелых природных условиях и с экстремально низкими температурами [4]–[6]. Нефтяная платформа, осуществляющая добычу на шельфовых месторождениях с последующей погрузкой сырой нефти в танкеры-челноки, работающие на закрепленных линиях (такая, как морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная»), по сути, представляет собой «спе-

¹ Танкер «Михаил Ульянов» / «Росморречфлот».

циализированный портопункт» с ограниченным числом погрузочных мест [7], [8]. Танкер-челнок выполняет погрузку сырой нефти, образуя совместно с платформой погрузочный комплекс, в определенной мере аналогичный «портопункту с одним погрузочным местом» и группой судов, работающих на закрепленной линии [9], [10].

Целью исследования является обеспечение ритмичности работы порта и судов на линии, оценка непроизводительных потерь времени, приводящих к сокращению эксплуатационной пропускной способности системы в сравнении с режимами предельно организованного и полностью определенного транспортного процесса, при котором реальная пропускная способность близка к физически реализуемой. Реальная пропускная способность меньше физически реализуемой, которая характеризуется режимом полной организованности при отсутствии потерь. Имитационная модель позволяет исследовать механизм потерь пропускной способности конкретной транспортной системы и оценить уровень их проявления.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Имитационное моделирование является методом математического моделирования, с помощью которого решаются задачи управления плохо формализуемыми технологическими процессами в транспортных системах, в логистике, производятся оценки пропускной способности грузового фронта морских портов и др. [11]. Имитационные модели позволяют анализировать большое число альтернативных решений и экспериментировать с виртуальными системами в тех случаях, когда на реальном объекте эксперимент невозможен.

Создание виртуальной системы для имитационного моделирования, как и любой творческий процесс, требует от разработчика глубоких профессиональных знаний и умений, понимания целей моделирования, необходимости учета экзогенных переменных, наиболее чувствительных в реальной системе к параметрическим возмущениям [12]. Модель, как и объект, во всем рабочем диапазоне вариации элементов вектора входов должна обладать «фильтрующими» свойствами, обеспечивающими получение экзогенных переменных, адекватных объекту [13], [14]. Модель должна быть «прозрачной» для пользователя, иметь небольшую размерность и обладать свойствами адаптации и обучения. В моделях повышенной размерности адаптивные свойства просто реализовать с помощью систем нечеткого вывода с многомерными термами эндогенных переменных по правилам, обеспечивающим быструю сходимость решений к конечному результату.

Выбор способов отгрузки нефти на танкеры-челноки определяется технологическими возможностями и энерговооруженностью портов, портового оборудования и причалов. На практике отгрузка углеводородов производится непосредственно с платформ в открытом море. Каждый вид платформы (стационарные, плавучие нефтехранилища, добывающие и др.) снабжен соответствующими системами и устройствами для выполнения грузовых операций, что определяет специфику построения моделей функционирования комплекса, получения текущей информации и анализа с последующим принятием решения. Система с одним отгрузочным местом применена, в частности, на платформе «Приразломная», находящейся в Баренцевом море. Конструкция устройства для отгрузки нефти позволяет производить операции с учетом изменения погодных условий, течения, дрейфа льда, направления и силы ветра, приливов, отливов, температуры и др. Платформа, работающая в экстремальных климатических условиях севера, способна надежно функционировать при больших ледовых нагрузках. Транспортировка нефти с платформы осуществляется круглый год. В ледовой обстановке нефть транспортируется челночными танкерами ледового класса Л6 дедвейтом 70 тыс. т. Для отгрузки используется одно из двух имеющихся на платформе устройств. Танкеры класса «Михаил Ульянов» имеют длину 257 м, ширину 34 м и осадку 14 м.

Для погрузки нефти танкер должен безопасно приблизиться к платформе на расстояние 80 м. Затем выполняются операции швартовки и шланговки (регламентируемое время, соответственно, 35 и 30 мин) и начинается перекачка нефти в танкер, которая продолжается при каждом подходе к платформе не более 3 ч. Это объясняется изменением направления приливно-отливных течений, происходящим приблизительно через каждые 6 ч.

По приведенному описанию условий выполнения отгрузки нефти в системе, состоящей из платформы и танкер-челноков, работающих на закрепленной линии, видно, что система имеет много общего с моделью специализированного порта с одним причалом, каковым, например, является порт Важины, расположенный на реке Свирь и предназначенный для поставки гравия в Санкт-Петербург. Используя имеющийся опыт построения модели порта с одним причалом, предполагается модель, пригодная для имитации режимов работы систем «ледостойкие платформы» — танкеры-челноки в условиях Арктики.

В качестве экзогенных переменных модели принимаются два временных ряда, представленных векторами x_1 и x_2 . Вектор x_1 содержит элементы, соответствующие времени прибытия судов в порт (по аналогии с СМО — поток заявок на обслуживание). Вектор x_2 состоит из элементов продолжительности обработки судов (время обслуживания заявок). Для удобства вычислений в цикле в алгоритме используется вектор x_{1_1} , образованный из x_1 путем смещения элементов на один разряд влево. Анализ последовательности элементов векторов позволяет исследовать систему как одноканальную систему массового обслуживания с произвольными распределениями интервалов между моментами прибытия судов и их обслуживания, что возможно выполнить способами имитационного моделирования. С этой целью введем вектор W , элементами которого являются $w(i)$, где $2 \leq i \leq N$ (здесь N — количество судов в системе; $w(i)$ — время ожидания начала обработки i -го судна),

$$W = [w(1) \ w(2) \ w(3) \ \dots \ w(i) \ \dots w(N)]^T, \text{ при условии } w(1) = 0.$$

Элементы $w(2)$, $w(3)$, ..., $w(i)$, ..., $w(N)$ вычисляются рекуррентно по формуле

$$w(i) = w(i-1) - x1_1(i-1) + x2(i-1)$$

с соблюдением логических условий: если $w(i) < 0$, то $w(i) = 0$. В иных случаях $w(i-1)$ принимается равным $w(i)$, т. е. $w(i-1) = w(i)$. По завершении цикла формируется вектор-столбец W , состоящий из элементов, больших или равных нулю. Для выполнения циклических операций удобно использовать вектор Wa , который образуется путем смещения W на один шаг с присоединением нулевого элемента:

$$Wa = [0; W].$$

Заметим, что отрицательным значениям рекуррентного соотношения:

$$pt = Wa(i) + x_2(i) - x_{1_1}(i), \quad 1 \leq i \leq N$$

соответствуют потери времени обслуживания вследствие отсутствия судов у причала.

Выполнив оценки соотношений pt в цикле с логическими условиями: если $pt(i) < 0$, то $pt(i) = -pt(i)$, но в иных случаях $pt(i) = 0$, можно сформировать из этих элементов вектор потерь времени работы причала pt вследствие ожидания прибытия судов под обработку. Далее производится оценка эндогенных переменных.

Модель представлена файлом `sah405bb.m` (среда `matlab`).

```
% sah405bb.m
% Имитационная модель порта
% Основа: файл sah405в.m
% =====
clf
clear
clc
%=====
% Исходные данные
N=20
x1=[0.0 3.6 2.0 4.4 0.8 3.3 4.7 0.5 1.9 2.4 2.4 0.4 0.8 1.2 0.4 0.9 1.3 2.9 3.6 0.8 8.0];
x1_1=[3.6 2.0 4.4 0.8 3.3 4.7 0.5 1.9 2.4 2.4 0.4 0.8 1.2 0.4 0.9 1.3 2.9 3.6 0.8 8.0];
```

```
x2=[0.5 4.3 0.4 1.1 2.5 7.0 1.0 0.8 0.7 0.5 0.7 1.7 0.5 0.4 3.7 1.7 2.5 3.2 2.8 3.1];
```

```
%=====
```

```
aa=sum(x1)
```

```
bb=sum(x2)
```

```
aaa=aa/N;
```

```
bbb=bb/N;
```

```
%pause
```

```
% Формирование векторов
```

```
j=1:N ; v=N;
```

```
x1=x1(j); x2=x2(j); x1_1(j);
```

```
W=[];
```

```
% Вычисления в циклах:
```

```
for i=2:v
```

```
w(1)=0;
```

```
w(i)=w(i-1)-x1_1(i-1)+x2(i-1);
```

```
if w(i)<0
```

```
    w(i)=0;
```

```
else
```

```
    w(i-1)=w(i);
```

```
end
```

```
W=[W;w(i)];
```

```
end
```

```
Wa=[0;W]
```

```
% Общее время простоя «причала»
```

```
Pt=[];
```

```
for i=1:v
```

```
    pt=Wa(i)+x2(i)-x1_1(i);
```

```
    if pt<0
```

```
        pt=-pt;
```

```
    else
```

```
        pt=0;
```

```
    end
```

```
    Pt=[Pt;pt];
```

```
end
```

```
Pt; Pst=sum(Pt);
```

```
%=====
```

```
% 1. Вектор времени простоя причала в ожидании судов
```

```
Pt
```

```
% 2. Суммарное время простоя причала в ожидании судов
```

```
Tпрост=sum(Pt)
```

```
% 3. Среднее время ожидания в очереди обработки судна
```

```
St=sum(Wa);
```

```
Tсп=St/N
```

```
% 4. Коэффициент простоя причала
```

```
E=Tпрост/aa
```

```
% 5. Вектор времени нахождения судов в порту
```

```
WaSa=Wa+x2';
```

```
Tsys=WaSa
```

```
% 6. Сумма времени нахождения судов в порту (обработка, ожидание)
```

```
Sa=sum(WaSa);
```

$TT = \text{sum}(Sa)$

% 7. Среднее время нахождения судна в порту

$Tc = TT/N$

% =====

% Графические построения

subplot(2,2,1)

stairs(x1_1,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывающие суда')

ylabel('Интервалы времени,ч.')

hold on

subplot(2,2,2)

stairs(Wa,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывшие суда')

ylabel('Ожидание в очереди,ч.')

subplot(2,2,3)

stairs(x2,'LineWidth',2),grid

xlabel('Прибывающие суда')

ylabel('Время обработки,ч.')

subplot(2,2,4)

stairs(Pt,'LineWidth',2),grid

xlabel('Суда')

ylabel('Простои причала,ч.')

% =====

% Оценка вероятностей и времени T_i нахождения в порту i судов, с применением

% распределения Пуассона.

$p0 = Pst/aa;$

$s = 1/p0;$

$v = \log(s);$

$lam = v;$

% $\exp(v);$

$p1 = \exp(-lam) * (lam)/1$

$p2 = \exp(-lam) * (lam^2)/\text{factorial}(2)$

$p3 = \exp(-lam) * (lam^3)/\text{factorial}(3)$

$p = [p0 \ p1 \ p2 \ p3];$

$Pp = \text{sum}(p);$

% Оценка времени T_i ($i=0,1,2,3$)

$T = aa; \ Pp1 = Pp - p0;$

$T0 = p0 * T;$

$T1 = p1 / Pp1 * (T - T0);$

$T2 = p2 / Pp1 * (T - T0);$

$T3 = p3 / Pp1 * (T - T0);$

$Tv = [T0 \ T1 \ T2 \ T3]$

$TT = \text{sum}(Tv)$

% Проверка условия равенства TT и aa :

$[TT \ aa]$

% Вычисление средних значений

$Pn = p0;$

$Ncp = 1 * p1 + 2 * p2 + 3 * p3$

$NUcp = Pn + 2 * Pn$

$Ro = Pn$

Обсуждения (Discussion)

В файле приведены численные значения (экзогенные переменные) векторов x_1 и x_2 . Вектор x_1 содержит элементы, соответствующие времени прибытия судов в порт. Согласно исходным данным, приведенным в файле `sah405bb.m`, первый элемент вектора x_1 принимается равным нулю и означает момент прибытия первого судна. Второй элемент содержит число, равное 3,6 ч, соответствующее времени прибытия второго судна после первого. Третий элемент, равный 2,0, означает, что третье судно приходит в порт после второго через 2 ч. Аналогично заполняются последующие элементы.

Вектор x_2 содержит числа, соответствующие времени обработки каждого прибывающего в порт судна. В приведенном примере эти значения приняты равными для первого судна 0,5, для второго — 4,3, третьего — 0,4 ч и т. д. Вектора x_1 и x_2 образуют массив, из которого для моделирования могут выбираться данные для N судов. В файле $N = 20$. Суда обрабатываются в порядке прибытия.

Эндогенными переменными являются:

- вектор времени простоя причала в ожидании судов — P_i ;
- суммарное время простоя причала в ожидании судов — $T_{\text{прост}}$;
- среднее время ожидания в очереди обработки судна — T_{cp} ;
- коэффициент простоя причала — E ;
- вектор времени нахождения судов в порту — T_{sys} ;
- сумма времени нахождения судов в порту (обработка, ожидание) — TT ;
- среднее время нахождения судна в порту — T_c .

С помощью файла можно получить любую информацию, связанную с мониторингом вычислительного процесса. Комментарии к вычислениям, приведенные в файле, содержат всю необходимую информацию для практического применения модели.

Моделирование завершается графическими построениями. На рис. 2 представлены графики, соответствующие моделированию системы для численных значений векторов x_1 и x_2 , приведенных в файле.

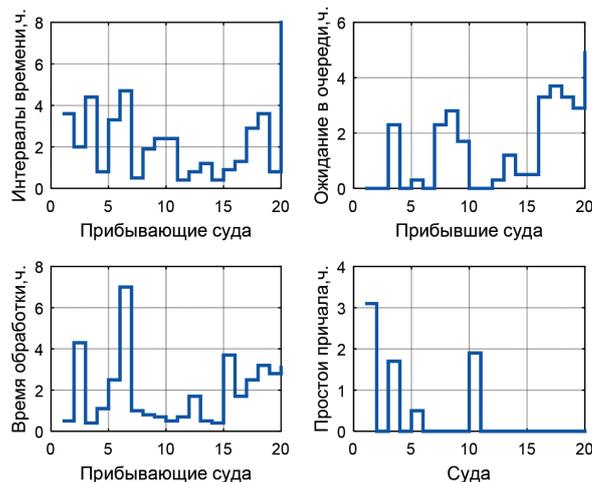


Рис. 2. Имитационное моделирование работы порта с одним причалом

Кумулятивные эндогенные переменные численно равны:

$$T_{\text{прост}} = 7,2 \text{ ч}; \quad T_{\text{cp}} = 1,5 \text{ ч}; \quad E = 0,1555; \quad TT = 69,1 \text{ ч}; \quad T_c = 3,455 \text{ ч}.$$

Исходя из предположения, что поток прибывающих судов распределен по закону Пуассона, можно оценить полное время T_j , в течение которого в системе находятся $j = 0, 1, 2, 3$ судов. Вероятности оценки T_j представлены элементами вектора p при $\lambda = 1,8611$:

$$P = [p_0 \ p_1 \ p_2 \ p_3] = [0.1555 \ 0.2894 \ 0.2693 \ 0.1671].$$

Согласно выполненным расчетам, вероятностям соответствуют значения времени:

$$T_v = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4] = [7.2000 \ 15.5914 \ 14.5083 \ 9.0003] \text{ ч.}$$

Для имитационного моделирования отгрузки нефти с платформы «Приразломная» необходимо учесть следующее [10]. Нефть транспортируется челночными танкерами дедеветом 70000 т. Для перекачки нефти к носовому погрузочному устройству танкера от платформы подключается шланг, по которому перекачивается нефть с расходом 10000 м³/ч. Специфика работы танкера состоит в том, что требуется учитывать течения и глубины в период приливов и отливов, повторяющихся ежедневно с шестичасовой периодичностью изменения направлений течения в северо-западном и юго-восточном направлениях. Для обеспечения безопасной погрузки и исключения возможности навалов на платформу, двигаясь против течения, танкер (длина 257 м, ширина 34 м и осадка 14 м) должен приблизиться к платформе на безопасное расстояние, составляющее менее 80 м, выполнить операции швартовки и «шланговки». Затем при удержании носовой части судна в безопасной зоне допустимых отклонений, с использованием судовой системы динамического позиционирования, выполнить погрузку. Время на перекачку нефти, с учетом приливных течений, составляет из шестичасового цикла не более четырех часов. С целью обеспечения безопасности технологического процесса с началом изменения направления течения танкер отходит от платформы на безопасное расстояние. Время швартовки составляет около 35 мин, время подачи и присоединения шланга — около 30 мин. Приблизительно такой же промежуток времени требуется для завершения грузовых операций и подготовки танкера к отходу от платформы.

При формировании векторов x_1 и x_2 для имитационного моделирования работы платформы с танкерами воспользуемся приведенными ранее данными. За начало отсчета примем время минимального уровня, определяемого по графикам сизигийского прилива в пункте Териберская губа (Баренцево море), где движение воды адекватно точке позиционирования платформы «Приразломная». Для определенности к составу двух «челноков» добавим два судна класса «Усинск» дедеветом 19800 т.

Определим последовательность прибытия судов под погрузку:

$$x_1 = [0 \ 3.8 \ 2.7 \ 3.5 \ 2.5 \ 2.7 \ 2.8 \ 3.5 \ 2.5 \ 3.8];$$

$$x_2 = [3.5 \ 2 \ 3.7 \ 2.2 \ 3.6 \ 2.1 \ 3.8 \ 2 \ 3.8 \ 2.1].$$

Внесем в раздел файла «Исходные данные» вектора x_1 , x_2 и установим $N = 10$, предварительно очистив его от других числовых массивов. Выполним моделирование, получим:

$$T_{\text{прост}} = 1,6 \text{ ч}, \quad T_{\text{ср}} = 0.18 \text{ ч}, \quad E = 0.0576, \quad TT = 30,6 \text{ ч}, \quad T_c = 3,06 \text{ ч.}$$

Графические результаты представлены на рис. 3.

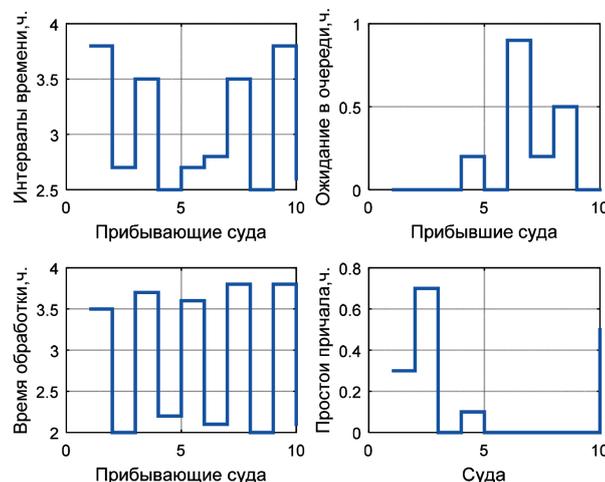


Рис. 3. Имитационное моделирование отгрузки нефти с платформы «Приразломная» с учетом течений во время приливов и отливов

Выводы (Summary)

1. Представленная имитационная модель может применяться для моделирования и оценки процесса погрузки нефти в танкеры с платформ, находящихся в открытом море.
2. Работоспособная модель предназначена для оценки суммарного времени нахождения судов под погрузкой, определения времени простоя причала в ожидании прибытия судов под обработку и других параметров.
3. Применение имитационного моделирования позволяет оперативно решать задачи совершенствования транспортных процессов, формулировать обоснованные выводы и выполнять действия по снижению производственных потерь, формированию различных вариантов составов судов с получением количественных оценок при выборе оптимального решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nam B. W.* Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves / B. W. Nam, Y. Kim, S. Y. Hong // *Applied Ocean Research*. — 2016. — Vol. 58. — Pp. 49–61. DOI: 10.1016/j.apor.2016.03.010.
2. *Tannuri E. A.* FPSO and Monobuoy Offloading Operation with a Conventional Shuttle Tanker: Dimensioning of Tugboat Based on Numerical Simulation / E. A. Tannuri, F. G. Torres, H. Igreja, I. Q. Masetti // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2009. — Vol. 42. — Is. 18. — Pp. 134–139. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0031.
3. *Tannuri E. A.* Numerical and experimental analysis of a typical DP shuttle tanker operating in Brazilian waters / E. A. Tannuri, H. M. Morishita, R. Vilaça, A. C. Saad // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 324–329. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00049.
4. *Pessoa J.* Side-by-side FLNG and shuttle tanker linear and second order low frequency wave induced dynamics / J. Pessoa, N. Fonseca, C. G. Soares // *Ocean Engineering*. — 2016. — Vol. 111. — Pp. 234–253. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.051.
5. *Queiroz Filho A. N.* A shuttle tanker position cooperative control applied to oil transfer operations based on the LQG/LTR method / A. N. Queiroz Filho, E. A. Tannuri, J. J. da Cruz // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2012. — Vol. 45. — Is. 27. — Pp. 67–72. DOI: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00012.
6. *Tannuri E. A.* Offloading Operation with a Dp Shuttle Tanker: Comparison between Full Scale Measurements and Numerical Simulation Results / E. A. Tannuri, A. C. Saad, H. M. Morishita // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2009. — Vol. 42. — Is. 18. — Pp. 249–254. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0021.
7. *Ronalds B. F.* Applicability ranges for offshore oil and gas production facilities / B.F. Ronalds // *Marine structures*. — 2005. — Vol. 18. — Is. 3. — Pp. 251–263. DOI: 10.1016/j.marstruc.2005.06.001.
8. *Kerkhove L. P.* Optimised scheduling for weather sensitive offshore construction projects / L. P. Kerkhove, M. Vanhoucke // *Omega*. — 2017. — Vol. 66. — Pp. 58–78. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.011.
9. *Зайкин Д. А.* Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Транспорт Российской Федерации*. — 2017. — № 1 (68). — С. 44–48.
10. *Зайкин Д. А.* Моделирование возможности проведения грузовых операций на платформе «Приразломная» по погодным условиям / Д. А. Зайкин, А. Г. Топаж, А. В. Косортов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.
11. *Кузнецов А. Л.* Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. *Киселев В. С.* Анализ судозахода, как объекта транспортно-логистической системы Арктической зоны Российской Федерации / В. С. Киселев // *Транспортное дело России*. — 2019. — №2. — С. 229–233.
13. *Silberholz M. B.* Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals / M. B. Silberholz, B. L. Golden, E. K. Baker // *Computers & Operations Research*. — 1991. — Vol. 18. — Is. 5. — Pp. 433–452. DOI: 10.1016/0305-0548(91)90020-R.
14. *Özkan E. D.* Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method / E. D. Özkan, S. Nas, N. Güler // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2016. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.

REFERENCES

1. Nam, B. W., Y. Kim, and S. Y. Hong. "Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves." *Applied Ocean Research* 58 (2016): 49–61. DOI: 10.1016/j.apor.2016.03.010.
2. Tannuri, Eduardo A., Fernando G.S. Torres, Haroldo Igreja, and Isaias Q. Masetti. "FPSO and Monobuoy Offloading Operation with a Conventional Shuttle Tanker: Dimensioning of Tugboat Based on Numerical Simulation." *IFAC Proceedings Volumes* 42.18 (2009): 134–139. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0031.
3. Tannuri, Eduardo A., Helio M. Morishita, Rodrigo Vilaça, and Arthur C. Saad. "Numerical and experimental analysis of a typical DP shuttle tanker operating in Brazilian waters." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 324–329. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00049.
4. Pessoa, João, Nuno Fonseca, and C. Guedes Soares. "Side-by-side FLNG and shuttle tanker linear and second order low frequency wave induced dynamics." *Ocean Engineering* 111 (2016): 234–253. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.051.
5. Queiroz Filho, Asdrubal N., Eduardo A. Tannuri, and José J. da Cruz. "A shuttle tanker position cooperative control applied to oil transfer operations based on the LQG/LTR method." *IFAC Proceedings Volumes* 45.27 (2012): 67–72. DOI: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00012.
6. Tannuri, Eduardo A., Arthur C. Saad, and Hélio Mitio Morishita. "Offloading Operation with a Dp Shuttle Tanker: Comparison between Full Scale Measurements and Numerical Simulation Results." *IFAC Proceedings Volumes* 42.18 (2009): 249–254. DOI: 10.3182/20090916-3-BR-3001.0021.
7. Ronalds, Beverley F. "Applicability ranges for offshore oil and gas production facilities." *Marine structures* 18.3 (2005): 251–263. DOI: 10.1016/j.marstruc.2005.06.001.
8. Kerkhove, L-P., and Mario Vanhoucke. "Optimised scheduling for weather sensitive offshore construction projects." *Omega* 66 (2017): 58–78. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.011.
9. Zaykin, D.A., A.B. Krestyantsev, O.V. Tarovik, and A.G. Topazh. "Application of simulation modelling for analysis of maritime transport and technology system of the Prirazlomnaya platform." *Transport business of Russia* 1(68) (2017): 44–48.
10. Zaykin, Dmitry A., Aleksandr G. Topaj, and Andrey V. Kosorotov. "Modeling of cargo operation ability on Prirazlomnaya platform according to the weather conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.
11. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. Kiselev, V. "Analysis of vessel call as an object of the transport and logistics system of the arctic zone Russian Federation." *Transport business of Russia* 2 (2019): 229–233.
13. Silberholz, Michael B., Bruce L. Golden, and Edward K. Baker. "Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals." *Computers & Operations Research* 18.5 (1991): 433–452. DOI: 10.1016/0305-0548(91)90020-R
14. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, and Nil Güler. "Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.3 (2016): 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киселев Вадим Сергеевич —
Инженер. Исследователь. Соискатель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vadim.s.kiselev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kiselev, Vadim S. —
Engineer. Researcher. Applicant.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vadim.s.kiselev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2019 г.
Received: November 6, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70

INTERPOLATION OF THE NAVIGATIONAL FUNCTION BY THE LAGRANGE TYPE SPLINE

I. V. Yuyukin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of any navigational isoline interpolation by cubic spline of Lagrange type has been considered in detail. The developed approach is of independent practical interest; meanwhile the task of present study is implemented in an integrated way with the finite basic method. In fact, two conceptions are majorized: a method focused on associated Lagrange multipliers in the vicinity of the optimum of the task solution and coordinate B-spline that provides iterative finding of the result within the given accuracy limits. It is demonstrated the synchronous coincidence of Lagrange splines with B-splines at nodal points using the isogeometric construction principle with difference in contours of «step-functions» and «hat-functions». The harmonized mathematical model has allowed you to realize the compromise between the Lagrange analogies and the basic finite construction for the smooth interpolation of navigational function at chaotic state of metering data «noised» by errors. The interpolation of abstract navigational isoline by set of Lagrange splines is geometrically interpreted. The detailed algorithm with new mathematical tools is presented. The task functionality can be modified before restoring the navigational isosurface on the improvised net patch. As a discussion, the author's idea of the local interpolation applicability, provided that an additional compositional identity is introduced in order to calculate spline coefficients using explicit formulas, has been offered. The traditional formalization is transformed for logical connection establishment of spline coefficients with the measured navigational parameters. The locality allows you to manipulate invariant transformations between two different spline presentations with the formation of a single multilink attribute of bit algorithmization. Emphasis is placed on the computational advantages of the new approach on the solution stability and convergence. The hybrid unified algorithm displaces the spectrum of possibilities for processing navigational information to the search for solutions to the impossible tasks of modern navigation.

Keywords: lagrange type spline, coordinate B-spline, «step-functions», «hat-functions», harmonized model, «noised» date, net patch, hybrid algorithm.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Interpolation of the navigational function by the Lagrange type spline." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

УДК 656.61.052 656

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ СПЛАЙНОМ ЛАГРАНЖЕВА ТИПА

И. В. Ююкин

ФГБОУВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Детально рассмотрен вопрос интерполяции любой навигационной изолинии кубическим сплайном лагранжева типа. Разработанный подход представляет самостоятельный практический интерес, при этом задача данного исследования реализуется комплексно в интегрированном варианте с финитным базисным методом. Фактически мажорируются две концепции: метод, ориентированный на ассоциированные лагранжевы множители в окрестности оптимума решения задачи, и координатный B-сплайн, обеспечивающий итерационное нахождение результата в заданных пределах точности. Демонстрируется синхронное совпадение лагранжевых сплайнов в узловых точках с B-сплайнами по изогометрическому принципу построения с разницей в контурах «шаговых функций» с «шапочными функциями». Гармонизированная математическая модель позволяет реализовать компромисс между аналогиями Лагранжа и базисной финитной конструкцией для гладкой интерполяции навигационной функции при сложной хаотичности

«зашумленных» погрешностями измерительных данных. Геометрически интерпретируется интерполяция абстрактной навигационной изолинии набором сплайнов лагранжева типа. Приводится подробный алгоритм с новым математическим инструментарием. Функциональность задачи может быть модифицирована до восстановления навигационной изоповерхности на импровизированном сеточном патче. В качестве обсуждения предлагается авторская идея применимости локальной интерполяции при условии введения дополнительного композиционного тождества с целью вычисления сплайновых коэффициентов по явным формулам. Традиционная формализация переформатируется для установления логической связи сплайновых коэффициентов с измеренными навигационными параметрами. Локальность позволяет манипулировать инвариантными трансформациями между двумя различными сплайновыми представлениями с формированием единого многозвенного атрибута кусочной алгоритмизации. Акцентируется внимание на вычислительных преимуществах нового подхода по устойчивости и сходимости решения. Гибридный унифицированный алгоритм смещает спектр возможностей обработки навигационной информации на поиск решения невыполнимых задач современного судовождения.

Ключевые слова: сплайн лагранжева типа, координатный B -сплайн, «шапочная функция», «шаговая функция», гармонизированная модель, «зашумленные» данные, сеточный патч, гибридный алгоритм.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

Введение (Introduction)

Для апробирования предлагаемого нового математического подхода к решению классической проблемы навигации по интерполированию навигационной функции сформулированы следующие задачи:

1. Создание алгоритма интерполяции навигационной изолинии сплайнами лагранжева типа.
2. Модифицирование гибридного подхода к задаче интерполяции лагранжевыми сплайнами в оптимальном сочетании с базисными финитными многозвенниками.
3. Программная реализация для бортового компьютера из состава навигационного автоматизированного комплекса алгоритма интерполяции сплайнами Лагранжа.

B -сплайны находят широкое современное применение в различных прикладных областях науки [1]–[3]. Ввиду непредсказуемости измерительных данных, в судовождении оправданно комбинировать финитный алгоритм с кусочными многочленами Лагранжа с тем, чтобы в любом случае решить задачу интерполяции навигационной функции наилучшим математическим образом. Кроме того, в некоторых навигационных задачах исходные данные могут быть известны только приближенно в виде набора интервалов допустимых значений навигационной функции. Поэтому представляет интерес разработка алгоритма интерполяции лагранжевыми сплайнами с одновременным адекватным восстановлением геометрических свойств навигационных изолиний.

Для расширения области сходимости вычислительного процесса целесообразно использовать интерполяцию сплайнами лагранжева типа в сочетании с финитным базисным интерполированием, несмотря на математически более сложную комбинацию двух подходов в рамках одного гибридного алгоритма [4]. Гармоничное сочетание двух разных сплайновых методов позволяет использовать преимущества как одного, так и другого варианта для успешного решения прикладных задач современной навигации. С позиций предлагаемого подхода мажорируются две концепции комбинированного алгоритма: метод, ориентированный на лагранжевы аналоги сплайнов в окрестности оптимума решения задачи, и активизация на границах коридора точности интерполяции B -сплайнов, обеспечивающих итерационный поиск устойчивого результата на всем диапазоне решений. Переключение на определенный метод осуществляется без применения специальных штрафных критериев, но схема реализуется автоматически за счет смещения вычислительного акцента в интерполяционной матрице простым численным превосходством множителей Лагранжа, или базиса «шапочных функций» [5]. В зависимости от того, какой метод масштабирует точнее интерполируемую навигационную функцию за счет умножения на унифицированные скалярные сплайновые коэффициенты вектора решений модификации метода наименьших ква-

дратов [6], выбирается тот, который обеспечивает гарантийное гладкое восстановление навигационной изолинии. В тех случаях, когда по условию постановки навигационной задачи известна априорная информация, позволяющая успешно выбрать начальное приближение, можно заблаговременно определить, какой из двух методов использовать. Напротив, при недостаточной адекватной исходной информации гибридный алгоритм является надежным ресурсом решения любой задачи судовождения.

Необходимость оперирования исходными данными спутниковых измерений гравитационного поля и трудности геодезических вычислительных процедур делают актуальным поиск нового перспективного метода решения задачи моделирования планетарного гравитационного поля. При очевидной сложности проблемы актуализируется апробирование синтеза геоидной модели Земли в приемлемом для использования в морской навигации виде. В перспективе максимальная точность глобальной навигации представляется связанной исключительно со сплайновым моделированием реальной формы Земли. Поскольку геоид является фигурой неправильной и имеет сложную грушевидную форму, формализовать такую изоповерхность при помощи классических аналитических зависимостей до проведения настоящего исследования считалось невозможным.

В современной практике навигации используют известный геометрический объект: эллипсоид вращения, образованный в результате вращения эллипса определенного размера вокруг малой оси. Для применимости в судовождении точно описываемого формулами математического атрибута используют некоторые геодезические условия: объем эллипсоида предполагается примерно равным объему геоида, большая полуось эллипсоида находится в плоскости экватора геоида, малая полуось эллипсоида направлена по оси вращения Земли. Удобство использования такой геодезической модели автоматически консервирует методическую погрешность, нивелирующую технические успехи систем спутниковой навигации. Пренебрежение отклонением эллипсоида от геоида может привести к значительным, согласно современным стандартам, расхождениям координат при определении местоположения судна, так как спутниковая обсервация получится ориентированной на ошибочную изоповерхность, поскольку морской подвижный объект движется по водной акватории, являющейся фрагментом реальной поверхности планеты Земля. Фатальным последствием возможных различий систем геодезических координат является навигационная ошибка, возникающая в результате пренебрежения учета поправок к географической широте и долготе, которая может достигать 350–400 м на местности [7], что существенно снижает технические характеристики точности в несколько метров систем GPS/ГЛОНАСС. Максимальное повышение точности спутниковых обсерваций при условии предельных требований к точному восстановлению геоида может быть эффективно обеспечено применением сплайнового гибридного алгоритма.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Алгоритм, составленный на основе сплайнов лагранжева типа как и *B*-сплайновый подход, является абсолютно универсальным в смысле независимости от конкретного вида интерполируемой навигационной функции. Математический вид функции определяется только оперативным ресурсом морского бортового компьютера с заложенными в ячейки памяти предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными параметрами для высокоскоростного вычисления значения любой навигационной функции по номеру сеточного интервала. Вследствие этого предполагается возможным решение широкого класса навигационных задач при интерполяции самых сложных изолиний вплоть до искаженных корректирующими поправками дифференциального режима гипербол вводимой в эксплуатацию системы e-Logan в рамках концепции e-Navigation. В исключительных обстоятельствах при планировании маршрута перехода может быть целесообразным использование приложения батиметрической навигации в электронно-картографических навигационно-информационных системах для учета местных особенностей плавания при анализе подводного профильного рельефа, восстановленного на основе методов сплайн-функций. При решении прикладных задач судовождения гибридная алгоритмическая модель может позволить реализовать

«компромисс» между сплайном Лагранжа и базисной финитной конструкцией для оптимальной интерполяции навигационной функции при сложной хаотичности измерений навигационных параметров.

Сплайн лагранжева типа всегда гарантирует сходимость интерполяционного процесса к интерполируемой функции [8] и пренебрежение данным преимуществом будет явным алгоритмическим упущением. Таким образом, точность аппроксимации может быть существенно повышена за счёт прерогативы интерполяции кусочно-кубическими полиномами Лагранжа.

Интерполяция навигационной функции математически реализуется за счет умножения множителей Лагранжа на расчетные скалярные коэффициенты c_i в каждом узле сеточного интервала. При смоделированном многообразии кусочных лагранжевых функций $L_i(x_i)$ предлагается к реализации следующая адаптированная под поставленную задачу алгоритмическая комбинация:

$$S(x) = \sum_{i=1}^N c_i L_i(x_i), \quad (1)$$

где c_i — линейные функционалы, подлежащие вычислению.

В процессе практических вычислений целесообразно использовать не классические полиномы Лагранжа, а модифицированные лагранжевы функции, получающиеся при манипулировании сплайнами посредством умножения на постоянные скалярные коэффициенты. Данный прием позволяет избежать негативный факт произвольного модифицирования некорректными масштабирующими соотношениями сплайн-функций. Сплайн лагранжева типа абсолютно нивелирует решающее отрицательное свойство глобальной полиномиальной интерполяции в виде обязательности пересчета всех множителей единого многочлена Лагранжа при простой необходимости добавления одного нового узла интерполяции.

Результаты (Results)

Положительный эффект конфигурированного формосохранения интерполяции [9] будет наблюдаться только при условии сопоставимости числового представления кубического сплайна лагранжева типа с дискретным контекстом навигационных параметров. В общем виде ассоциированные лагранжевы сплайн-функции предлагается на целочисленной сетке в минимизированном виде рассчитывать следующим образом:

$$L_{i,q} = \frac{(-1)^{k+1} k! (x_{q+k+1} - x_{q-k+1})}{\prod_{q,k} (x_i)}, \quad i - k + 1 \leq q \leq i + k - 1; \quad (2)$$

$$\prod_{\substack{q,k \\ i \neq q}} (x_i) = (x_i - x_{q-k+1})(x_i - x_{q-k+2}) \dots (x_i - x_{q+k-1}).$$

Для кубического сплайна $k = 3$ конкретизируем формулу (1):

$$L_{i,q} = \frac{(-1)^4 3! (x_{q+2} - x_{q-2})}{\prod_{q,3} (x_i)}, \quad i - 2 \leq q \leq i + 2. \quad (3)$$

В диапазоне $i - 2 \leq q \leq i + 2$ можно получить пять разновидностей формулы (3) для вычисления сплайновых коэффициентов Лагранжа в сеточных узловых точках по аналогии с базисным сплайном. Данные формулы организуются на базе пятиинтервального сеточного полигона в покомпонентной форме с учетом факта $(-1)^4 = 1$:

$$L_{i,i-2} = \frac{3!(x_i - x_{i-4})}{(x_i - x_{i-4})(x_i - x_{i-3})(x_i - x_{i-2})(x_i - x_{i-1})}, \quad q = i - 2;$$

$$L_{i,i-1} = \frac{3!(x_{i+1} - x_{i-3})}{(x_i - x_{i-3})(x_i - x_{i-2})(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})}, \quad q = i - 1;$$

$$L_{i,i} = \frac{3!(x_{i+2} - x_{i-2})}{(x_i - x_{i-2})(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2})}, \quad q = i; \quad (4)$$

$$L_{i,i+1} = \frac{3!(x_{i+3} - x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2})(x_i - x_{i+3})}, \quad q = i + 1;$$

$$L_{i,i+2} = \frac{3!(x_{i+4} - x_i)}{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+2})(x_i - x_{i+3})(x_i - x_{i+4})}, \quad q = i + 2.$$

Принцип построения кусочно-определенных многочленов Лагранжа на пятиузловом сеточном сегменте аналогичен по организации своему прототипу в виде кубического нормализованного B -сплайна [9]. Для равномерной сетки формулы (4) реализуются в конкретные числовые коэффициенты кусочно-кубических многочленов Лагранжа:

$$L_{i,i-2} = \frac{6 \cdot (+4)}{(+4) \cdot (+3) \cdot (+2) \cdot (+1)} = \frac{+24}{+24} = +1;$$

$$L_{i,i-1} = \frac{6 \cdot (+4)}{(+3) \cdot (+2) \cdot (+1) \cdot (-1)} = \frac{+24}{(-6)} = -4;$$

$$L_{i,i} = \frac{6 \cdot (+4)}{(+2) \cdot (+1) \cdot (-1) \cdot (-2)} = \frac{+24}{+4} = +6;$$

$$L_{i,i+1} = \frac{6 \cdot (+4)}{(+1) \cdot (-1) \cdot (-2) \cdot (-3)} = \frac{+24}{(-6)} = -4.$$

Отличие сплайна Лагранжа заключается в утрате ключевого свойства нормализованности базисных финитных конструкций, образующими разбиение единицы на определенных сеточных носителях конечной минимальной длины [10]. Основная конструкция кубического сплайна лагранжева типа в одномерной композиции представлена на рис. 1.

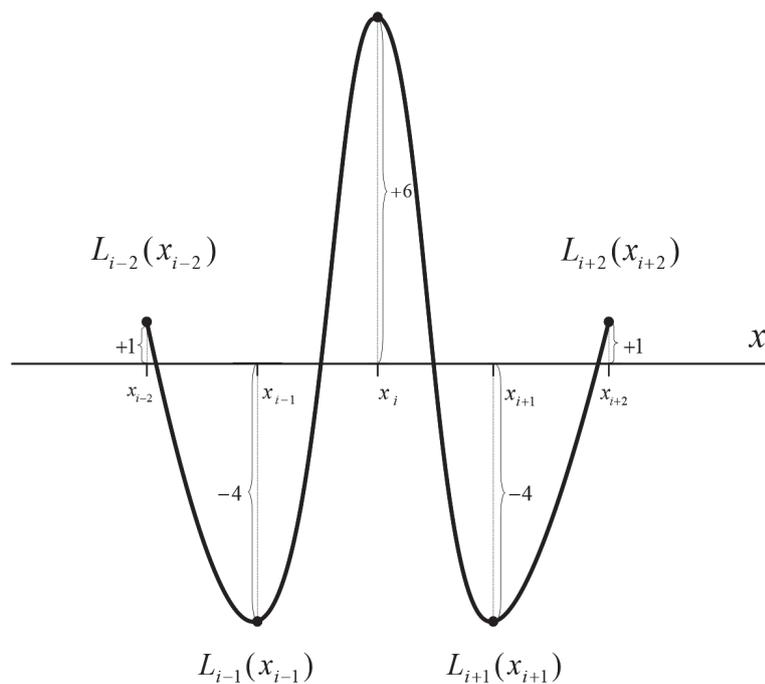


Рис. 1. Единичный формат кубического сплайна лагранжева типа на пятикратном узлом полигоне

Сплайны лагранжева типа синхронно совпадают в узловых точках сетки с базисными сплайнами по принципу организации построения, но различаются по форме в сплайновых контурах «шапочных функций» с так называемыми «шаговыми функциями» [8]. Геометрически каждый сплайн Лагранжа фактически синтезирует трехкратное сочетание импульсных образов «шаговой функции» в положительной и отрицательных областях определения функциональной зависимости.

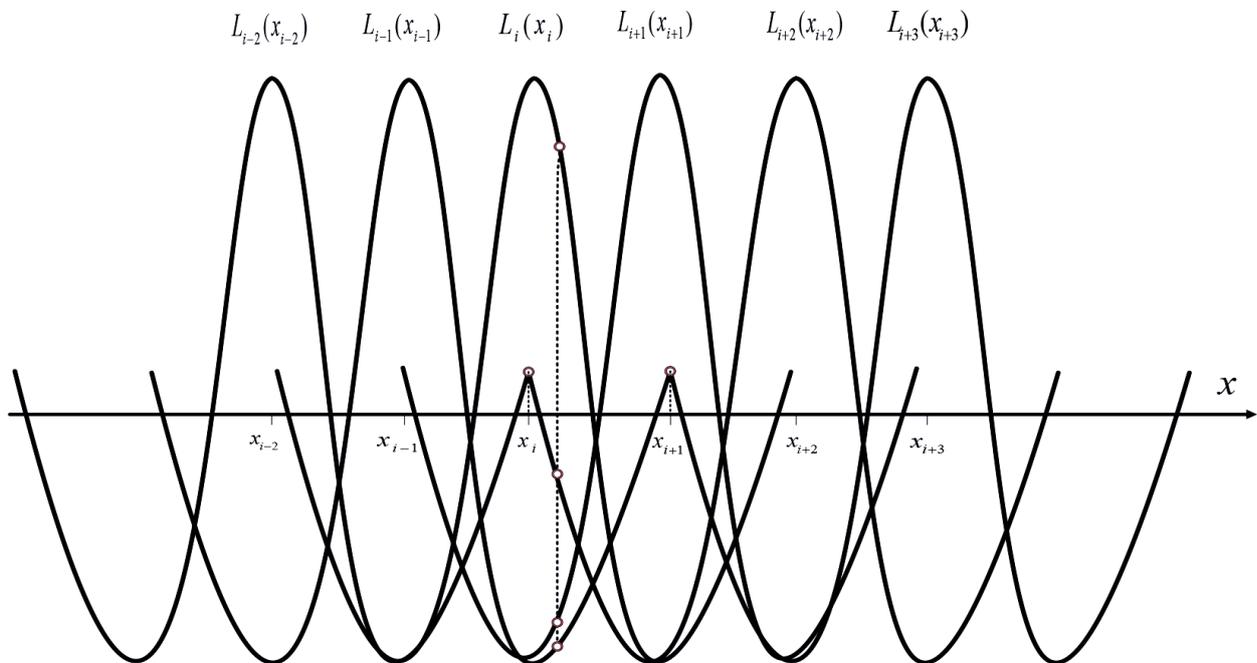


Рис. 2. Демонстрация вычисления произвольного значения навигационной функции через суммирование множителей Лагранжа

Генерирование навигационной функции в произвольной точке $x^* \in [x_i, x_{i+1}]$ потока числовой информации [11], включая границы обозначенного сеточного интервала (рис. 2), осуществляется на основе шестизлементной композиции сплайна лагранжевого типа в общем случае:

$$S(x^*) = c_{i-2}L_{i-2}(x^*) + c_{i-1}L_{i-1}(x^*) + c_iL_i(x^*) + c_{i+1}L_{i+1}(x^*) + c_{i+2}L_{i+2}(x^*) + c_{i+3}L_{i+3}(x^*). \quad (6)$$

Из анализа рис. 2 следует, что для любого промежуточного аргумента x^* внутри одного сеточного сегмента $[x_i, x_{i+1}]$ необходимо задействовать значения четырех функций Лагранжа: $L_{i-1}(x_{i-1})$, $L_i(x_i)$, $L_{i+1}(x_{i+1})$, $L_{i+2}(x_{i+2})$. Пятый множитель $L_{i-2}(x_{i-2})$ или $L_{i+3}(x_{i+3})$ участвует в расчете только в том случае, если необходимо выполнить вычисление в любом из двух узлов: x_i или x_{i+1} .

В формуле (6) условно фигурируют шесть компонент сплайнов лагранжева типа исключительно для теоретического обозначения в общем случае максимально возможных вариантов решения без необходимого вычета одного элемента за счет выбора вариантности в случае строгого попадания на любую границу единичного сеточного отрезка. Фактически при вычислении на левой или правой границе единичного носителя $[x_i, x_{i+1}]$ четыре активных элемента гладких аналогов лагранжевых сплайнов: $L_{i-1}(x_{i-1})$, $L_i(x_i)$, $L_{i+1}(x_{i+1})$, $L_{i+2}(x_{i+2})$, добавляются пятый: $L_{i-2}(x_{i-2})$ или $L_{i+3}(x_{i+3})$, с выбором из двух возможных вариантов, а шестой множитель: $L_{i+3}(x_{i+3})$ или $L_{i-2}(x_{i-2})$, автоматически принимает нулевое значение в зависимости от того, по левой или правой границе сеточного интервала выполняется вычисление.

Набор из сплайновых полиномов Лагранжа, восстанавливающих непрерывную навигационную функцию на интерполируемом интервале, формирует условную альтернативу B-сплайну в рамках одной гибридной системы линейных алгебраических уравнений в матричном исчислении [6].

Рис. 3 интерпретирует геометрическую интерполяцию гипотетической навигационной изолинии $U = f(x, y)$ в локальной системе координат серией модифицированных функций Лагранжа из шести вариаций основной конструкции сплайнового многозвенника аналогично ситуации с B -сплайном [12].

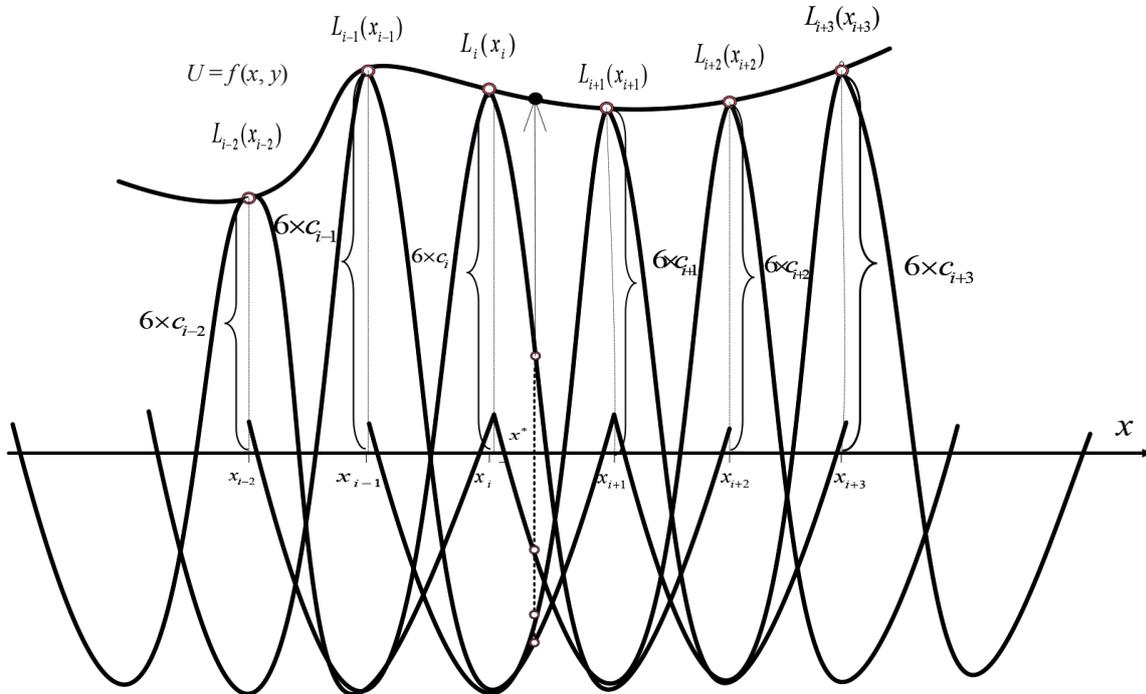


Рис. 3. Геометрическая интерпретация интерполяции абстрактной навигационной изолинии набором сплайнов лагранжева типа

Скалярные сплайновые коэффициенты c_i , фактически выполняющие в алгоритме опцию калибровочных соотношений [13], необходимы для умножения в каждом сеточном узле на лагранжевы компоненты $L_i(x_i)$ с целью реализации непосредственно процедуры сплайн-интерполяции как таковой. Рис. 3 поясняет технологическую концепцию процесса интерполяции за счет масштабирования множителей Лагранжа по прямой аналогии с базисным сплайном [12]. Наглядно демонстрируется, что лагранжев сплайн и синтезируемая навигационная функция представляют собой разные геометрические объекты. Ассоциированный лагранжев сплайн формирует по дискретным данным искусственную кусочную конструкцию, но аналогично координатному B -сплайну [14] не является непосредственно фактическим фрагментом интерполируемой кривой. Реальная математическая кривая синтезируется методом умножения последовательности множителей Лагранжа на скалярные коэффициенты $c_{i-2}, c_{i-1}, c_i, c_{i+1}, c_{i+2}, c_{i+3}$ как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала (см. рис. 2). Сплайн лагранжева типа представляет собой вторичную абстракцию по отношению к оригинальной навигационной функции.

В узле x_i сплайн лагранжева типа формируется на основе пяти активных элементов $L_i(x_i)$ с номерами $i - 2, i - 1, i, i + 1, i + 2$ в отличие от базисного сплайна, организованного из трех ненулевых коэффициентов [10]. Следовательно, условия интерполяции сплайном Лагранжа навигационной функции для левой границы симплекса $[x_i, x_{i+1}]$ приобретают вид

$$c_{i-2}L_{i-2}(x_i) + c_{i-1}L_{i-1}(x_i) + c_iL_i(x_i) + c_{i+1}L_{i+1}(x_i) + c_{i+2}L_{i+2}(x_i) = f_i, \quad i = 2, \dots, N - 1. \quad (7)$$

Однако в данном случае алгебраическая система уравнений (7), составленная из $N - 2$ уравнений, имеет N неизвестных c_i с учетом двух дополнительных коэффициентов: c_0 и c_{N+1} . Для замыкания системы (7) следует добавить два крайних условия по первой производной, математически задающих физическую напряженность сплайновой кривой:

$$\left. \begin{aligned} c_0 L'_0(x_2) + c_1 L'_1(x_2) + c_2 L'_2(x_2) + c_3 L'_3(x_2) + c_4 L'_4(x_2) &= f'_2; \\ c_{i-2} L_{i-2}(x_i) + c_{i-1} L_{i-1}(x_i) + c_i L_i(x_i) + c_{i+1} L_{i+1}(x_i) + c_{i+2} L_{i+2}(x_i) &= f_i; \quad i = 2, \dots, N-1 \\ c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L'_N(x_{N-1}) + c_{N+1} L'_{N+1}(x_{N-1}) &= f'_{N-1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Используя краевые условия, исключаем c_0 и c_{N+1} из системы (8):

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{f'_2 - c_1 L'_1(x_2) - c_2 L'_2(x_2) - c_3 L'_3(x_2) - c_4 L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)}, \\ c_{N+1} &= \frac{f'_{N-1} - c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) - c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) - c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) - c_N L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})}. \end{aligned} \quad (9)$$

Первое и последнее уравнения условий интерполяции приобретают вид:

$$\begin{aligned} c_0 L_0(x_2) + c_1 L_1(x_2) + c_2 L_2(x_2) + c_3 L_3(x_2) + c_4 L_4(x_2) &= f_2; \\ c_{N-3} L_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L_N(x_{N-1}) + c_{N+1} L_{N+1}(x_{N-1}) &= f_{N-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим в уравнения (10) вместо коэффициентов c_0 и c_{N+1} их выражения через краевые условия (9):

$$\begin{aligned} \frac{(f'_2 - c_1 L'_1(x_2) - c_2 L'_2(x_2) - c_3 L'_3(x_2) - c_4 L'_4(x_2)) L_0(x_2)}{L'_0(x_2)} + c_1 L_1(x_2) + c_2 L_2(x_2) + \\ + c_3 L_3(x_2) + c_4 L_4(x_2) &= f_2; \\ c_{N-3} L_{N-3}(x_{N-1}) + c_{N-2} L_{N-2}(x_{N-1}) + c_{N-1} L_{N-1}(x_{N-1}) + c_N L_N(x_{N-1}) + \\ + \frac{(f'_{N-1} - c_{N-3} L'_{N-3}(x_{N-1}) - c_{N-2} L'_{N-2}(x_{N-1}) - c_{N-1} L'_{N-1}(x_{N-1}) - c_N L'_N(x_{N-1})) L_{N+1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} &= f_{N-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом уравнений (11) в модифицированном виде алгебраическая система уравнений (8), состоящая из упорядоченных и гладко состыкованных между собой наборов кусочных многочленов Лагранжа, примет вид:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \left[L_1(x_2) - \frac{L'_1(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + c_2 \left[L_2(x_2) - \frac{L'_2(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + c_3 \left[L_3(x_2) - \frac{L'_3(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] + \\ + c_4 \left[L_4(x_2) - \frac{L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2) \right] &= f_2 - \frac{f'_2}{L'_0(x_2)} L_0(x_2); \\ c_{i-2} L_{i-2}(x_i) + c_{i-1} L_{i-1}(x_i) + c_i L_i(x_i) + c_{i+1} L_{i+1}(x_i) + c_{i+2} L_{i+2}(x_i) &= f_i, \quad i = 3, \dots, N-2; \\ c_{N-3} \left[L_{N-3}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-3}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + c_{N-2} \left[L_{N-2}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-2}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + \\ + c_{N-1} \left[L_{N-1}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] + c_N \left[L_N(x_{N-1}) - \frac{L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}) \right] &= \\ &= f_{N-1} - \frac{f'_{N-1}}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Матричная форма построения сплайна лагранжева типа формируется на основе организации интерполяционной матрицы пятидиагональной структуры, что обеспечивает вычислительную устойчивость к погрешностям числовых округлений:

$$\begin{bmatrix} K_1 & M_1 & P_1 & S_1 & 0 & R_1 \\ R_2 & K_2 & M_2 & P_2 & S_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & R_{N-1} & K_{N-1} & M_{N-1} & P_{N-1} & S_{N-1} \\ S_N & 0 & R_N & K_N & M_N & P_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $R_1 = 0$;

$$K_1 = L_1(x_2) - \frac{L'_1(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$M_1 = L_2(x_2) - \frac{L'_2(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$P_1 = L_3(x_2) - \frac{L'_3(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$S_1 = L_4(x_2) - \frac{L'_4(x_2)}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$R_i = L_{i-2}(x_i);$$

$$K_i = L_{i-1}(x_i);$$

$$M_i = L_i(x_i);$$

$$P_i = L_{i+1}(x_i);$$

$$S_i = L_{i+2}(x_i);$$

$$R_N = L_{N-3}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-3}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$K_N = L_{N-2}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-2}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$M_N = L_{N-1}(x_{N-1}) - \frac{L'_{N-1}(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$P_N = L_N(x_{N-1}) - \frac{L'_N(x_{N-1})}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1});$$

$$S_N = 0;$$

$$f_1 = f_2 - \frac{f'_2}{L'_0(x_2)} L_0(x_2);$$

$$f_N = f_{N-1} - \frac{f'_{N-1}}{L'_{N+1}(x_{N-1})} L_{N+1}(x_{N-1}).$$

Вычисление линейных функционалов из выражения (1) предполагает решение системы линейных алгебраических уравнений в матричном исчислении (13). Интерполяционная матрица (13) имеет пятидиагональную структуру, что служит гарантией того, что применяемый алгоритм является устойчивым. Матрицы с диагональным преобладанием всегда не вырождены, а, следовательно, математическая формализация (13) имеет стабильное решение [15]. Впрочем, сплайновым расчетом можно пользоваться и при отсутствии диагонального преобладания, но уже без полной уверенности в конечном успехе математических действий. Кроме того, диагональное преобладание теоретически обосновывает существование и единственность интерполанта с позиций теории сплайн-функций. Метод исключения Гаусса реализуется по более простым формулам метода прогонки с учетом феномена пятидиагональности [13]. Алгоритм прогонки корректен для матрицы с пятидиагональным преобладанием из системы уравнений (13) в том смысле, что все математические действия, связанные с их осуществлением, практически выполнимы, т. е. знаменатели в формулах нигде не обращаются в ноль. Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство: алгоритм прогонки устойчив [16], т. е. модули прогоночных коэффициентов не превосходят единицы, вследствие чего не происходит прогрессивного роста погрешности вычислений.

Восстановление выпуклой оболочки навигационного поля математически реализуется за счет умножения узловых значений базисных финитных функций и сплайновых аналогов Лагранжа на искомые, согласно методу наименьших квадратов, линейные функционалы при финальном суммировании полученных компонент на каждом выбранном сеточном патче в рамках одного гибридного алгоритма [6].

Клетки блочных матриц H_1 и H_2 непосредственно формируются множителями Лагранжа $L_{g,k+1}(\varphi_q)$ и $L_{h,m+1}(\lambda_r)$ по координатам φ и λ соответственно [6], альтернативно участвуя в вычислительных реализациях гибридного алгоритма аппроксимации навигационной изоповерхности синхронизированно с матрицами коэффициентов двумерного базисного сплайна:

$$H_1 = \begin{bmatrix} L_{-k,k+1}(\varphi_1) & \dots & L_{g,k+1}(\varphi_1); \\ L_{-k,k+1}(\varphi_2) & \dots & L_{g,k+1}(\varphi_2); \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{-k,k+1}(\varphi_q) & \dots & L_{g,k+1}(\varphi_q); \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} L_{-m,m+1}(\lambda_1) & \dots & L_{h,m+1}(\lambda_1); \\ L_{-m,m+1}(\lambda_2) & \dots & L_{h,m+1}(\lambda_2); \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{-m,m+1}(\lambda_r) & \dots & L_{h,m+1}(\lambda_r). \end{bmatrix}$$

Геометрическая интерпретация интерполяции фрагмента гипотетической навигационной изоповерхности с использованием сплайнов лагранжева типа наглядно показана в работе [6].

Обсуждение (Discussion)

На основе анализа тестовых экспериментов в данном исследовании был установлен вычислительный факт: по своим значениям скалярные коэффициенты c_i достаточно близки по числовым значениям к текущим значениям измерений навигационной функции f_i . В связи с этим предлагается реализовать оригинальную идею — отождествить разнородные по алгоритмическому назначению величины одной простой композитной формулой: $c_i = f_i$. Арифметическая рокировка множителей c_i с дискретными значениями навигационных параметров f_i автоматически организует интерполяцию модернизированного представления сплайна лагранжева типа благодаря новому осмыслению физической сути интерполяции:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{N+1} f_i L_i(x). \quad (14)$$

Аналогично для базисного сплайна новая идея формализуется следующим образом:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{N+1} f_i B_i(x). \quad (15)$$

Новый взгляд на теорию приближения навигационных функций предлагается называть *локальной интерполяцией* с целью акцентирования внимания на отсутствии необходимости в решении больших систем алгебраических уравнений с существенными вычислительными затратами для нового подхода.

Традиционное B -сплайновое представление [10] необходимо переформатировать для установления логической связи коэффициентов c_j с величинами стандартной разностной аппроксимации:

$$z_i = S(x_i); z'_i = S'(x_i); z''_i = S''(x_i), \quad (16)$$

где $z_j = B_j(x_i); z'_j = B'_j(x_i); z''_j = B''_j(x_i); j = i-1, \dots, i+2$.

В силу finiteness B -сплайна соотношения (16) фактически представляются в модифицированном виде:

$$\left. \begin{aligned} c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) &= z_i; \\ c_{i-1}B'_{i-1}(x_i) + c_iB'_i(x_i) + c_{i+1}B'_{i+1}(x_i) &= z'_i; \\ c_{i-1}B''_{i-1}(x_i) + c_iB''_i(x_i) + c_{i+1}B''_{i+1}(x_i) &= z''_i. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Система (17) относительно неизвестных c_{i-1}, c_i, c_{i+1} независимо от равномерности сетки всегда имеет решение. В частности, сплайновые коэффициенты упрощенно можно рассчитать по явной формуле следующим образом:

$$c_i = z_i + \frac{h_i - h_{i-1}}{3} z'_i - \frac{h_i - h_{i-1}}{6} z''_i, \quad (18)$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$ — i -й шаг сетки;

i — 1-й шаг сетки $h_{i-1} = x_i - x_{i-1}$.

Таким образом, если известны величины z_i, z'_i, z''_i , то коэффициенты базисного сплайна могут быть получены по явным формулам [18]. Способ расчета сплайновых коэффициентов с использованием системы (17), с одной стороны, является несколько усложненным, но, с другой стороны, представляет более надежный математический метод. В экстремальных случаях интерполяционная матрица системы (12) может и не иметь диагонального преобладания. В аналогичных случаях матрицы для нахождения значений z'_i или z''_i всегда можно представить с диагональным преобладанием [5]. Поэтому имеет смысл в проблемной ситуации вначале получить z'_i или z''_i , а затем по явным формулам (18) рассчитать коэффициенты c_i . Возникает вопрос: *какие положительные свойства локальной аппроксимации можно однозначно идентифицировать с позиций нового подхода к задаче интерполяции навигационных функций?*

Во-первых, из самой сути сплайна сохраняется условие успешности дифференцирования до непрерывности второй производной с обеспечением максимальной гладкости, что, безусловно, оказывает влияние на геометрическую плавность сплайн-функций, находящихся в зависимости от значений их вторых производных. Кроме того, при построении сплайнов привлекается дополнительная информация о навигационной функции в виде значений ее производных на границах сеточного сегмента интерполяции (8), что обеспечивает формирование «плавности» сплайна. Имеются в виду так называемые *естественные краевые условия*, которые задают математический аналог механического напряжения всей «склеенной» конструкции. Без задания граничных условий алгоритмически не обойтись, так как математическое освобождение сплайна перестает влиять на максимальную «гладкость» восполняемых навигационных изолиний.

Во-вторых, локальная аппроксимация точна на многочленах до третьей степени включительно: если функция f_i принадлежит значениям какого-либо многочлена, то сплайн должен совпасть с этим многочленом [5].

В-третьих, главным свойством локальной аппроксимации является *эффект математического сглаживания*, т. е. локальный сплайн способен «подавить» шумовые всплесковые осцилляции погрешностей измерительных данных. При этом локальный сплайн близок к интерполяционному

сплайну, но с ним точно не совпадает. При условии применения простой формулы: $c_i = f_i$, возникают эффекты приближения локального сплайна к интерполяционному, что в целом делает картину аппроксимации более гладкой. Величина уклонения локального сплайна, как правило, зависит от математического характера навигационной функции.

Таким образом, главное достоинство локальных сплайнов заключается в том, что для их конструирования нет необходимости в решении алгебраических систем большой размерности, их коэффициенты вычисляются по простым формулам. В силу этого в вычислительных задачах судовождения экстремальным свойствам локальной аппроксимации следует отдать предпочтение в исключительных случаях сложности дискретных измерительных данных. При этом исходная информация подвергается сглаживанию, что может быть важным в случае, когда в измерениях навигационных параметров присутствует всплесковая хаотичная погрешность.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для эффективного применения прогрессивных алгоритмов интерполяции навигационной функции может стать возможным дополнение интегрированной обработки информации на основе традиционных базисных сплайнов вычислительной процедурой с математическим атрибутом в виде аналоговых сплайнов лагранжева типа.

2. Локальная аппроксимация компромиссным образом манипулирует инвариантными трансформациями между двумя различными сплайновыми представлениями с формированием новой концепции фундаментального сплайна как единого многозвенного атрибута кусочной алгоритмизации при преобразовании одного представления сплайна в другое.

3. Ориентированный на лагранжевы сплайны алгоритм, адекватно описывающий моделируемый навигационный объект, может быть использован в качестве составной части гибридного математического аппарата интерполяции навигационной изоповерхности [6] в виде прикладной паскаль-программы программного обеспечения автоматизированного интегрированного мостика.

4. Оригинальный гибридный подход позволяет унифицировать две различные практические сплайновые конструкции в виде базисных финитных композиций и сплайнов лагранжева типа с целью автоматической адаптации вычислительного модуля к «зашумленным» хаотичными погрешностями измерительных данных.

5. В качестве прикладного программного обеспечения для бортового компьютера апробируется комбинированный метод на основе базисных финитных сплайнов и сплайн-интерполяции кусочными полиномами Лагранжа для решения сложной проблемы судовождения реконструкции геоидной модели земной поверхности с целью достижения абсолютной точности навигации. По результатам проведенного тестового эксперимента точность расчета числового массива геоидных поправок на основном поле вычислений обеспечивается в алгоритмических пределах 10^{-6} – 10^{-8} м, и только в четырех концевых позициях задания краевых условий интерполяции наблюдается снижение точности до 10^{-2} – 10^{-3} м [18].

6. На основе разработанного гибридного алгоритма выполнен компьютерный эксперимент моделирования фрагментов электронного профиля геоида разных ракурсов в мультипликативном режиме. Геометрическая интерпретация вычислительных реализаций алгоритма сплайн-интерполяции апробируется построением на дисплее компьютера электронных перспектив геоида с целью демонстрации работоспособности предлагаемого математического аппарата [18].

7. Авторский алгоритм может быть использован на микропроцессорном уровне в перспективных спутниковых приемоиндикаторах или в электронных векторных картографических системах с целью реализации в практике судовождения преимуществ, следующих из его применения.

8. Апробирование сплайнов лагранжева типа в судовождении может быть ориентировано на долгосрочную научную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sayevand K.* Cubic B-spline collocation method and its application for anomalous fractional diffusion equations in transport dynamic systems / K. Sayevand, A. Yazdani, F. Arjang // *Journal of Vibration and Control*. — 2016. — Vol. 22. — Is. 9. — Pp. 2173–2186. DOI: 10.1177/1077546316636282.
2. *Iqbal M. K.* New Cubic B-spline Approximation for solving Non-linear Singular Boundary Value Problems Arising in Physiology / M. K. Iqbal, M. Abbas, N. Khalid // *Communications in Mathematics and Applications*. — 2018. — Vol. 9. — № 3. — Pp. 377–392. DOI: 10.26713/cma.v9i3.802.
3. *Попов А. И.* Применение финитных базисных сплайнов при восстановлении сигналов электрогастроэнтерографии / А. И. Попов, С. Ф. Свинын // *Труды СПИИРАН*. — 2017. — № 1(50). — С. 93–111. DOI: 10.15622/sp.50.4.
4. *Tok Onarcan A.* Trigonometric cubic B-spline collocation algorithm for numerical solution reaction-diffusion equation systems / A. Tok Onarcan, N. Adar, I. Dag // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2018. — Vol. 37. — Is. 5. — Pp. 6848–6869. DOI: 10.1007/s40314-018-0713-4.
5. *Kvasov B. I.* *Methods of Shape-Preserving Spline Approximation*. — Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. — 338 p.
6. *Ююкин И. В.* Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
7. *Гагарский Д. А.* *Электронные картографические системы в современном судовождении*. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2007. — 124 с.
8. *Kvasov B. I.* Approximation by Lagrange splines / B. I. Kvasov, A. Luadsong // *Proceedings of the Fourth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering*. — Bangkok: Kasetsart University, 2000. — Pp. 303–315.
9. *Богданов В. В.* Условия формосохранения при интерполяции кубическими сплайнами / В. В. Богданов, Ю. С. Волков // *Математические труды*. — 2019. — Т. 22. — № 1. — С. 19–67. DOI: 10.33048/mat-trudy.2019.22.102.
10. *Ююкин И. В.* Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
11. *Dem'yanovich Yu. K.* Realization of the spline-wavelet decomposition of the first order / Yu. K. Dem'yanovich, A. S. Ponomarev // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2017. — Vol. 224. — Is. 6. — Pp. 833–860. DOI: 10.1007/s10958-017-3454-9.
12. *Ююкин И. В.* Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
13. *Dem'yanovich Yu. K.* Adaptive Wavelet Decomposition of Matrix Flows / Yu. K. Dem'yanovich, V. G. Degtyarev, N. A. Lebedinskaya // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2018. — Vol. 232. — Is. 6. — Pp. 816–829. DOI: 10.1007/s10958-018-3911-0.
14. *Dem'yanovich Yu. K.* Two-sided estimates of some coordinate splines / Yu. K. Dem'yanovich, D. M. Lebedinskii, N. A. Lebedinskaya // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2016. — Vol. 216. — Is. 6. — Pp. 770–782. DOI: 10.1007/s10958-016-2941-8.
15. *Khalid N.* A numerical algorithm based on modified extended B-spline functions for solving time-fractional diffusion wave equation involving reaction and damping terms / N. Khalid, M. Abbas, M. K. Iqbal, D. Baleanu // *Advances in Difference Equations*. — 2019. — Vol. 2019. — Is. 1. — Pp. 378. DOI: 10.1186/s13662-019-2318-7.
16. *Makarov A. A.* On two algorithms of wavelet decomposition for spaces of linear splines / A. A. Makarov // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2018. — Vol. 232. — Is. 6. — Pp. 926–937. DOI: 10.1007/s10958-018-3920-z.
17. *Makarov A. A.* On functionals dual to minimal splines / A. A. Makarov // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2017. — Vol. 224. — Is. 6. — Pp. 942–955. DOI: 10.1007/s10958-017-3464-7.
18. *Ююкин И. В.* Алгоритмизация навигационных задач на основе методов кусочных аппроксимаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. В. Ююкин. — Л., 1991. — 22 с.

REFERENCES

1. Sayevand, Khosro, Allah Yazdani, and Fatemeh Arjang. "Cubic B-spline collocation method and its application for anomalous fractional diffusion equations in transport dynamic systems." *Journal of Vibration and Control* 22.9 (2016): 2173–2186. DOI: 10.1177/1077546316636282.
2. Iqbal, Muhammad K., Muhammad Abbas, and Nauman Khalid. "New Cubic B-spline Approximation for solving Non-linear Singular Boundary Value Problems Arising in Physiology." *Communications in Mathematics and Applications* 9.3 (2018): 377–392. DOI: 10.26713/cma.v9i3.802.
3. Popov, Aleksandr Igorevich, and Sergey Fedorovich Svinyin. "Application of Finite Basis Splines in Reconstructing Electrogastroenterography Signals." *SPIRAS Proceedings* 1(50)(2017): 93–111. DOI: 10.15622/sp.50.4.
4. Tok Onarcan, Aysun, Nihat Adar, and Idiris Dag. "Trigonometric cubic B-spline collocation algorithm for numerical solution reaction-diffusion equation systems." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 37.5 (2018): 6848–6869. DOI: 10.1007/s40314-018-0713-4.
5. Kvasov, Boris I. *Methods of Shape-Preserving Spline Approximation*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.
6. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
7. Gagarskiy, Dmitriy A. *Elektronnyye kartograficheskie sistemy v sovremennom sudovozhdenii*. SPb.: GMA imeni admirala S.O. Makarova, 2007.
8. Kvasov, Boris I., and Anirut Luadsong. "Approximation by Lagrange splines." *Proceedings of the Fourth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering*. Bangkok: Kasetsart University, 2000. 303–315.
9. Bogdanov, Vladimir V., and Yuriy S. Volkov. "Usloviya formosohraneniya pri interpolyatcii kubicheskimi splaynami." *Matematicheskie Trudy* 22.1 (2019): 19–67. DOI: 10.33048/mattrudy.2019.22.102.
10. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
11. Dem'yanovich, Yuri K., and Alexander S. Ponomarev. "Realization of the spline-wavelet decomposition of the first order." *Journal of Mathematical Sciences* 224.6 (2017): 833–860. DOI: 10.1007/s10958-017-3454-9.
12. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
13. Dem'yanovich, Yuri K., Valentin G. Degtyarev, and Natalia A. Lebedinskaya. "Adaptive Wavelet Decomposition of Matrix Flows." *Journal of Mathematical Sciences* 232.6 (2018): 816–829. DOI: 10.1007/s10958-018-3911-0.
14. Dem'yanovich, Yuri K., Dmitriy M. Lebedinskii, and Natalia A. Lebedinskaya. "Two-sided estimates of some coordinate splines." *Journal of Mathematical Sciences* 216.6 (2016): 770–782. DOI: 10.1007/s10958-016-2941-8.
15. Khalid, Nauman, Muhammad Abbas, Muhammad K. Iqbal, and Dumitru Baleanu. "A numerical algorithm based on modified extended B-spline functions for solving time-fractional diffusion wave equation involving reaction and damping terms." *Advances in Difference Equations* 2019.1 (2019): 378. DOI: 10.1186/s13662-019-2318-7.
16. Makarov, Anton A. "On two algorithms of wavelet decomposition for spaces of linear splines." *Journal of Mathematical Sciences* 232.6 (2018): 926–937. DOI: 10.1007/s10958-018-3920-z.
17. Makarov, Anton A. "On functionals dual to minimal splines." *Journal of Mathematical Sciences* 224.6 (2017): 942–955. DOI: 10.1007/s10958-017-3464-7.
18. Yuyukin, Igor V. *Algoritimizatsiya navigatsionnykh zadach na osnove metodov kusochnykh approksimatsii*. Abstract of Ph.D. Diss. L., 1991.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2019 г.

Received: November 22, 2019.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84

ANALYSIS OF ICE SITUATION CHANGES ON THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE LATE XX — EARLY XXI CENTURY

A. V. Kholoptsev^{1,2}, S. A. Podporin¹

¹ — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol branch of FSBI “N.N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

As global climate changes are becoming a major concern for climatologists and earth scientists, substantial sea ice decline in the Arctic, on the contrary, brings new possibilities for shipping, cargo transportation, and coastal mineral development. Ice cover dynamics in the Russian Arctic in the late XX — early XXI century has been investigated in the paper. On this basis, the aim to assess the prospects for ice situation improvement on the Northern Sea Route during the next decades is set. Thorough analysis of numerous scientific papers addressing this issue reveals that there is a great variety of views and forecasts on this matter. The Arctic ice, as some researchers predict, is expected to completely vanish in the summer months by the middle of the XXI century, however other insights suggest the Arctic climate cooling and subsequent sea ice growth due to the Solar constant lessening by approximately the same time.

In this paper, the major factors influencing the Arctic ice dynamics, including the Arctic–North Atlantic water exchange, formation of polynyas around river estuaries, solar activity variations, are considered. The most essential indicators of the ice situation such as the ice extent of the water areas, the average and the maximum ice thickness therein, and the total area of polynyas are investigated. The time series for the above indicators are obtained by use of the ICDC reanalysis data provided by the University of Hamburg.

Reanalysis datasets available for 1979–2017 are used to reveal the major trends in the ice situation dynamics for this period. It is shown that the ice cover had been having an overall tendency to decline in the European and the West-Siberian sectors of the Russian Arctic, which in turn had been improved navigability therein. Similar trends are likely to be seen in the next two decades. In the East-Siberian and the Chukchi sectors, the similar dynamics for sea ice decline was obvious until 2007, and then the opposite trend leading to the ice situation aggravation emerged. It is thus feasible to assume that substantial improvement of ice conditions in the East-Siberian and the Chukchi Seas in the summer months is not to be expected in the next decades. Shipping safety therein will remain highly dependent on icebreaker services. It is also quite clear that in the next at least two decades the prospects for opening the transpolar shipping routes will remain illusory, whereas the Northern Sea Route will serve as the main transport artery in the Arctic.

Keywords: Northern Sea Route, Arctic, ice situation, climate changes, shipping safety, trend, polynya, ice extent.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

УДК 656.61.052: 551.583

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

А. В. Холопцев^{1,2}, С. А. Подпорин¹

¹ — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

² — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

Исследована динамика изменений ледовой обстановки в российском сегменте Арктики в конце XX — начале XXI в. в летние месяцы в свете глобального потепления климата. На основе полученных данных выполнена оценка перспектив улучшения ледовых условий и развития судоходства на Северном морском пути в ближайшие десятилетия. По результатам анализа научных публикаций выявлены существенные расхождения в прогнозах разных авторов о динамике развития ледового покрова Арктики и отмечено многообразие научных точек зрения — от полного таяния льдов в летний период к середине XXI в. до, наоборот, значительного увеличения их площади. Выделены основные факторы, влияющие на динамику ледового покрова, включая водообмен с Северной Атлантикой, образование полыней в устьях рек, а также изменение солнечной активности. Исследованы наиболее характерные показатели ледовой обстановки: ледовитость акваторий, средняя и максимальная толщина льда, суммарная площадь полыней. Данные для построения временных рядов указанных показателей получены на основе реанализа ICDC, предоставленного университетом Гамбурга.

По результатам статистического анализа массива данных за 1979–2017 гг. выявлены основные тенденции изменений ледовой обстановки в течение этого периода. Показано, что в Европейском и Западно-Сибирском секторах Российской Арктики ледовый покров уменьшался, а условия судоходства на расположенных там трассах Севморпути улучшались. Такую же динамику следует ожидать и в ближайшие десятилетия. В Восточно-Сибирском и Чукотском секторах происходили аналогичные изменения до 2007 г., затем проявился противоположный тренд. Прогнозируется, что в ближайшие годы заметного улучшения ледовой обстановки в Восточно-Сибирском и Чукотском морях в летние месяцы ожидать не следует. Судоходство в регионе останется крайне зависимым от доступности ледокольных услуг. Показано, что в ближайшие два десятилетия перспективы открытия трансполярных трасс остаются иллюзорными, а Севморпуть сохранит свою роль основной транспортной магистрали в Арктике.

Ключевые слова: Северный морской путь, Арктика, ледовая обстановка, климатические изменения, безопасность судоходства, тренд, полынья, ледовитость

Для цитирования:

Холопцев А. В. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX – начале XXI века / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

Введение (Introduction)

Развитие устойчивого судоходства в Российской Арктике является одним из приоритетов транспортной стратегии Российской Федерации [1]. На побережьях и шельфе арктических морей в настоящее время активно осваиваются новые месторождения, в том числе нефтегазоносные районы Ямала и Гыдана, угольный бассейн Таймыра и ряд других, обслуживание которых требует развития арктического флота. Вместе с тем суровый климат и ледовитость накладывают серьезные ограничения на работу морского транспорта в замерзающих арктических морях. На сегодняшний день лишь небольшое количество судов с высоким классом ледовых усилений способно выполнять круглогодичную навигацию на акватории Северного морского пути (СМП). При этом зимне-весенняя навигация осуществляется, как правило, только в западной части СМП (Баренцево и Карское моря). Восточная часть СМП со второй половины января по май остается практически недоступной для любых типов судов [2].

Современные представления о глобальных климатических изменениях, вызванных прежде всего парниковым эффектом, позволяют в целом прогнозировать сокращение ледового покрова Арктики в ближайшие десятилетия. Этой теме уделяется пристальное внимание со стороны ведущих ученых в области арктической климатологии и морской логистики. Так, в работах [3], [4] даны долгосрочные прогнозные оценки доступности судоходных путей в Арктике в XXI в. Отмечается, что при сохранении нынешних темпов таяния арктических льдов к середине текущего столетия для массового судоходства будут открыты высокоширотные, в том числе трансполярные арктические маршруты. В работе [5], на основе данных реанализа ERA-Interim и современных математических моделей, прогнозируются значения средней толщины льда и ледовитости акваторий СМП до 2040 г. Авторы отмечают явную тенденцию к их снижению,

однако указывают на большую неопределенность подобных оценок, в силу чего невозможно делать однозначные выводы о доступности для судоходства тех или иных арктических акваторий. В этой же работе, а также в работах [6]–[8] отмечается высокая вероятность сохранения тяжелых ледовых условий в традиционно сложных для навигации районах Новосибирских островов и пролива Вилькицкого. В работе [9] исследуется возможность краткосрочных сезонных прогнозов ледовых условий на СМП. Отмечается принципиальная реализуемость таких прогнозов, однако указывается на необходимость дальнейшего совершенствования используемых прогнозных моделей.

Значительное количество публикаций посвящено растущему потенциалу СМП в целях торгового судоходства между Европой и Азией [10]–[14]. В свете сокращающегося ледового покрова Арктики авторы исследуют выгоды использования СМП для различных типов грузоперевозок, в том числе СПГ, танкерных и контейнерных. Большинство исследователей приходят к выводам о том, что маршрут по СМП выгоден при его безледокольном прохождении, что в настоящий момент возможно лишь при наличии у судна ледового класса и только в ограниченный период года — как правило, с июля по ноябрь.

Существуют также противоположные точки зрения на перспективы развития ледовой обстановки в Арктике. Так, в работе [15] отмечается наблюдающаяся в настоящее время тенденция к снижению величины солнечной постоянной и, как следствие, уменьшению поступления на Землю солнечного тепла. По мнению автора этой работы, начало фазы глубокого похолодания ожидается примерно в 2060 г. \pm 11 лет, что, в свою очередь, приведет к существенному ухудшению ледовых условий в Арктике вплоть до полной остановки любых работ по освоению арктического шельфа.

Как показывает обзор научной литературы, точные прогнозы состояния судоходных трасс в Арктике в середине – конце XXI в. затруднены из-за сложности комплексного учета ряда климатических, географических и гидрологических и иных факторов. Очевидно, что экстраполяция современных темпов изменения ледового покрова и температурного режима в Арктике до конца XXI в., даже при использовании самых современных математических моделей, не может обеспечить надежное долгосрочное прогнозирование в силу изменчивости указанных факторов. Тем не менее для среднесрочных прогнозов такой подход вполне эффективен.

Среди наиболее существенных факторов, определяющих состояние ледового покрова Российской Арктики, следует выделить водообмен Арктики с Северной Атлантикой, который осуществляется посредством океанических течений и, в первую очередь, теплого Норвежского. Дальнейшее повышение температур поверхностных вод Атлантики, по которым проходит это течение, способно значительно ускорить процесс таяния льдов в Западном секторе Российской Арктики. Еще одним значимым фактором сокращения ледового покрова является образование полыней в устьевых областях сибирских рек, которые активно поглощают солнечную радиацию (особенно в условиях полярного дня) и нагреваясь, способствуют интенсивному разрушению там дрейфующего льда. Обратный эффект может иметь место при подтверждении гипотезы [15] о влиянии солнечной постоянной на похолодание и наступление в середине XXI в. так называемого «малого ледникового периода».

Целью настоящей работы является анализ изменений ледового покрова Российской Арктики, имевших место в конце XX – начале XXI в., и выявление основных тенденций изменения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия, принимая во внимание влияние наиболее существенных факторов.

Для достижения указанной цели рассмотрены следующие задачи:

1-я задача — формирование временных рядов для основных параметров, характеризующих ледовую обстановку в изучаемом секторе Арктики в теплые месяцы года (апрель – сентябрь): средней толщины льда, ледовитости, суммарной площади полыней;

2-я задача — выявление и анализ тенденций в межгодовой изменчивости указанных параметров;

3-я задача — оценка перспектив улучшения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование выполнено для акватории Арктики, ограниченной нулевым меридианом с востока и 160° з.д. с запада и полностью включающей трассы СМП, а также Норвежское и Баренцево моря и приполярные регионы Северного Ледовитого океана. С учетом обширности указанной акватории она была условно разбита на четыре сектора, имеющих свои географические и климатические особенности:

1. Европейский сектор (0–60° в. д.), включающий акватории Норвежского и Баренцева морей с прилегающими к ним частями Северного Ледовитого океана. Этот сектор характерен тем, что непосредственно в него поступают теплые воды Атлантики, доставляемые Норвежским и другими поверхностными течениями, вследствие чего ледовые условия здесь наиболее благоприятны для судоходства в любые месяцы [16].

2. Западно-Сибирский сектор (60°–140° в. д.), включающий акватории Карского моря и моря Лаптевых. В зимние и весенние месяцы эти моря покрыты льдами, однако в летние месяцы их ледовый покров постепенно разрушается. Существенную роль в этом играют теплые воды Великих Сибирских рек: Енисея и Оби, впадающих в Карское море, а также рек Лены, Хатанги, Анабара, Яны и Оленёк, впадающих в море Лаптевых. В период половодья в устьевые области этих рек доставляются значительные объемы теплых пресных вод, что приводит к разрушению ледового покрова и образованию разводий. Так как на это же время приходится период полярного дня, поглощение свободными ото льда водами солнечной радиации вызывает быстрое повышение их температуры и рост площадей образующихся полыней. Кроме того, их росту способствует также разрушение ледовых полей, которое активизируется в периоды прохождения циклонов. С июля по октябрь в секторе осуществляется активная навигация, в том числе безледокольная.

3. Восточно-Сибирский сектор (140°–180° в. д.), включающий всю акваторию Восточно-Сибирского моря. Данному сектору свойственны более сложные ледовые условия, поскольку количество крупных впадающих рек существенно меньше (Индибирка и Колыма). В этой связи на участках СМП, расположенных к востоку от Новосибирских островов, даже в августе – сентябре весьма часто встречаются сплоченные, в том числе многолетние льды, а навигация выполняется, как правило, под проводкой ледокола [6], [8].

4. Чукотский сектор (180°–160° з. д.), включающий акватории западной части Чукотского моря. В Чукотский сектор крупные реки не впадают, а в разрушении льдов принимают участие прорывающиеся сюда Тихоокеанские циклоны. Несмотря на то, что прибрежные районы в данном секторе расположены южнее, чем в остальных секторах, его акватории также характеризуются усложненными ледовыми условиями в любые месяцы. Наиболее благоприятные условия навигации здесь характерны для августа и сентября [16].

Из числа имеющихся характеристик состояния ледового покрова Арктики, оказывающих существенное влияние на работу водного транспорта, для исследования выбраны распределения среднемесячных значений толщины дрейфующих льдов (ТЛ), ледовитости (Л), а также суммарных площадей полыней (СПП), находящихся в том или ином секторе.

В процессе решения поставленных задач в качестве фактического материала использована информация об изменениях ТЛ и Л в изучаемом регионе Арктики за период 1979–2017 гг., полученная на основе глобального реанализа ICDC (Integrated Climate Data Center)¹, который поддерживается Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета. Указанный реанализ содержит ежемесячные оценки ТЛ и Л всех участков акватории Мирового океана с дискретностью 13 × 13 км. Данная информация позволила получить распределения ТЛ и Л и определить значения СПП для любых интересующих секторов изучаемой акватории для любого месяца. Исследование зависимостей указанных показателей от времени позволило выявить тенденции их изменений и на этой основе оценить перспективы изменения условий судоходства на СМП в ближайшие десятилетия.

¹ Integrated Climate Data Center. Ocean. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/> (дата обращения: 01.010.2019).

Адекватность реанализа ICDC для арктических акваторий была ранее проверена авторами в работах [6], [7] путем сличения с данными реальных наблюдений, доступными через портал ЕСИМО¹. По полученным из реанализа значениям ТЛ и Л для всех изучаемых участков акватории Арктики для каждого месяца с апреля по сентябрь 1979–2017 гг. были сформированы временные ряды. Суммарная площадь полыней, относящихся к определенному сектору и месяцу, вычислялась следующим образом:

$$\text{СПП} = S - PG,$$

где S — суммарная площадь акваторий Арктики, относящихся к рассматриваемому сектору;

P — площадь одного квадрата координатной сетки реанализа $13 \cdot 13 = 169 \text{ км}^2$;

G — суммарное значение ледовитости во всех узлах координатной сетки, относящихся к рассматриваемому сектору.

В качестве количественной меры тенденции межгодовых изменений того или иного показателя было использовано значение углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда, вычисленное за отрезок времени длиной 39 лет методом наименьших квадратов.

При оценке статистической значимости трендов каждого временного ряда учитывалось, что отношение величины углового коэффициента этого ряда к стандартной ошибке его определения (t -статистика) характеризует среднее отношение «сигнал – шум». Отношение среднего квадрата значений (F), описываемых регрессией, к среднему квадрату остатков (отклонений от линии регрессии) также характеризует отношение «сигнал – шум», но уже в терминах однофакторного дисперсионного анализа [17].

F -статистика подчиняется распределению Фишера (при том же числе степеней свободы) [18]. Коэффициент детерминации R^2 характеризует долю дисперсии, с учетом аппроксимирующей зависимости, в суммарной дисперсии ряда. Исходя из этого, значимость оценки углового коэффициента тренда определялась с использованием соответствующих распределений вероятности t и F (иными словами, оценивалась вероятность подтверждения «нулевой гипотезы» P_0 о том, что линейный тренд значимым не является) [19].

В данной работе в качестве значимых рассматривались оценки, при которых $P_0 \leq 0,05$, т. е. гипотеза о наличии значимого тренда была адекватна с вероятностью $\geq 95 \%$.

Выявленные тренды во всех сопоставляемых отрезках изучаемых временных рядов были скомпенсированы, после чего для оценки значимости статистических связей между ними был применен корреляционный анализ и критерий Стьюдента [17].

Результаты (Results)

В соответствии с ранее изложенной методикой для каждого сектора и каждого месяца с апреля по сентябрь вычислены зависимости СПП от времени. В качестве примера на рис. 1 представлены такие зависимости для июля, августа и сентября. Из рис. 1, a и b видно, что в Европейском и Западно-Сибирском секторе изменения площади акваторий, свободных от льда в июле–сентябре, в 1979–2017 гг. представляли собой осцилляции с периодом, близким к трем–четырем годам, в которых присутствовали значимые возрастающие тренды. Характер этих изменений в целом соответствует существующим представлениям об ожидаемых последствиях глобального потепления климата, приводящего к ускорению таяния арктических льдов.

Следует отметить, что на отрезке времени 2007–2017 гг. значимая тенденция к увеличению СПП выявлена лишь в июле. Последнее, по-видимому, объясняется тем, что к августу и сентябрю в Европейском секторе уже практически не остается дрейфующих льдов, образовавшихся там в течение холодного времени года. За период полярного дня они успевают растаять. Встречающиеся в высокоширотных районах этого сектора дрейфующие льды попадают туда, как правило, из более

¹ Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.oceaninfo.ru/> (дата обращения: 01.10.2019).

восточных секторов благодаря Трансарктическому течению. Следовательно, межгодовые изменения СПП в Европейском секторе в ближайшие годы будут определяться состоянием ледового покрова в более восточных секторах.

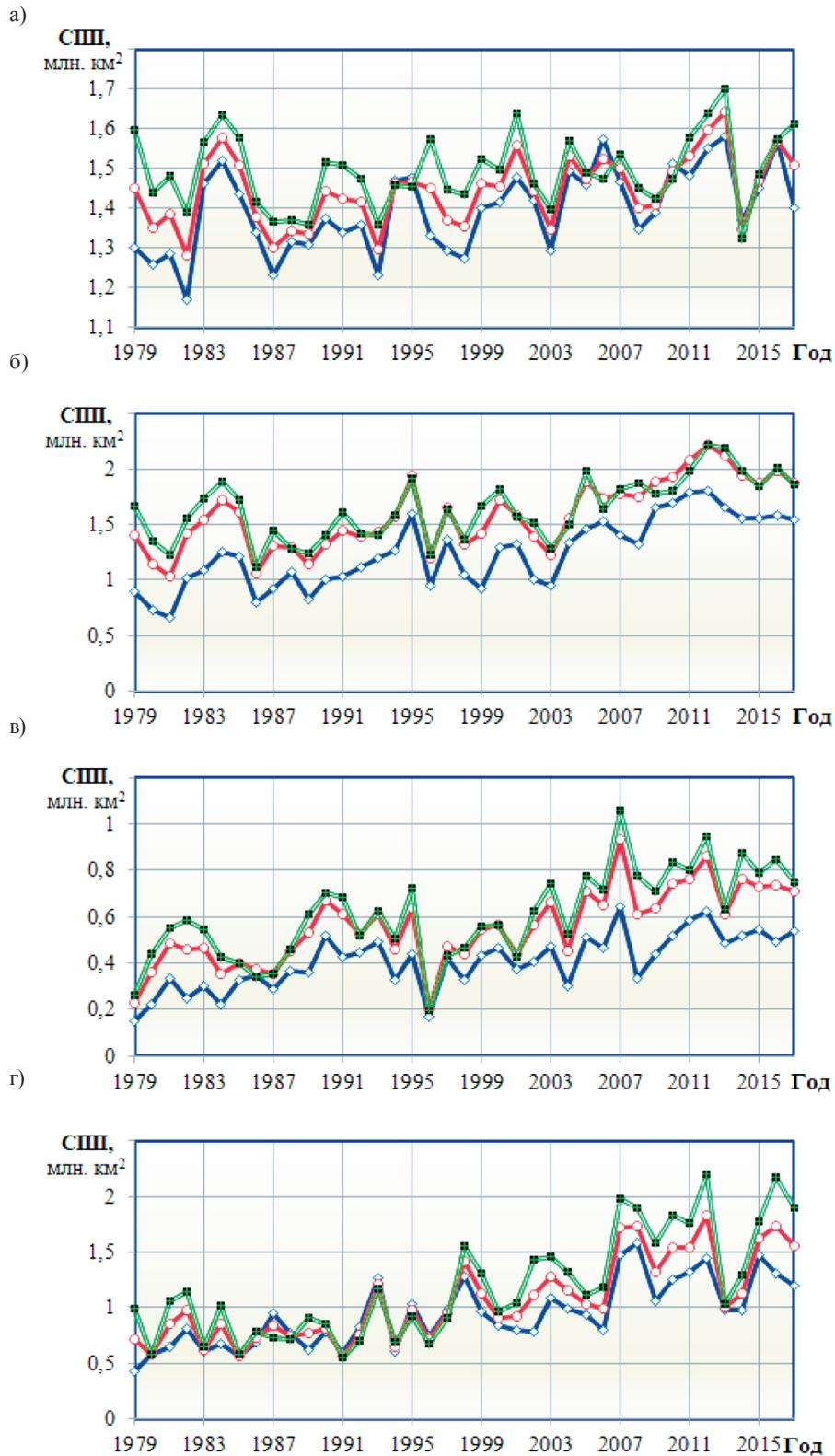


Рис. 1. Зависимости суммарных площадей полыней от времени по секторам: а — Европейский; б — Западно-Сибирский; в — Восточно-Сибирский; г — Чукотский
Условные обозначения:

— июль; — август; — сентябрь

В изменениях СПП, происходивших в Западно-Сибирском секторе с апреля по сентябрь в 2007–2017 гг., выявлены значимые возрастающие тренды, что, по-видимому, объясняется гораздо меньшими размерами полыней, образующихся в Карском море и море Лаптевых в период половодья на впадающих в них реках. Как следствие, к августу и сентябрю в указанных морях остается довольно много нерастаявшего за полярный день дрейфующего льда местного происхождения. Интенсивность его таяния тем выше, чем теплее вода в полынье. Размеры полыньи, в свою очередь, определяются температурой и объемом пресных вод, поступающих в море во время половодья. Следовательно, при дальнейшем потеплении климата в бассейнах сибирских рек, тенденции к росту СПП в теплый период года в данном секторе, вероятнее всего, сохранятся.

На рис. 1, в показано, что в Восточно-Сибирском секторе изменения СПП также носили осциллирующий характер, но содержали возрастающие тренды лишь в период до 2007 г. В последующий период присутствующие в них тренды для сентября и августа являются убывающими, а для июля не являются значимыми. Из рис. 1, г следует, что и в Чукотском секторе на отрезке времени 2007–2017 гг. в изменениях СПП значимых возрастающих трендов не выявлено. Значения угловых коэффициентов линейных трендов рассмотренных временных рядов СПП приведены в таблице.

Значения угловых коэффициентов линейных трендов, присутствующих в отрезках рассматриваемых временных рядов СПП в течение 1979–2006 и 2007–2017 гг.

Значения угловых коэффициентов линейных трендов, тыс. км ² /год						
Отрезок времени	1979–2006 гг.			2007–2017 гг.		
Сектор / месяц	Июль	Август	Сентябрь	Июль	Август	Сентябрь
Европейский	5,5	2,9	0,1	5,1	6,6	8,1
Западно-Сибирский	16,7	12,1	5,3	9,4	12,9	14,1
Восточно-Сибирский	7,2	8,2	7,7	2,7	-4,1	-10,2
Чукотский	14,9	16,9	18,9	-19,6	-12	-4,3

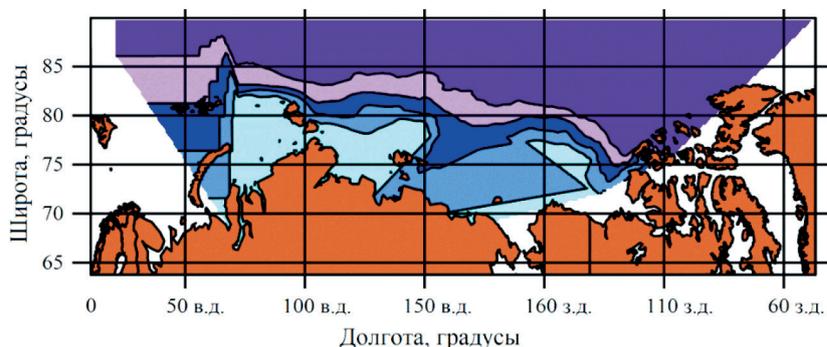
Примечание. Жирным шрифтом выделены показатели, признанные статистически значимыми

Как видно из рис. 1 и табличных данных, в Европейском и Западно-Сибирском секторах в течение последнего десятилетия ледовые условия в теплые месяцы являлись более благоприятными для судоходства, однако в Восточно-сибирском и Чукотском секторах они усложнились. Данный факт подтверждается и результатами анализа распределений ТЛ и Л, существовавших в Арктике в теплые месяцы периода 1979–2017 гг. В качестве примера на рис. 2 представлены построенные по данным реанализа ICDC с использованием [17] распределения средних и максимальных значений ледовитости в сентябре за период 2007–2017 гг.

Из рис. 2, а видно, что наименьшие значения ледовитости в пределах акватории Российской Арктики в сентябре соответствуют Европейскому сектору. Дрейфующие льды полностью отсутствовали в Норвежском море и лишь эпизодически встречались в Баренцевом. Сплоченные льды наблюдались только севернее 82-й параллели.

Благоприятствующие судоходству ледовые условия в сентябре существовали также в Западно-Сибирском секторе, где северная граница части его акватории со средними значениями Л > 0,2 в Карском море располагалась за параллелью 82°с. ш., а в море Лаптевых — за параллелью 78°с. ш. Наиболее сложные условия для работы судов встречались в Восточно-Сибирском секторе, где средние значения ледовитости превышали 0,2 на любых участках его акватории. К востоку от пролива Лонга (в Чукотском секторе) средние значения этого показателя в сентябре не превосходили уровень 0,2.

а)



б)

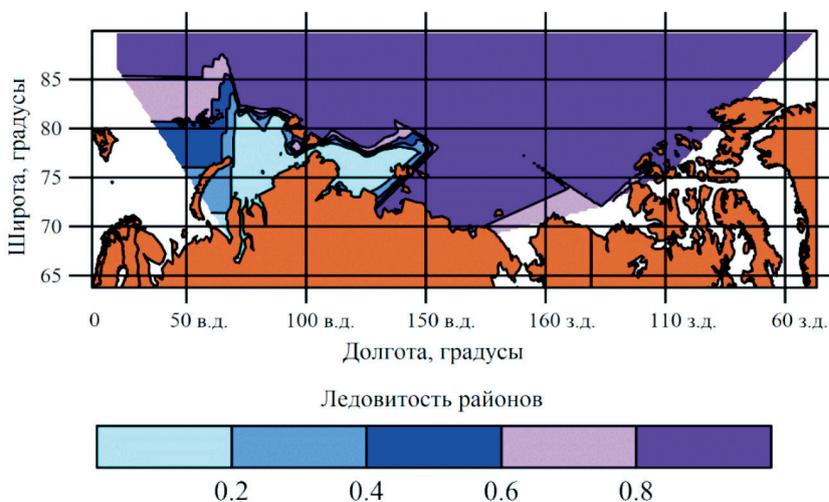


Рис. 2. Распределение ледовитости в сентябре в период 2007–2017 гг.:
а — средние значения; б — максимальные значения

Рис. 2, б показывает, что в Европейском, Западно-Сибирском и Чукотском секторах особенности распределения максимальных сентябрьских значений ледовитости в 2007–2017 гг. были в целом аналогичны распределениям их средних значений. При этом в Восточно-Сибирском секторе максимальные значения L на любых участках акватории Восточно-Сибирского моря превышали уровень 0,8. Столь же высокая ледовитость в данном периоде отмечалась и в канадской части акватории Арктики, которая является основным поставщиком дрейфующих льдов, переносимых Трансарктическим течением в высокоширотные районы Российской Арктики. На рис. 3 представлены распределения средних и максимальных значений толщины льда в сентябре, вычисленных за 2007–2017 гг. по данным реанализа ICDC.

Из рис. 3, а следует, что распределения средних значений ТЛ в 2007–2017 гг. были, в значительной мере, подобны распределениям ледовитости. В Европейском секторе льды, значения ТЛ которых превышали 0,8 м, в сентябре встречались лишь в его северо-восточной части (начиная от побережья района архипелага Франца-Иосифа). На всей акватории Норвежского и большей части Баренцева морей каких-либо льдов не наблюдалось. В районах сектора, расположенных к северу от параллели 85°с.ш., средняя толщина встречающихся льдов превосходила 1,2 м. За той же параллелью аналогичные льды присутствовали и в Западно-Сибирском секторе. На всех участках прибрежных трасс СМП, проходящих в этом секторе, и практически всех участках акваторий Карского моря (кроме Новоземельского ледового массива) и в море Лаптевых дрейфующих льдов со средними значениями ТЛ > 0,4 м не было. На всей акватории Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море к северу от параллели 70° с. ш. средние значения ТЛ превышали 0,4 м.

В районах, расположенных севернее 75° с. ш., средние значения ТЛ превышали 0,8 м, а севернее 80° с. ш. — 1,2 м. Льды с наибольшими средними значениями ТЛ (более 2 м) встречались в районах Арктики, расположенных у островов Канадского архипелага.

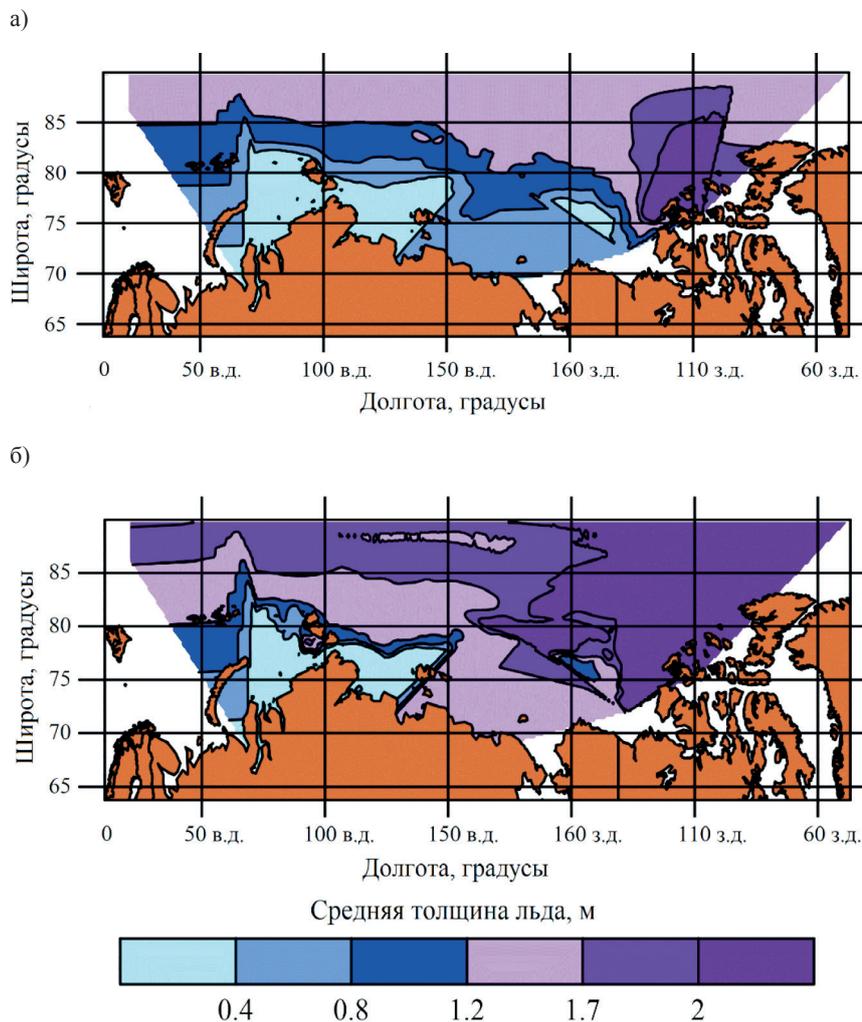


Рис. 3. Распределение толщины льда в сентябре в период 2007–2017 гг.:
 а — средние значения; б — максимальные значения

Как видно из рис. 3, б, распределение максимальных значений ТЛ в изучаемом регионе Арктики было практически таким же, но южные границы областей распространения льдов с теми же показателями располагались южнее. На всех участках маршрутов СМП, относящихся к Европейскому и Западно-Сибирскому секторам, максимальные значения ТЛ не превышали 0,8 м, что, в принципе, позволяло судам ледового класса Arc4 и выше осуществлять здесь самостоятельную навигацию. Непосредственно к востоку от Новосибирских островов максимальные значения ТЛ встречающихся здесь льдов всюду превосходили 1,2 м. Вследствие этого навигация для судов классов Arc4 и ниже была возможна, как правило, лишь в сопровождении ледокола. К северу от параллели 75° с. ш. в Чукотском море и восточнее от него встречались льды с максимальными значениями ТЛ более 2 м (наибольшие значения этого показателя в 2008–2017 гг. составляли 5,42 м), преодолеть которые не всегда удавалось даже самым мощным ледоколам.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее реалистичным сценарием развития ситуации в Арктике в условиях значительной неопределенности допустимо рассматривать такой, при котором тенденции изменений ледовых

условий, выявленные в 2007–2017 гг., сохранятся в следующем десятилетии. Адекватность такого допущения подтверждают и результаты анализа факторов, которые в современном периоде породили изменчивость характеристик дрейфующих льдов.

Как отмечалось ранее, в летние месяцы приходную часть ледового баланса любого из рассмотренных секторов Арктики образует миграция дрейфующего льда с водами Трансарктического течения. Основными компонентами его расходной части являются процессы таяния льда, а также вынос его остатков течениями в Гренландское море и далее — в Северную Атлантику.

Как известно из физики моря [20], чем меньше ледовитость некоторой акватории, тем, при прочих равных условиях, меньше ее альbedo и больше коэффициент поглощения солнечной радиации. Поглощение солнечной радиации происходит преимущественно в приповерхностном слое вод и приводит к повышению их температуры. Следовательно, к основным процессам образования тепла, расходуемого при таянии дрейфующих льдов, относится поглощение солнечной радиации участками арктических акваторий с малой ледовитостью. Чем больше на некотором участке водной поверхности образуется тепла, тем интенсивнее на нем происходит таяние дрейфующего льда и быстрее увеличивается СПП. В условиях, когда температуры поверхностных вод положительны, разрушение ледовых полей циклонами также способствует росту СПП. При их разрушении не только увеличивается площадь поверхности, на которой происходит теплообмен льда с окружающими его более теплыми водами, но и повышается коэффициент поглощения солнечной радиации соответствующим участком акватории.

Указанные условия существуют в течение полярного дня в любых районах Арктики, где располагаются обширные польны. В другие сезоны в океанических районах с повышенной ледовитостью температуры поверхностных вод близки к точке замерзания. Поэтому увеличение площади поверхности, на которой происходит теплообмен льда с водной средой, не приводит к повышению интенсивности его таяния. Если при этом в таких районах температуры воздуха отрицательны, то разрушенные льды будут, наоборот, смерзаться, увеличиваясь в объеме. В таких условиях разрушение ледовых полей циклонами приведет не к снижению ледовитости, а наоборот — к ее увеличению.

В Европейском секторе тепло, которое летом вызывает таяние дрейфующих льдов, образуется не только в результате поглощения солнечной радиации, но и доставляется приходящими из Атлантики теплыми течениями. В 2007–2017 гг. к началу августа таяние приводило к ликвидации в данном регионе Арктики практически всего льда, формировавшегося в течение холодного периода года. Встречающиеся в высоких широтах этого сектора дрейфующие льды были в основном «неместного» происхождения. Таким образом, можно предположить, что при осуществлении в следующем десятилетии рассматриваемого «сценария», возникновение в Европейском секторе значимых трендов в изменениях СПП, ТЛ и Л в августе и сентябре маловероятно. В июле СПП будет и далее возрастать, а ТЛ и Л будут снижаться.

В Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском секторах в течение холодного периода года 2007–2017 гг. дрейфующих льдов образовывалось значительно больше, а теплой воды, участвующей в первоначальном образовании в них разводий, даже в периоды половодий на сибирских реках поступало значительно меньше. Тем не менее разрушение ледового покрова здесь начиналось именно в морских устьях рек в периоды половодья. Поскольку общее количество тепла, которое доставлялось в периоды половодья в моря Лаптевых и Карское реками Енисей, Обь, Лена, Хатанга, Анабар Яна и Оленёк, было гораздо больше, чем в Восточно-Сибирское море реками Индигирка и Колыма, скорость увеличения СПП в летние месяцы в Западно-Сибирском секторе была значительно выше, чем в Восточно-Сибирском. Этому способствовал также более частый приход циклонов в Восточно-Сибирский сектор.

В Чукотском секторе разводья возникали под влиянием тепла, которое приносили в Чукотское море относительно теплые и соленые воды Берингова моря. Поэтому здесь процесс разрушения ледового покрова начинался непосредственно у выхода из Берингова пролива. В Чукотский сектор циклоны в 2008–2017 гг. приходили чаще, чем в Восточно-Сибирский, но расходы

Берингоморского течения невелики, а доставляемые им воды являются солеными. Вследствие этого приносимая этим течением в Чукотское море вода, сравнительно быстро охлаждаясь, исчезала из поверхностного слоя, а средние температуры на преобладающей части акватории рассматриваемого сектора оставались близкими к точке замерзания. В результате этого воздействие на его ледовый покров циклонов приводило к иным последствиям, а именно полынья в Чукотском море летом появлялась и росла в области влияния Берингоморского течения быстрее, чем в Восточно-Сибирском море, но значительно медленнее, чем в Карском море и море Лаптевых. Поскольку данные особенности процессов разрушения ледового покрова Арктики в теплые месяцы следующего десятилетия существенно измениться не могут, представляется вероятным, что выявленные тенденции динамики СПП, ТЛ и Л в рассмотренных арктических акваториях сохранятся.

Установленный факт уменьшения СПП в Восточно-Сибирском и Чукотском секторах в 2007–2017 гг. не согласуется с общей теорией ускорения темпа таяния арктических льдов из-за глобального потепления и требует дополнительного изучения. Возможным объяснением может быть ослабление солнечной активности, прогнозируемое в работе [15], которое и далее может, в определенной степени, компенсировать парниковое потепление и сохранять ледовые условия в этой части Арктики тяжелыми.

Из выполненного анализа следует, что при осуществлении рассматриваемого сценария будущего ледовые условия в Западно-Сибирском секторе в следующем десятилетии станут более благоприятными для судоходства, а периоды безледокольной навигации будут постепенно увеличиваться. В Восточно-Сибирском и Чукотском секторах, улучшений ледовых условий, наоборот, не ожидается и даже в летнюю навигацию, как и ранее, будет необходима помощь ледоколов.

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В результате исследования установлено, что в Европейском и Западно-Сибирском секторах Российской Арктики в доступный для статистического анализа период 1979–2017 гг. происходили явные изменения состояния ледового покрова в сторону его уменьшения. Это способствовало развитию судоходства на трассах Северного морского пути и увеличению периодов летне-осенней безледокольной навигации.

2. В Восточно-сибирском и Чукотском секторах в период 1979–2007 гг. происходили аналогичные процессы, однако далее стали проявляться обратные тенденции: увеличение ледовитости и толщины льда, уменьшение суммарной площади полыней. Условия для судоходства в этих секторах в последнем десятилетии не улучшались, а безопасность навигации, как и ранее, зависела от своевременного предоставления ледокольной проводки даже в летние месяцы.

3. При осуществлении в ближайших десятилетиях сценария будущего, при котором современные тенденции изменчивости ледового покрова Российской Арктики сохранятся, в ее Европейском и Западно-Сибирском секторах (прежде всего в Карском море и море Лаптевых) будут постепенно увеличиваться периоды безледокольной навигации. В Восточно-Сибирском и Чукотском морях улучшение ледовых условий не ожидается. В этих акваториях даже в теплые месяцы для развития устойчивого судоходства потребуются услуги ледоколов. В этой связи стратегия Российской Федерации, направленная на модернизацию и расширение ледокольного флота, выглядит целиком оправданной.

4. Выявленные особенности изменений состояния ледового покрова Восточно-Сибирского и Чукотского секторов Арктики позволяют с высокой степенью уверенности утверждать, что начало движения по транзитному трансарктическому высокоширотному маршруту в ближайшие два десятилетия не произойдет и главной арктической транспортной магистралью будет оставаться Северный морской путь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олерский В. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия – XXI век. — 2015. — № 29. — С. 8–9.
2. Ольховик Е. О. Исследование изменения структуры транспортного флота в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-51802018-10-6-1225-1233.
3. Aksenov Y. On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // Marine Policy. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
4. Smith L. C. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury / L. C. Smith, S. R. Stephenson // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2013. — Vol. 110. — Is. 13. — Pp. E1191–E1195. DOI: 10.1073/pnas.1214212110.
5. Gascard J.-C. Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping / J.-C. Gascard, K. Riemann-Campe, R. Gerdes, H. Schyberg, R. Randriamampianina, M. Karcher, J. Zhang, M. Rafizadeh // Ambio. — 2017. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 355–367. DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.
6. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
7. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
8. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
9. Melia N. Towards seasonal Arctic shipping route predictions / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins, J. J. Day // Environment Research Letters. — 2017. — Vol. 12. — Is. 8. — Pp. 084005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7a60.
10. Milaković A.-S. Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route / A.-S. Milaković, B. Gunnarsson, S. Balmasov, S. Hong, K. Kim, P. Schütz, S. Ehlers // Marine Policy. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.04.027.
11. Schach M. Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics / M. Schach, R. Madlener // Energy Policy. — 2018. — Vol. 122. — Pp. 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.
12. Faury O. The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers / O. Faury, P. Cariour // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2016. — Vol. 94. — Pp. 461–469. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.026.
13. Lee S. W. Economic Possibilities of Shipping through Northern Sea Route / S. W. Lee, J. M. Song // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2014. — Vol. 30. — Num. 3. — Pp. 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.
14. Beveridge L. Interest of Asian Shipping Companies in Navigating the Arctic / L. Beveridge, M. Fournier, F. Lasserre, L. Huang, and P.L. Têtu // Polar Science. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.
15. Абдусаматов Х.И. Лунная обсерватория для исследования климата Земли в эпоху глубокого похолодания / Х.И. Абдусаматов. — СПб.: Наука, 2017. — 128 с.
16. Pub. 183 Sailing directions (Enroute). North Coast of Russia. — Springfield, Virginia: NGA, 2017. — 191 p.
17. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.

18. *Закс Ш.* Теория статистических выводов / Ш. Закс. Пер. с англ. Е. В. Чепурина; под ред. Ю.К. Беляева. — М.: Мир, 1985. — 776 с.
19. *Крамер Г.* Математические методы статистики / Г. Крамер. — М. Мир, 1975. — 648 с.
20. *Шулейкин В.В.* Физика моря / В.В. Шулейкин. — М.: Ленанд, 2019. — 1096 с.

REFERENCES

- Olerskii, V. “Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti.” *Transportnaya strategiya – XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.
- Ol'khovik, Evgeniy O. “Research of changes in the transport fleet structure in the water area of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.
- Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. “On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice.” *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
- Smith, Laurence C., and Scott R. Stephenson. “New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110.13 (2013): 1191–1195. DOI: 10.1073/pnas.1214212110
- Gascard, Jean-Claude, Kathrin Riemann-Campe, Rüdiger Gerdes, Harald Schyberg, Roger Randriamampianina, Michael Karcher, Jinlun Zhang and Mehrad Rafizadeh. “Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: Implications for Arctic shipping.” *Ambio* 46.3 (2017): 355–367. DOI: 10.1007/s13280-017-0951-5.
- Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
- Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new siberian islands during the winter period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
- Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. “The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
- Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. “Towards seasonal Arctic shipping route predictions.” *Environment Research Letters* 12.8 (2017): 084005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7a60.
- Milakovic, Aleksandar-Sasa, Björn Gunnarsson, Sergey Balmasov, Sungwon Hong, Kitae Kim, Peter Schütz, and Sören Ehlers. “Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route.” *Marine Policy* 94 (2018): 53–60. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.04.027.
- Schach, Michael, and Reinhard Madlener. “Impacts of an ice-free Northeast Passage on LNG markets and geopolitics.” *Energy Policy* 122 (2018): 438–448. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.
- Faury, Olivier, and Pierre Cariou. “The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94 (2016): 461–469. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.026.
- Lee, Sung-Woo, and Ju-Mi Song. “Economic possibilities of shipping though Northern Sea route.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30.3 (2014): 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.
- Beveridge, Leah, Mélanie Fournier, Frédéric Lasserre, Linyan Huang, and Pierre-Louis Têtu. “Interest of Asian Shipping Companies in Navigating the Arctic.” *Polar Science* 10.3 (2016): 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.
- Abdusamatov, Kh. I. *Lunnaya observatoriya dlya issledovaniya klimata zemli v epohu glubokogo pohlodaniya*. SPb: Nauka, 2017.
- Pub. 183 Sailing directions (Enroute). North Coast of Russia*. Springfield, Virginia: NGA, 2017.
- Aivazyan, S.A., and V.S. Mhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.
- Zaks, Sh. *Teoriya statisticheskikh vyvodov*. Edited by Yu. K. Belyaev. M.: Mir, 1985.
- Kramer, G. *Matematicheskie metody statistiki*. M.: Mir, 1975.
- Shuleikin, V.V. *Fizika morya*. M.: Lenand, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул.
Университетская, 33
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State
Oceanographic Institute”
61 Sovetskya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol State University
33 Universitetskya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 8 января 2020 г.

Received: January 8, 2020.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95

A METHOD FOR CALCULATING THE RELIABILITY OF VESSELS HULLS AND THEIR ELEMENTS, TAKING INTO ACCOUNT THE PERFORMED REPAIRS AND CONDITIONS FOR FURTHER OPERATION

S. O. Baryshnikov, A. B. Krasiuk, V. B. Chistov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The ship hull reliability after a given number of years of operation is considered. The hull has defects that lead to sudden and gradual failures, which must be periodically restored during repair works. The Register Rules for both sea-going vessels and inland and mixed navigation vessels indicate the characteristics of wear rates for all ship hull groups and element thicknesses required during construction and allowed after repair. This allows you to calculate the probability of a failure of the housing element due to wear (sheet sheathing or beam set) after a given number of years of operation. The presence of other hull defects that do not change over the time can affect the allowable wear of the elements in the group of bonds, reducing its value, which leads to premature failure of the elements due to the wear. Imagining the failure probability as the proportion of elements in the hull group with the same allowable wear requiring repair, it is possible to set a number of these elements. Receiving the number of elements requiring repair in all subgroups, it is possible to calculate the number of elements requiring repair in the entire group of bonds of ship hull. This allows us to further resolve the issue of the best way to repair the hull. Hull repair is the restoration of its general and local strength to a predetermined level and for a specified period of time, ensuring the safety of navigation and the safety of the carried cargo. The repair scope and the housing reliability in subsequent years of operation depend on the repair method (replacement of defective elements or their reinforcement). Replacing the housing element with a new one restores its reliability, and reinforcing the housing element only slightly increases its reliability, since it allows to increase its allowable wear. A method for calculating the occurrence probability of housing elements failures at a given point in time taking into account the performed repairs is proposed in the paper. Comparing the projected costs of hull repairs, it is possible to choose the best repair method at a given point in time, taking into account the duration and conditions of further vessel operation (reinforcing elements, replacing individual elements, replacing sections of the hull with panels or sections). A nomogram to determine the hull reliability after a specified number of years of its operation, taking into account existing defects and repairs is proposed in the paper. Such a nomogram can be used to establish the optimal thickness of the hull elements during construction and renovation.

Keywords: hull element, hull defect, hull group, element failure, wear, wear rate, permanent deformations, fractures.

For citation:

Baryshnikov, Sergei O., Alla B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. "A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.

УДК 625.12:539.4

СПОСОБ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ КОРПУСОВ СУДОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ВЫПОЛНЕННЫХ РЕМОНТОВ И УСЛОВИЙ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается надежность корпуса судна после заданного числа лет эксплуатации. Корпус судна имеет дефекты, приводящие к внезапным и постепенным отказам, которые необходимо периодически

устранять во время ремонта. В Правилах Регистра, как для морских судов, так и для судов внутреннего и смешанного плавания, указаны характеристики скоростей изнашивания для всех групп связей корпуса и толщины элементов, требуемые при постройке и допускаемые после ремонта. Это позволяет рассчитывать вероятность появления отказа элемента корпуса из-за износа после заданного числа лет эксплуатации. Наличие других дефектов корпуса оказывает влияние на допустимый износ элементов в группе связей, уменьшая его значение, что приводит к преждевременному появлению отказа элементов из-за износа. Представив вероятность появления отказа как долю элементов в группе связей с одинаковым допустимым износом, можно установить количество данных элементов. Зная количество элементов, требующих ремонта во всех подгруппах, можно рассчитать количество элементов, требующих ремонта во всей группе связей. Это позволяет выбрать оптимальный способ ремонта корпуса, от чего зависит объем ремонта и надежность корпуса в последующие годы эксплуатации. Замена элемента корпуса на новый восстанавливает его надежность, а подкрепление лишь несколько повышает его надежность, так как позволяет увеличить допустимый износ. В работе предлагается способ расчета вероятностей появления отказов элементов корпуса в заданный момент времени с учетом выполненных ремонтов. Сравнив прогнозируемые затраты на ремонт корпуса, можно выбрать оптимальный способ ремонта, учитывая продолжительность и условия дальнейшей эксплуатации судна. Предлагается номограмма для определения надежности корпуса судна после заданного числа лет его эксплуатации, которая может быть использована для установления оптимальной толщины элементов корпуса при постройке и реновации.

Ключевые слова: элемент корпуса, дефект корпуса, группа связей, отказ элемента, износ, скорость изнашивания, остаточные деформации, разрушения.

Для цитирования:

Барышников С. О. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.

Введение (Introduction)

В 2016 г. выпущен ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения»¹, в соответствии с которым при рассмотрении надежности корпуса предлагается использовать следующие понятия и определения, приспособленные к сложному объекту — корпусу судна.

Надежность корпуса — свойство корпуса судна сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации при соблюдении периодичности освидетельствований и ремонтов. Эта способность связана с обеспечением общей и местной прочности корпуса судна и непроницаемости, при которых сохраняется безопасность плавания и сохранность перевозимого груза.

Корпус судна — сложный объект (система), состоящая из ряда подсистем — групп связей.

Под группой связей понимается группа одноименных элементов, находящихся в одинаковых условиях изнашивания. Перечень групп связей, с указанием характеристик скоростей изнашивания, представлен в Правилах Российского речного регистра (РРР) [1] — для судов внутреннего и смешанного плавания или в Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС) [2] для морских судов.

Элемент группы связей — лист обшивки или настила, балка набора (может дополнительно разделяться на стенку и полку). Характеризуется проектной t_{np} и допускаемой остаточной толщиной $[t_{ост}]$, устанавливаемыми Правилами РРР или РМРС.

Безотказность — свойство корпуса судна непрерывно сохранять требуемые функции в течение периода времени между освидетельствованиями в заданных условиях эксплуатации с учетом ремонта, выполненного по результатам дефектации перед ним.

Дефектация — процесс обнаружения, измерения и оценки дефектов корпуса с целью определения его технического состояния, установления способов и объемов ремонта.

Ремонт корпуса — комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению его работоспособного состояния для заданных условий эксплуатации и на заданный промежуток времени [3].

¹ ГОСТ 27002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.

На морском и речном флоте действует предупредительная система ремонта, когда устранению или компенсации подлежат дефекты, параметры которых превосходят допускаемые Правилами РРР или РМРС значения. Ранее действовавшая система планово-предупредительных ремонтов (ППР) предусматривала текущий, средний и капитальный ремонты, отличающиеся объемом, трудоемкостью и периодичностью их выполнения. Система ППР была удобна для судовладельца с большим количеством однотипных судов. Для судоходной компании с малым количеством судов разных типов разработка документации для системы ППР нецелесообразна, но предупредительная система осталась, так как сохраняется периодический надзор за судами и нормативы для параметров дефектов корпуса, установленные Правилами РМРС или РРР.

Для корпуса судна, с учетом ранее изложенного, принимаются следующие определения:

Отказ: дефект элемента, группы связей или всего корпуса, параметры которого (дефекта) превосходят допускаемые значения для заданных условий эксплуатации судна.

Дефект: каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией (проектом судна) или Правилами РРР (РМРС).

Классификация дефектов приведена в источнике [4] или в Правилах РРР (РМРС), в соответствии с которой все дефекты могут быть разделены на три группы: износ, остаточные деформации или разрушения.

Износ — постепенное уменьшение толщины связей, вызванное коррозией, эрозией или истиранием.

Остаточные деформации — внезапное изменение формы отдельных элементов или всего корпуса, вызванные чрезмерной нагрузкой.

Разрушения — это нарушение целостности на отдельных участках конструкции корпуса, вызванные истощением пластических свойств или усталостью материала.

Надежность оценивается вероятностью появления отказа в заданный промежуток времени.

При предупредительной системе ремонта отказом будем считать дефект, параметры которого превосходят допускаемые значения.

Допускаемые значения дефектов устанавливаются Правилами РРР или РМРС в зависимости от принадлежности судов к том или иному классификационному обществу. С учетом ранее изложенного, отказы могут быть разделены на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ — это отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние. В корпусе судна к этому виду отказа относятся остаточные деформации, параметры которых превосходят допускаемые значения и разрушения корпусных конструкций.

Постепенный отказ — это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. В корпусе судна к этому виду отказа относится износ, превосходящий допускаемое значение для элемента корпуса.

Правила РРР и РМРС устанавливают зависимости для определения проектной толщины элемента корпуса ($t_{пр}$) и минимальной остаточной толщины [$t_{ост}$]. Тогда допустимый износ [Δt]:

$$[\Delta t] = t_{пр} - [t_{ост}]. \quad (1)$$

Износ элемента корпуса зависит от продолжительности эксплуатации судна и скорости изнашивания указанного элемента (скорости утонения). Значение скоростей изнашивания позволяет спрогнозировать вероятность появления отказов и рассчитывать показатели надежности корпусов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Скорость изнашивания элемента корпуса (листа обшивки или настила, полки или стенки балки подкрепляющего набора), с точки зрения вероятности его возникновения, подчиняется нормальному закону распределения. В Правилах РРР / РМРС для каждой группы связей судов различного назначения приводятся средние (рекомендуемые для осуществления расчетов) скорости

изнашивания. Кроме того, в Правилах РРР имеются зависимости для определения среднеквадратического отклонения данной величины σ_c (стандарта скоростей изнашивания) по эмпирической формуле, предложенной Ю. И. Ефименковым¹ в последней редакции Правил РРР, при значении коэффициента вариации скоростей изнашивания (v), рассчитываемого по формуле

$$v = \frac{\sigma_c}{\bar{c}} = 0,51 - 1,06\bar{c}. \quad (2)$$

С учетом ранее изложенного, вероятность появления скорости изнашивания отдельного элемента в группе связей:

$$c_i = \bar{c}X\sigma_c, \quad (3)$$

где X — количество стандартов $-3 \leq X \leq 3$, определяемое законом нормального распределения (закон Гаусса) с параметрами

$$P(c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c-\bar{c})^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (4)$$

График изменения плотности вероятностей скоростей изнашивания представлен на рис. 1.

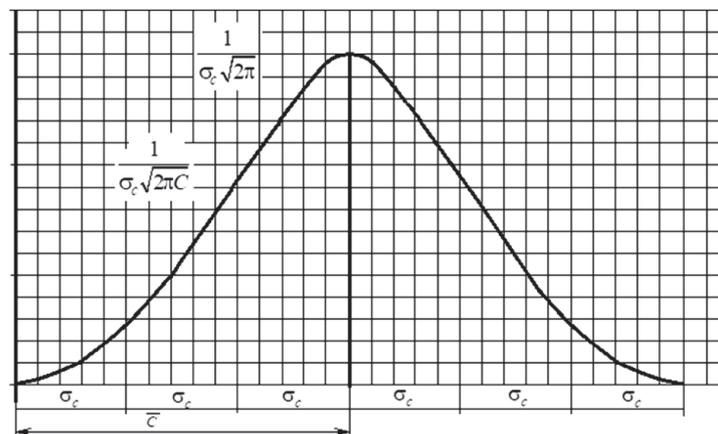


Рис. 1. Распределение скоростей изнашивания элементов корпуса в группе связей

Вероятность появления износа заданной величины у i -го элемента можно оценить интегралом вероятности по формуле

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t - \bar{\Delta t}}{\sigma_M} \right) \right), \quad (5)$$

где $\Delta t_i = c_i \tau_i$ — износ i -го элемента в группе связей;

τ_i — количество лет работы элемента в группе связей;

$\bar{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i c_i)}{n} = \tau_i \bar{c}_i$ — математическое ожидание износа элемента в данной группе связей;

$\sigma_{wi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i c_i - \tau_i \bar{c}_i)^2}{n-1}} = \tau \sqrt{\frac{(c_i - \bar{c})^2}{n-1}} = \tau \sigma_c$ — среднеквадратическое отклонение износа элемента

в группе связей.

¹ Анализ нормативов скоростей изнашивания связей и остаточных деформаций. Корректировка правил РРР: отчет по договору № ЦРП-04-33-09 / Рук. Ю. И. Ефименков. СПб., 2005. 85 с.

После преобразований зависимость (5) примет вид:

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t - \tau_i \bar{c}}{\tau \sigma_c} \right) \right) \quad (6)$$

или

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t}{\tau \sigma_c} - \frac{1}{v} \right) \right),$$

где $\Phi(\Delta t)$ — функция Лапласа или интеграл вероятности для аргумента $0-4,0$.

Значения функции Лапласа табулированы и содержатся в справочниках по математике. Краткая выписка из данной таблицы приводится в следующей таблице:

$$\text{Функция Лапласа } 2\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{\tau^2}{2}} dt$$

t	$2\Phi(t)$	t	$2\Phi(t)$	t	$2\Phi(t)$
0	0,00	1,0	0,6817	2,0	0,9545
0,5	0,3829	1,5	0,8664	2,5	0,9876
0,75	0,5468	1,65	0,9011	3,0	0,9973

С использованием значений функции Лапласа построены графики вероятности того, что износ элемента не превзойдет заданную величину после 10, 15, 20, 25 и 30 лет эксплуатации в группе связей со средней скоростью изнашивания $\bar{C} = 0,018$ мм/год при значении коэффициента вариации $v = 0,3$.

Если по оси абсцисс откладывать допустимый износ и принять за отказ элемента превышение его износом допустимого значения $\Delta t > [\Delta t]$, то с помощью графика на рис. 2 можно оценить вероятность появления отказа элемента после заданного числа лет его эксплуатации.

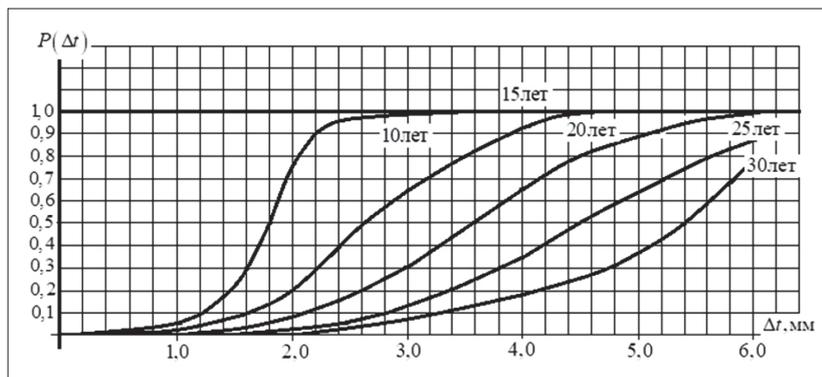


Рис. 2. Вероятность появления износа, не превышающего заданную величину Δt

В Правилах РРР [1], а также в источнике [5] даются значения минимальных остаточных толщин листов для судов в зависимости от класса, района плавания и длины судна с учетом их расположения, используемого материала и шпации. В этом случае допустимый износ составит

$$[\Delta t] = t_{\text{пр}} - t_{\text{мин}}^{\text{ост}},$$

где $t_{\text{пр}}$ — проектная толщина элемента (листа);

$t_{\text{мин}}^{\text{ост}}$ — минимальная допустимая остаточная толщина элемента (листа).

Аналогично, согласно Правилам РМРС [2], можно рассчитать допускаемую остаточную толщину листа в эксплуатации. Если на оси абсцисс отложить допустимое значение износа элемента в группе связей, то на оси ординат по графикам рис. 2 можно получить вероятность безотказной работы этого элемента после заданного числа лет его эксплуатации.

Группа связей, включающая n элементов, состоит из подгрупп, каждая из которых имеет n_i элемент с единым допускаемым износом и одинаковым сроком эксплуатации. Вероятность того, что в этой подгруппе не будет отказа элементов, определяется произведением вероятностей безотказной работы отдельных элементов:

$$P_j \Delta (\Delta t < [\Delta t]) = \prod_{i=1}^n P_i (\Delta t - [\Delta t]), \quad (7)$$

где i — номер элемента в подгруппе;

j — номер подгруппы.

Так как вероятность безотказной работы каждого элемента в подгруппе из n_i элементов одинакова, зависимость (7) можно представить в виде

$$P_j (\Delta t < [\Delta t]) = (P_i (\Delta t - [\Delta t]))^{n_i}. \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы P_j группы элементов с заданным допускаемым износом после заданного числа лет эксплуатации можно трактовать как долю элементов из этой группы, требующих ремонта. Тогда количество таких элементов n'_j определится в виде:

$$n'_j = n_j (1 - P_j (\Delta t \leq [\Delta t])). \quad (9)$$

Согласно зависимостям (7)–(9), с использованием графика на рис. 2 построена номограмма для определения количества элементов заданной группы связей, требующих ремонта после заданного числа лет эксплуатации (рис. 3). На номограмме показан пример определения количества листов, требующих ремонта n'_j , после десяти лет эксплуатации, если количество элементов (листов) в подгруппе равно десяти, а допускаемый износ $[\Delta t] = 2$ мм. Так как подгруппа j в группе включает n_i элементов с одинаковым допускаемым износом после τ лет эксплуатации, количество элементов в группе связей, требующих ремонта, после T лет эксплуатации корпуса судна будет

$$n^1 = \sum_{j=1}^{x=k} (n_j^1), \quad (10)$$

где k — количество подгрупп в группе.

Вероятность появления отказов в группе связей после T лет эксплуатации равна отношению количества элементов, требующих ремонта к количеству элементов в группе связей с учетом выполненных ремонтов (замен, подкрепления, иных дефектов¹) [3].

Безотказность группы связей корпуса можно определить по формуле

$$P_k (\Delta t \leq [\Delta t]) = \left(1 - \frac{n^1}{n}\right). \quad (11)$$

Безотказность работы корпуса судна, включающего m групп связей, составит

$$P_m (\Delta t \leq [\Delta t]) = \prod_{k=1}^m P_k (\Delta t \leq [\Delta t]). \quad (12)$$

Проанализировав выражения (7)–(12), можно заметить, что показатели надежности корпуса после заданного числа лет эксплуатации зависят от допускаемого износа, количества подгрупп и элементов в подгруппе связей. И допускаемый износ, и количество подгрупп, и количество элементов в подгруппе зависят от дефектов корпуса, внезапно появившихся и сохраняющихся после ремонта и от способа ремонта.

¹ Руководство Р.002–2002. Обновление судов внутреннего и смешанного (река – море) плавания. М.: Российский речной регистр, 2002. 28 с.

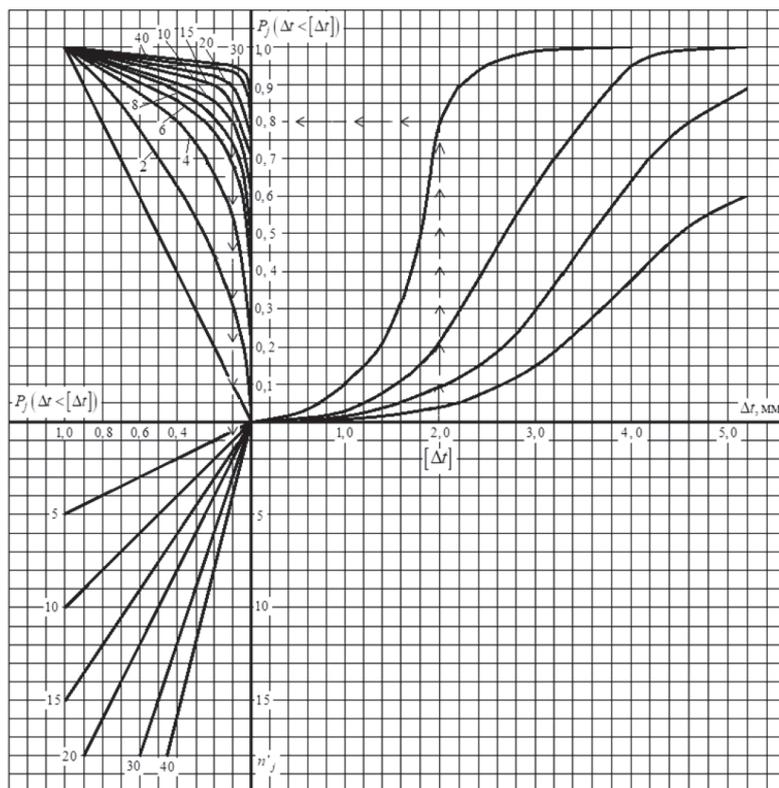


Рис. 3. Номограмма для определения количества элементов (листов) в группе связей

Если корпус судна имеет общие остаточные деформации¹, рассмотренные в источниках [5]–[7], то допускаемый средний износ определяется по формуле

$$[\Delta t_{\text{сеч}}]' = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \cdot \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \right), \quad (13)$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1 - K) \frac{\sum_1^n (t_{\text{пр},i} b_i)}{\sum_1^n (b_i)}$ — допустимый средний износ в сечении группы связей без общих

остаточных деформаций; K — доля допустимой средней остаточной толщины листа от проектной по Правилам РРР; $t_{\text{пр},i}$ — проектная толщина i -го листа в сечении; b_i — ширина i -го листа в сечении

группы связей; $A = \frac{\Delta M}{M_p \sum_1^n (b_i)}$ — коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих

остаточных деформаций; ΔM — дополнительный изгибающий момент при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному; M_p — расчетный изгибающий момент при проверке общей прочности корпуса; f_0 — остаточный общий прогиб / перегиб корпуса, определенный в соответствии с данными Правил РРР [1]; $f_{\text{он}} = L(R_{eH}/E)(L/15H)$ — остаточный нормативный прогиб / перегиб, превышение которого требует учета общих остаточных деформаций в расчетах общей прочности корпуса [2]; R_{eH} — предел текучести материала крайней связи корпуса, МПа; E — модуль нормальной упругости, МПа; L и H — соответственно длина и высота борта корпуса, м.

¹ Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов. ФГОУ ВПО СПб Государственный университет водных коммуникаций / Рук. С. О. Барышников; отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; согласовано ФГУ Российский речной регистр. Письмо 07-06-450 от 21.02.2012. СПб., 2011. 201 с.

Если корпус судна имеет местные остаточные деформации (вмятины) на днище, то допускаемый средний износ в сечении этих групп связей должен уменьшаться также согласно данным источников [2] и [8], а для судов района плавания «R2-RSN (4,5)» с учетом публикации [9], и определяться по формуле

$$[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}] = [\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}^0] \frac{\Delta F}{\sum_1^n (b_i)}, \quad (14)$$

где $[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]$ — допускаемый средний износ в сечении, определенный с учетом остаточных деформаций; $[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}^0]$ — допускаемый средний износ в сечении, определенный без учета остаточных деформаций; $\Delta F = \sum_1^{n'} (f_i (1 - \varphi_i)) + \sum_1^{n'+1} \left(\frac{at_i}{2} (\varphi'_i - \varphi_i) \right)$ — потеря площади поперечного сечения днища из-за деформированных продольных ребер жесткости; n' — количество деформированных ребер в сечении; f_i — проектная толщина поперечного сечения ребра жесткости с присоединенным пояском; φ_i — редуцированный коэффициент деформированного ребра; a — расстояние между продольными ребрами в сечении группы связей (ширина пластин); t_i — проектная толщина листов в поперечном сечении группы связей; $n' + 1$ — количество пластин, примыкающих к деформированным ребрам; φ'_i — редуцированный коэффициент пластины.

При определении потери площади поперечного сечения днища следует помнить, что второе слагаемое написано из условия, что редуцированный коэффициент пластины, примыкающей к деформированному ребру, не может быть больше редуцированного коэффициента этого ребра ($\varphi'_i \leq \varphi_i$). По этой причине второе слагаемое не может быть отрицательным и при выполнении условия ($\varphi'_i \leq \varphi_i$) не учитывается.

При ремонте корпуса судна исключаются элементы, получившие отказ. Это исключение может быть реализовано следующими способами:

- прямым расчетом прочности, обосновывающим повышенный допустимый износ;
- подкреплением дефектных элементов;
- заменой дефектных элементов;
- заменой участков корпуса, содержащих дефектные элементы.

Первый способ применим только для средней остаточной толщины поперечного сечения группы связей днища или палубы при невыполнении условия $\Delta \bar{t}_{\text{сеч}} \leq [\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]'$. Для отдельных элементов корпуса (листов обшивки или настила) он неприменим, так как Правила РРР и РМРС дают возможность рассчитывать их допускаемые остаточные толщины с учетом их нагрузок, размеров пластин и механических характеристик материала. В этом случае надежность корпуса не изменяется.

При ремонте корпусов судов подкреплением отдельных элементов увеличивается допустимый износ подкрепленных элементов, который может быть определен по меньшему значению из выражений:

$$\left. \begin{aligned} [\Delta t]' &= t_{\text{пр}} - 3,0; \\ [\Delta t]' &= 0,5t_{\text{пр}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Надежность подкрепленных элементов увеличивается.

Подкреплением можно увеличить также допустимый износ в поперечном сечении днища или палубы, который может быть определен по формуле

$$[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]' = (1 - K) \cdot \sum_1^n (t_{\text{пр}i} b_i) / \sum_1^n (b_i) + F_n / \sum_1^n (b_i), \quad (16)$$

где F_n — площадь поперечного сечения подкреплений.

В этом случае увеличивается надежность только этого сечения, что, в свою очередь, повышает надежность всего корпуса.

При замене отказавших элементов на новые увеличивается надежность каждого из этих элементов и уменьшается количество элементов, надежность которых не меняется. В результате повышается общая прочность группы связей и всего корпуса судна.

При ремонте заменой конструкций, содержащих отказавшие элементы, надежность корпуса повышается в большей степени, чем при замене отдельных элементов. При таком ремонте заменяется большое количество элементов, которые без отказа могли бы работать еще в течение длительного периода времени. Такой способ ремонта эффективен, если в группе связей к моменту ремонта произошел отказ достаточно большого количества элементов. Оптимальный способ ремонта зависит от количества отказавших элементов корпуса, времени и условий дальнейшей эксплуатации.

Обсуждение (Discussion)

Задача прогнозирования потока отказов элементов корпуса решается с середины 70-х гг. XX в. [3]. Согласно требованиям Правил РРР, толщины связей корпуса при проектировании должны закладываться такими, чтобы до конца планируемого срока службы отсутствовали отказы из-за износа связей, и, следовательно, их ремонт не требовался [10]. С этой целью задаются скорости изнашивания каждой группы связей. Аналогичные требования установлены при обновлении судов.

Согласно требованиям Правил РМРС, предъявляемым к толщинам связей, обеспечивающих общую и местную прочность, необходимо добавлять к допускаемой толщине фиксированный запас на износ, указанный в источниках [2] и [9]. Ни в том ни в другом случае не прогнозируется объем ремонта для восстановления технического состояния корпуса. Прогнозирование потока отказов позволяет не только выбрать эффективный способ ремонта корпуса в заданный момент времени, как это предлагалось в источнике [11], но и обосновать оптимальный способ ремонта, учитывающий оставшийся период эксплуатации [12]. Обоснование способа ремонта приведено в источниках [11], [12]. В последнем случае дается только расчет заменяемых листов в течение всего срока службы при обосновании оптимального срока службы. Выполненное исследование позволило получить зависимость для прогнозирования отказов при различных способах ремонтов.

Заключение (Conclusion)

Полученные зависимости для прогнозирования надежности корпуса после заданного числа лет эксплуатации с учетом объема и способов выполненных ремонтов позволят в дальнейшем определять оптимальные строительные толщины элементов в группе связей, прогнозировать объем и обосновывать оптимальный способ ремонта с учетом материальных и трудовых затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила Российского речного регистра : в 5 т. — М., 2019.
2. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. II : Корпус. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 280 с.
3. Чистов В. Б. Технология ремонта корпусов судов: конспект лекций / В. Б. Чистов. — Л.: ЛИВТ, 1978. — 78 с.
4. Барышников С. О. Надежность механизмов корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погодаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.
5. Гирин С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гирин, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С. 18–26.
6. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
7. Карклина Т. О. Замена сливных каналов теплохода «Невский» на плаву / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 23–31.

8. Ефименков Ю. И. Устранение остаточного перегиба корпуса теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Сборник научных трудов ЦНИИМФ. — 2015. — № 1. — С. 117–125.
9. Ефименков Ю. И. Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания R2-RSN (4, 5) / Ю. И. Ефименков [и др.] // Научно-технический сборник Российского Морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С. 41–43.
10. Chistov V. B. Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls / V. B. Chistov, S. O. Baryshnicov, N. I. Gerasimov, V. A. Zhukov // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
11. Огнева В. В. Особенности прогнозирования износов корпусов судов при планировании объемов судоремонта / В. В. Огнева, Е. Г. Бурмистров // Судостроение. — 2014. — № 5 (816). — С. 46–49.
12. Барышников С. О. Об оптимальных сроках службы корпуса судна / С. О. Барышников, А. Б. Березина, В. Б. Чистов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2011. — № 1 (117). — С. 234–245.

REFERENCES

1. Rossiiskii Rechnoi Registr: Pravila (v 5-ti tomakh). M., 2019.
2. Pravila klassifikatsii i postroiiki morskikh sudov. Chast' II «Korpus». SPb.: Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2019.
3. Chistov, V. B. Tekhnologiya remonta korpusov sudov. Konspekt lektsii. L.: LIVT, 1978.
4. Baryshnikov, S. O., L. I. Pogadaev, and V. B. Chistov. Nadezhnost' mekhanizmov korpusov sudov. Monografiya. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018.
5. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu. I. Efimenkov. "General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 18–26.
6. Baryshnikov, Sergei O., Tatyana O. Karklina, and Valentin B. Chistov. "Reliability of ships hulls with over all residual deformations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
7. Karklina, Tatyana Osipovna, Anatoliy Vladimirovich Pavlov, and Valentin Borisovich Chistov. "Replacement of drain passages of motorship «Nevskiy» afloat." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 23–31.
8. Efimenkov, Yu. I., A. V. Pavlov, and V. B. Chistov. "Ustranenie ostatochnogo peregiba korpusa teplokhoda «Volgo-Don 225»." *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIMF* 1 (2015): 117–125.
9. Efimenkov, Yu. I., M. A. Kuteinikov, G. V. Markozov, and S. A. Sotekov. "Osnovnye rezul'taty razrabotki trebovaniy k sudam ogranichenno go raiona plavaniya R2-RSN(4, 5)." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo Morskogo registra sudokhodstva* 36 (2013): 41–43.
10. Chistov, Valentin B., Sergey O. Baryshnicov, Nikolay I. Gerasimov, and Vladimir A. Zhukov. "Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls." *2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS)*. IEEE, 2018. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
11. Ogneva, V. V., and E. G. Burmistrov. "Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope." *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.
12. Baryshnikov, S. O., A. B. Berezina, and V. B. Chistov. "Ob optimal'nykh srokakh sluzhby korpusa sudna." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo gosudarstvennogo politekhnikeskogo universiteta* 1(117) (2011): 234–245.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergei O. —
Dr. of Technical Sciences, professor, rector
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru

Красюк Алла Борисовна —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: krazyuk_a_b@mail.ru,
kaf_mnt@gumrf.ru

Чистов Валентин Борисович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

Krasiuk, Alla B. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: krazyuk_a_b@mail.ru,
kaf_mnt@gumrf.ru

Chistov, Valentin B. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.
Received: December 24, 2019.*

FILAMENTOUS CAVITATION CAVERNS AND POSSIBILITY TO REDUCE THE CAVITATION EROSION

S. P. Zubrilov, N. V. Rastrygin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

An approach to solving the problem of reducing cavitation destruction of internal combustion engines, ship propellers, elements of hydraulic structures by using modern (Onsager, Prigogine) concepts and apparatus of nonequilibrium thermodynamics to control the cavitation process is presented. It is believed that the ideas of Rayleigh cavitation and modern modifications do not take into account the interactive, bifurcation nature of changes in the properties of substances and phenomena of the cavitation process. Visualization (holography with an exposure of 20 NS) of the cavitation region revealed threadlike, extended cavitation caverns that can be used for avalanche nucleation and cavitation control. The object of research is the cavitation region in water and its effect on the solid surface. The subject of research is the detection of bubbles in the threads form at the stage of liquid stretching and the possibility of their use to reduce the erosive effect of cavitation. The following experimental methods are used in the research: high-speed holographic imaging, interferography and acoustic cavitation. The proof of existence of cavitation bubbles in the form of filaments of different direction, type and extent in the phase of expansion of the cavitation region is given. Attention is drawn to the fact that during the experiment at the stages of compression of the cavitation region, such «bubbles» disappeared from the field of view, which confirms the fact of their existence only in the phase of the cavitation region expansion. It is recorded that the transverse size of such cavitation filaments is the same throughout the expansion phase. The processes and phenomena manifested at the stages of the cavitation region expansion are theoretically and experimentally substantiated. It is revealed that extended cavities can be used for avalanche nucleation of spherical bubbles in order to control the cavitation process. It is noted that modern optical methods of digital tracer visualization, which allow you to see in detail the stages of the cavitation process, have the great prospects. A new way to control the cavitation process on the basis of the study is an alternative to the creation of expensive cavitation-resistant materials.

Keywords: cavitation, hologram, bubble, threadlike cavities, the cavitation area, erosion, non-equilibrium thermodynamics.

For citation:

Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. "Filamentous cavitation caverns and possibility to reduce the cavitation erosion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 96–106. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-96-106.

УДК 502.656.628

НИТЕВИДНЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛОСТИ И ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен подход к решению проблемы снижения кавитационного разрушения двигателей внутреннего сгорания, судовых винтов, элементов гидротехнических сооружений путем привлечения современных представлений (принципы Онсагера и Пригожина) и аппарата неравновесной термодинамики для управления кавитационным процессом. Считается, что представления о кавитации Релея и современные модификации не учитывают интерактивный, бифуркационный характер изменений свойств веществ и явлений кавитационного процесса. Визуализацией (голографией с экспозицией в 20 нс) кавитационной области обнаружены нитевидные протяженные кавитационные каверны, которые можно использовать для лавинной нуклеации и управления кавитацией. Объектом исследований является кавитационная область в воде и ее воздействие на твердую поверхность. Предметом исследований послужило обнаружение

пузырьков в виде нитей на стадии растяжения жидкости и возможность их использования для снижения эрозионного эффекта кавитации. При проведении исследований были использованы следующие экспериментальные методы: высокоскоростная голографическая визуализация, интерферография и акустическая кавитация. Приведено доказательство существования кавитационных «пузырьков» в виде нитей различных направления, вида и протяженности в фазе расширения кавитационной области. Обращается внимание на то, что при проведении эксперимента на стадиях сжатия кавитационной области такие «пузырьки» исчезли из поля зрения, что подтверждает факт их существования только в фазе расширения кавитационной области. Зафиксировано, что поперечный размер таких кавитационных нитей одинаков во всей фазе расширения. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления, проявляющиеся на стадиях расширения кавитационной области. Выявлено, что протяженные каверны можно использовать для лавинного зародышеобразования сферических «пузырьков» в целях управления процессом кавитации. Отмечается, что большие перспективы имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации, которые позволяют детально увидеть стадии кавитационного процесса. Новый способ управления кавитационным процессом на базе проведенного исследования является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационностойких материалов.

Ключевые слова: кавитация, голограмма, пузырек, нитевидные каверны, кавитационная область, эрозия, неравновесная термодинамика.

Для цитирования:

Зубрилов С. П. Нитевидные кавитационные полости и возможность снижения кавитационной эрозии / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 96–106. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-96-106.

Введение (Introduction)

Впервые протяженные кавитационные каверны были обнаружены при голографической съемке кавитационного поля при экспозициях в 20 нс. В данной работе, являющейся логическим завершением исследования [1], предлагается новый термодинамический подход для описания кавитационной эрозии элементов судового оборудования, винтов и элементов гидротехнических сооружений. Обобщение работ, посвященных объединению кавитационных полостей у поверхности твердых тел [1]–[4] и экспериментальное голографическое исследование кавитационной области [5], позволили предположить возможность возникновения в кавитационном поле протяженных кавитационных каверн. Следует заметить, что одномерные цепочки в виде кавитационной нити типа «ожерелья» из «пузырьков» (рис. 1) [5] с разрывами между ними наблюдаются при прохождении водяной струи через сопло Лавала, за винтами судов и т. д. Одномерные агрегаты-цепочки (рис. 2) в ультразвуковых полях детально исследованы И. Ф. Ефремовым [6]. Было доказано, что основной причиной их возникновения является поляризационное взаимодействие.

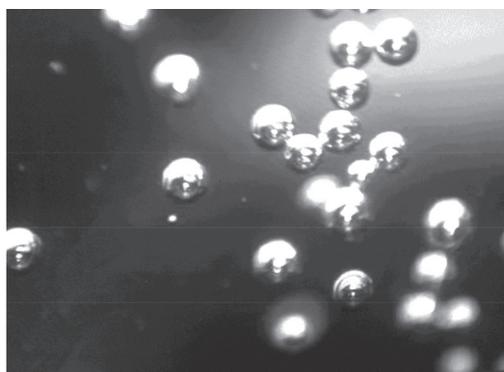


Рис. 1. Фрагмент цепочки «пузырьков»

Рассмотрим возможность объединения кавитационных «пузырьков» в одномерные агрегаты-цепочки в кавитационных полях. В источнике [5] рассмотрено движение двух одинаковых «пузырьков», приобретающих колебательную скорость поверхностей сфер в ультразвуковом поле

в направлении друг друга (рис. 3), до соприкосновения под действием сил Бьеркнеса. Были выполнены расчеты скорости движения «пузырьков» в ряде положений и установлено нелинейное (квазистационарное приближение) нарастание скорости по мере их приближения друг к другу.

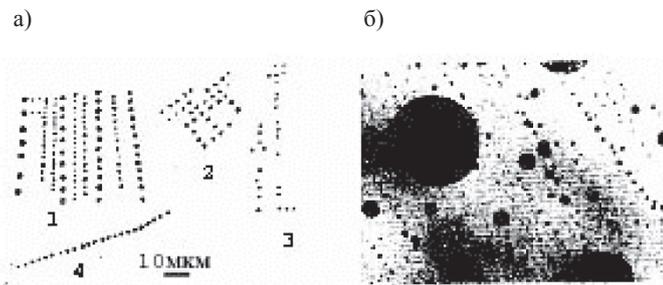


Рис. 2. Одномерные агрегаты-цепочки по И. Ф. Ефремову:
а — схема образования одномерных агрегатов из частиц канифоли (1–3) и серы (4) в 0,0001 М водном растворе NaCl; б — электронная микрофотография одномерных агрегатов из частиц эпоксидной смолы ЭД-5 в ацетоне (×70000)

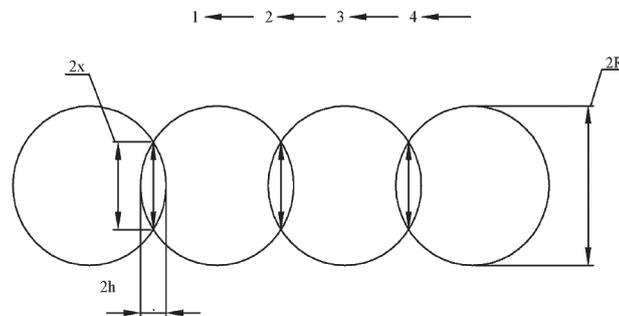


Рис. 3. Схема цепочки из пузырьков

Существует и ряд других сил (Бернулли, Кёнега), которые могут заставить «пузырьки» двигаться в направлении друг друга (например, сила дрейфа пузырьков к центрам микровихрей, возникающих в объеме жидкости, в кавитационном поле и др.). Известно, что между «пузырьками» также действуют силы электромагнитной природы. Отклик кавитационного «пузырька» на внешние электромагнитные поля не вызывает в настоящее время сомнений [7]. Пульсирующие рядом и перемещающиеся относительно друг друга два «пузырька», являясь носителями зарядов, будут либо притягиваться, либо отталкиваться.

Энергию этого взаимодействия можно определить по теории устойчивости лиофобных дисперсных систем ДЛФО:

– при притяжении

$$U_{\text{пр}} = -\pi Kr/12h; \quad (1)$$

– при отталкивании

$$U_{\text{от}} = \xi \psi_0^2 r / 2 \ln(1 + \exp(-kh)); \quad (2)$$

$$k = (8\pi(ze)2n/\xi RT)^{1/2},$$

где r — радиус частицы («пузырька»); h — расстояние между «пузырьками» (внутренними поверхностями); ψ — потенциал поверхности; K — константа молекулярных сил; ξ — диэлектрическая проницаемость; n — счетная концентрация частиц; k — параметр Дебая – Хюккеля; z — валентность противоионов; e — заряд электрона; R — константа Больцмана; T — температура по абсолютной шкале.

Опуская промежуточные вычисления и принимая некоторые допущения, получим энергию взаимодействия между «пузырьками», находящимися на расстоянии $h \cong 400\text{Å}$ при $r \cong 1000\text{Å}$ в пределах 10^{-17} – 10^{-14} эрг. Среднее значение мощности ультразвуковых колебаний при частоте 22 кГц на концентраторе диаметром 5 мм в данных опытах составляет $\sim 15\text{ Вт/см}^2$, амплитуда изменения давления — $\sim 50 \times 10^5$ Па. Выполненные в настоящем исследовании оценки показывают, что энергия ультразвукового взаимодействия двух «пузырьков», находящихся на расстоянии $h \cong 400\text{Å}$, имеет порядок 10^{-16} эрг.

Таким образом, энергия ультразвукового взаимодействия по порядку величины близка к энергии взаимодействия, рассчитанной по теории устойчивости лиофобных дисперсных систем ДЛФО. На основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что цепочки могут возникать под действием сил электромагнитной природы, усиливающих притяжение пузырьков. Для подтверждения возможности существования в кавитационном поле протяженных каверн было выполнено экспериментальное исследование.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментов были использованы следующие методы и материалы:

- метод высокоскоростного голографирования, схема которого приведена на рис. 4 и 5;
- голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсibilизированных на длину волны 0,694 мкм;
- пьезокерамические датчики для фиксации импульсов давления при захлопывании кавитационной области;
- рубиновый лазер ОГМ-20, гелий-неоновый лазер восстановления голограмм;
- кюветы из оптического стекла;
- дистиллированная вода однократной и двукратной дистилляции;
- ионообменные фильтры.

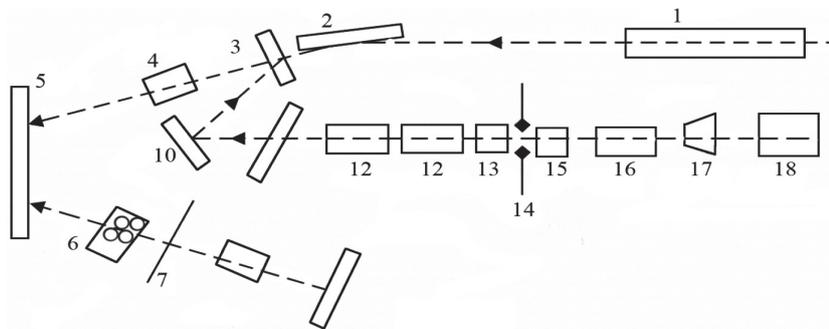


Рис. 4. Схема голографирования кавитационной каверны: 1 — газоплазменный лазер; 2, 3 — зеркало; 4 — расширитель; 5 — фотопластинка; 6 — кавитационная кювета; 7 — матовое стекло; 8 — расширитель; 9, 10 — зеркало; 11 — полупрозрачное зеркало; 12 — усилители; 13 — зеркало; 14 — точечное отверстие; 15 — диафрагма; 16 — модулятор добротности; 17 — квантовый генератор; 18 — сферическое зеркало; 19 — газоплазменный лазер

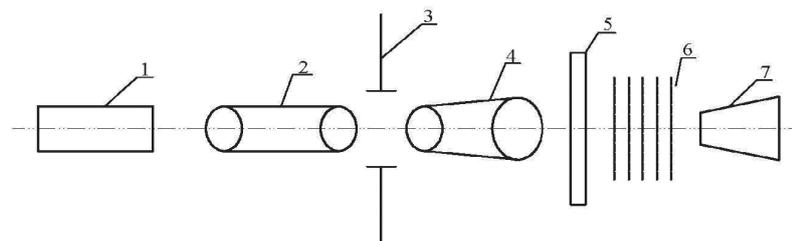


Рис. 5. Схема воспроизведения голограммы: 1 — одноимодовый гелий-неоновый лазер; 2 — микрообъектив; 3 — точечное отверстие; 4 — расширитель пучка; 5 — голограмма на перемещающемся столике; 6 — восстановление изображения; 7 — микроскоп

Исследование «ансамбля» пузырьков возможно только методом голографирования, обеспечивающим объемное изображение кавитационного поля, включая размеры и взаимное распределение дисперсий двух фаз. Снимались голограммы кавитационной области у поверхности колеблющегося магнитоостриктора в разных фазах (расширение, сжатие) и в разных точках каждой фазы в режиме акустической кавитации.

Наиболее перспективной является однолучевая схема при использовании импульсного рубинового лазера с модулированной добротностью и длительностью импульсов излучения $2-10^{-8}$ с. Объектом голографирования служит кювета из оптического стекла размером $2 \times 3 \times 4$ см с исследуемой жидкостью, в которой с помощью магнитоостриционного излучателя, работающего от генератора УЗДН-2Т, создается кавитационная область.

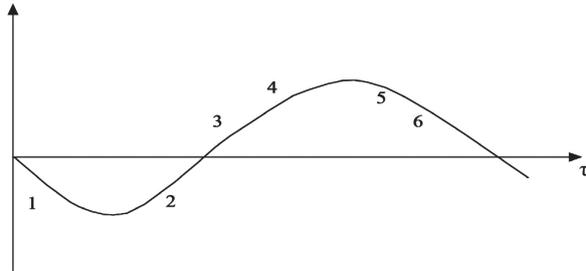


Рис. 6. Изменение давления в жидкости за период колебания излучателя:
1–6 — точки фазы колебаний давления, в которых сняты голограммы

Был изготовлен специальный блок синхронизации, импульс лазерного излучения привязан к определенной фазе УЗДН-2Т. При этом точно известно, в какой фазе процесса развития кавитационной области производится съемка голограммы. Голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсibilизированных на длину волны 0,694 мкм. Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 6 показан период изменения давления в жидкости и точки 1–6, в которых проводилась съемка голограммы.

Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 6 показан период изменения давления в жидкости и точки 1–6, в которых проводилась съемка голограммы.

Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 6 показан период изменения давления в жидкости и точки 1–6, в которых проводилась съемка голограммы.

Результаты (Results)

На основе анализа голограмм, снятых в разных фазах периода колебаний кавитационной области на концентраторе большого диаметра ($d = 5$ мм), можно сделать следующие выводы.

Интересным результатом голографических исследований является обнаружение в ультразвуковых кавитационных полях наряду со сферическими кавитационными пузырьками протяженных кавитационных каверн (в виде агрегатов-цепочек и т. д.), полученных в стадии расширения жидкости (в точки 1 и 2 на рис. 6). Эти протяженные неоднородности толщиной примерно 40 мкм

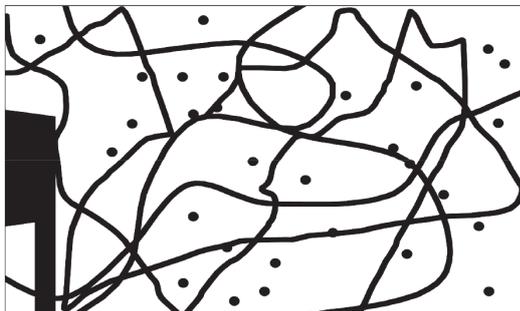


Рис. 7. Протяженности (агрегаты-цепочки) в кавитационном поле в фазе разрежения, полученные над концентратором диаметром 5 мм

(рис. 7) воспроизводятся постоянно в кавитационных полях, зависят от мощности ультразвука и не являются посторонними включениями, так как фиксируются только во второй половине стадии разрежения. В стадии сжатия таких протяженных неоднородностей на голограммах не наблюдается. Если бы это были какие-либо волокна, то они могли быть обнаружены на всех голограммах как в стадии сжатия, так и в стадии расширения. Таким образом, предположение об объединении нескольких сферических кавитационных пузырьков в искривленную (под действием внешних гидродинамических сил) цепочку экспериментально подтверждается.

Авторами работ [8]–[10] экспериментально подтверждено, что в фазе разрежения в кавитационном

поле возникают в кратковременные интервалы каверны в виде одномерных агрегатов-цепочек (на рис. 8, а, б и д видны нити из кавитационных «пузырьков», на рис. 9 приведена «акустическая фигура Лихтенберга»), наличие которых теоретически обосновано в работах [11]–[13].

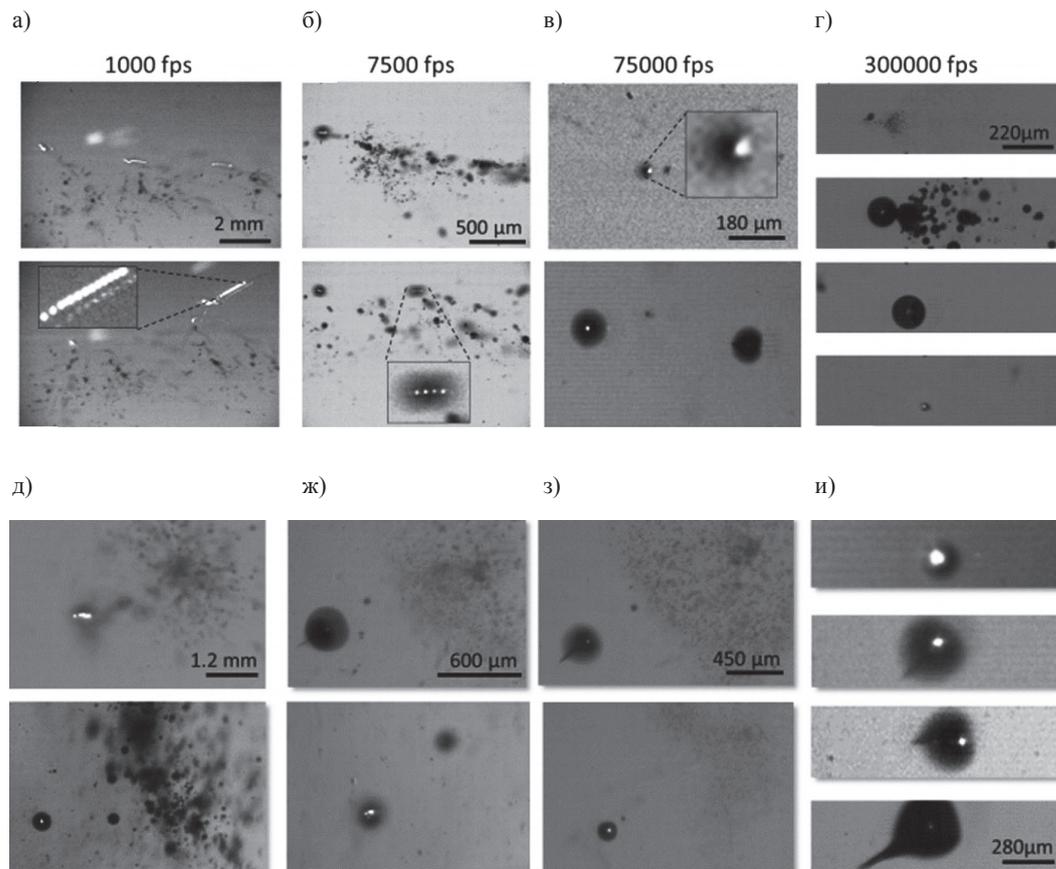


Рис. 8. Микрофотографии кавитационного поля

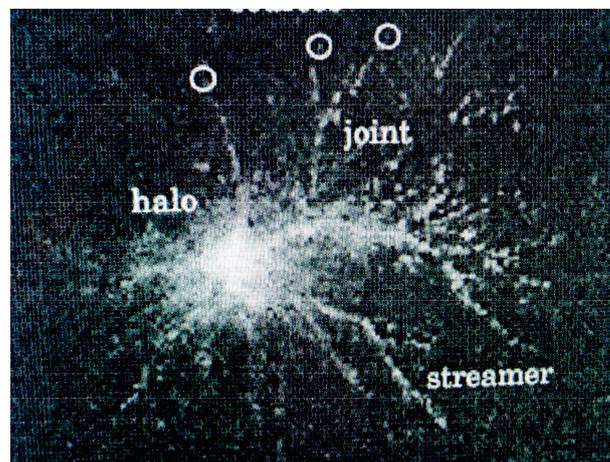


Рис. 9. Фотография агрегатов-цепочек

На основании фоторегистрации и голографирования завершающей стадии сжатия отдельного кавитационного пузырька и кавитационного поля в целом доказано существование радиальных кумулятивных струй, спиралевидных струй пережатия пузырька, неровностей на его поверхности самого разного вида («вмятины» обратной кривизны, «протуберанцы», «ежи» и т. д.) [5], [14]–[16].

Закручивающаяся (предположительно двойной спиралью) струя делит кавитационный пузырек на две неравные части, расположенные друг над другом у твердой поверхности, а затем радиальная кумулятивная струя может при определенных условиях направляться не к твердой поверхности, а, наоборот, в сторону жидкости, что снижает эффект кавитационной эрозии [2]. Поведение

кавитационного пузырька во взаимодействии с соседними по кавитационному полю при сжатии его с «развалом» и последующим сжатием «осколков» по разному механизму и т. д., из-за бифуркаций, непредсказуемо [5], [17]. Сжимающаяся кавитационная область является областью «обвальных» химических реакций, возмущенных и ионизированных молекул, их радикалов, элементарных частиц, взаимодействия между которыми наблюдаются в условиях нарушения распределения частиц Максвелла – Больцмана и приближенно оцениваются, по Пригожину, как область неравновесных быстрых химических реакций при высоких температурах, а содержимое пузырька является высоко-температурной нейтральной парогазовой плазмой.

Неравновесные быстрые физико-химические процессы в такой плазме, обусловленные как ударами электронов отдельных молекул воды, так и ударами Франка – Герца и их комбинацией, приводят к возбуждению и ионизации молекул воды и примесей, а взаимодействия между их радикалами, элементарными частицами протекают в условиях нарушения распределения

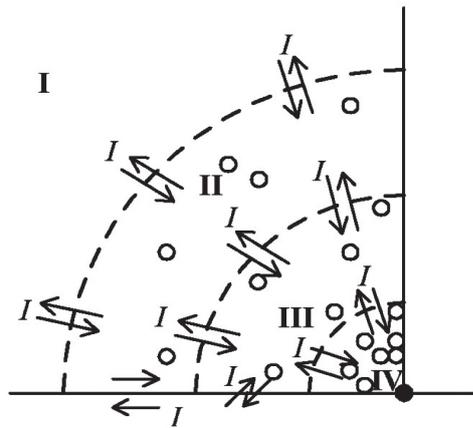


Рис. 10. Схема потоков в кавитационной области

Максвелла – Больцмана. Представляется, что сжатие кавитационной области у твердой стенки с разрушением сжатой плазмы радиальной кумулятивной струей можно описать в терминах термодинамики неравновесных процессов, рассматривая кавитационное поле по нескольким последовательным слоям, в которых преобладают определенные термодинамические потоки и вызывающие их силы (рис. 10). Если в слое *I* находится невозмущенная жидкость, то в слое *II* под действием, например, ультразвука имеют место акустические течения, пульсации и весь этот слой может быть описан достаточно корректно блоком уравнений классической гидромеханики.

Силы в слое *II* достаточно известны, их можно оценить. К ним относятся электроповерхностные неравновесные силы взаимодействия, обладающие постоянным электрическим дипольным моментом, молекуляр-

ные силы Ван-дер-Ваальса – Лондона, силы сопротивления жидких слоев между «пузырьками»: капиллярные, гравитационные и центробежные силы, силы броуновского движения и т. д.

Слой *III* является предметом исследования гидродинамики быстропротекающих процессов (коллапс отдельных кавитационных «пузырьков» и кооперативное их взаимодействие, слияние в цепочки, фрагментация и т. д.).

Слой *IV* — это «слой взрыва», «обвальных» химических реакций, возмущенных и ионизированных молекул, их радикалов и элементарных частиц. В этих условиях скорости частиц не подчиняются распределению Максвелла – Больцмана и могут быть приближенно оценены по Пригожину – Куртису, а потоки характеризуются, соответственно, кинетическими коэффициентами, пропорциональными коэффициентам теплопроводности, диффузии, вязкости, электропроводности с учетом загрязнения воды ксенобиотиками и коэффициенты Онсагера следует рассчитывать с учетом этих условий [17].

Как известно, потоки L_i связаны с термодинамическими силами X_j :

$$I_{ij} = \sum L_{ij} X_{ij}, \quad (3)$$

где L_{ij} — феноменологические коэффициенты, или коэффициенты Онсагера (в рассматриваемом случае они определяются опытным путем или частично могут быть рассчитаны).

В качестве основы для последующих расчетов принимаем соотношение

$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (4)$$

где $d_e S$ — обмен энтропией между системой и средой;

$d_i S$ — производство энтропии непосредственно в самой системе.

При перекрестных процессах

$$L_{ij} = L_{ji}. \quad (5)$$

Локальное производство энтропии в этих случаях

$$\delta = \sum_{ij} X_i L_{ij} X_j. \quad (6)$$

По теореме Пригожина $\sigma = \sigma_{\min}$ (в стационарном состоянии при заданных внешних условиях, препятствующих достижению равновесия). При отсутствии таких препятствий в состоянии термодинамического равновесия $\sigma = 0$. Следовательно, можно предположить, что сферическая форма пузырьков ($\sigma = \sigma_{\min}$) в пульсирующих гидродинамических акустических полях короткие интервалы времени будет не единственная [15], [16].

Основная сложность предлагаемого подхода заключается в определении коэффициентов Онсагера, особенно для зоны IV (см. рис. 10) [14], [18], которые вычисляют на базе экспериментальных данных. Изложенный ранее термодинамический подход получил свое подтверждение в докладе С. Радельбаума (Штутгартский университет) на X Международном кавитационном конгрессе в 2018 г. [19]. Большие перспективы для получения экспериментальных данных имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry — PIV), разрабатываемые в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН [15], которые позволяют детально увидеть динамику сжатия кавитационного «пузырька» и области, а также динамику разряжения области, включая зарождение, развитие и исчезновение одномерных агрегатов — цепочек «пузырьков» на стадии расширения кавитационной области [16], [17].

В последнее время появились экспериментальные методики (рис. 11) [20], позволяющие осуществлять лазерный пробой жидкости у поверхности раздела «газ – жидкость» и осуществлять съемку ударных волн разного происхождения двумя камерами одновременно, выполняя исследование взаимодействия лазерного «пузырька» с частицей в зависимости от их размеров и расстояния между ними с фиксацией кумулятивных струй [21], что можно использовать для изучения заключительной стадии сжатия кавитационного облака.

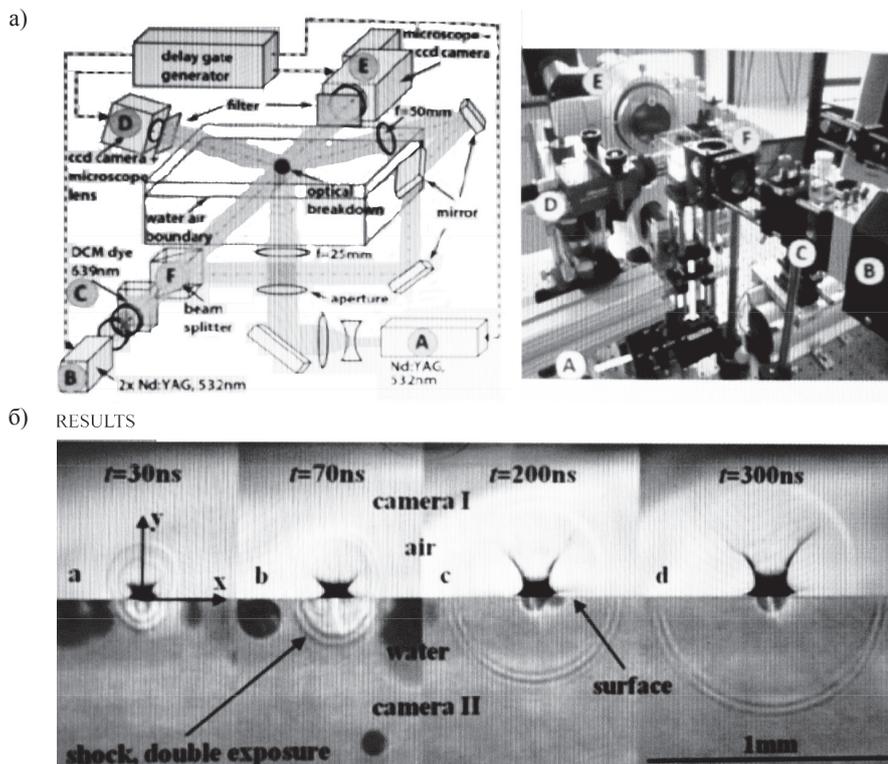


Рис. 11. Примеры экспериментальных методик: а — схема и вид установки; б — скоростная визуализация лазерных пузырьков на границе «газ – жидкость»

Заключение (Conclusion)

Таким образом, на основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что описать кавитацию и кавитационную эрозию невозможно без привлечения термодинамики неравновесных процессов, последовательного решения уравнений потоков. Экспериментально доказано и подтверждено другими авторами в [8]–[10], что в фазе разряжения в кавитационном поле возникают в кратковременные интервалы каверны в виде одномерных нитевидных агрегатов-цепочек, а их наличие обосновано теоретически в [11]–[13]. Поведение таких агрегатов, а тем более их влияние на процессы кавитационной эрозии не изучено и требует соответствующих исследований. Бесспорно, что цепочки в стадии сжатия будут распадаться на множество «пузырьков» (лавинное зародышеобразование исказит структуру кавитационного поля), а эрозия твердой поверхности будет изменяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрюгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
2. Grivnin U. A. The investigation of the collapse mechanism of the non-spheric cavitation recesses in liquids with different physical properties / U. A. Grivnin S. P. Zubrilov V. A. Larin, K. K. Shalnev // 6th Conference on Fluid Machinery. — Budapest: Akademiai Kiado, 1979. — Vol. 1. — Pp. 457–466.
3. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. — Наука, 2008. — 271 с.
4. Акуличев В. А. Кавитация в криогенных кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. — М.: Наука, 1978. — 278 с.
5. Зубрилов С. П. Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации / С. П. Зубрилов. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 120 с.
6. Ефремов И. Ф. Периодические коллоидные структуры / И.Ф.Ефремов. — Л.: Химия, 1971. — 190 с.
7. Безюков О. К. Влияние электрического, магнитного и тепловых полей на кавитацию и кавитационную эрозию / О. К. Безюков, Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Лаврин // Охрана окружающей среды: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 1993. — С. 15–46.
8. Reuter F. Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitating jet / F. Reuter, S. Lesnik, K. Ayaz-Bustami, G. Brenner, R. Mettin // Ultrasonics sonochemistry. — 2019. — Vol. 55. — Pp. 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.
9. Mettin R. Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model / R. Mettin, S. Luther, C.-D. Ohl, W. Lauterborn // Ultrasonics Sonochemistry. — 1999. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 25–29. DOI: 10.1016/S1350-4177(98)00025-X.
10. Аганин А. А. Динамика расположенных в линию кавитационных пузырьков / А. А. Аганин, А. И. Давлетшин, Д. Ю. Топорков // Вычислительная техника. — 2014. — Т. 19. — № 1. — С. 3–19.
11. Каратанасис И. К. Высокоскоростная визуализация вихревой кавитации с использованием синхротронного излучения / И. К. Каратанасис [и др.] // Журнал механики жидкости. — 2018. — Т. 838. — С. 148–164.
12. Ohl S. W. Bubble Dynamics and High Intensity Focused Ultrasound: Experimental Observations and Numerical Simulations using Boundary Element Method / S. W. Ohl, E. Klaseboer, B. C. Khoo // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch29.
13. Beig S. A. Bubble-Bubble Interactions and Wall Pressures Produced by the Collapse of a Bubble Pair near a Rigid Surface / S. A. Beig, E. Johnsen // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch30.
14. Зубрилов С.П. Эффекты, сопровождающие сжатие кавитационных пузырьков / С. П. Зубрилов, А. С. Зубрилов // Журнал физической химии. — 1998. — Т. 72. — № 11. — С. 2066–2068.
15. Кравцова А. Ю. Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев: дис. ... канд. физ.-мат. наук; спец.: 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» / А. Ю. Кравцова. — Новосибирск: Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2018. — 139 с.

16. Зубрилов А. С. Кавитационные каверны в виде одномерных агрегатов-цепочек / А. С. Зубрилов, С. П. Зубрилов // Журнал физической химии. — 1997. — Т. 71. — № 7. — С. 1336–1338.
17. Пригожин И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / И. Пригожин; пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Комкнига, 2006. — 296 с.
18. Зубрилов С. П. Сопоставление различных механизмов кавитации / Краткие сообщения / С. П. Зубрилов // Журнал физической химии. — 2000. — Т. 74. — № 9. — С. 1700–1701.
19. Vanovski V. The Numerical Scheme for the History Force Integrals in Hydrodynamics / V. Vanovski // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch196.
20. Garen W. Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary / W. Garen, B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, U. Teubner // 30th International Symposium on Shock Waves 2. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63.
21. Lv L. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble / L. Lv, Y. Zhang, Y. Zhang // Ultrasonics sonochemistry. — 2019. — Vol. 56. — Pp. 63–76. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.03.019.

REFERENCES

1. Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. “Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
2. Grivnin, U. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. “The investigation of the collapse mechanism of the non-spherical cavitation recesses in liquids with different physical properties.” *Proceedings of sixth conference on fluid machinery*. Vol. 1. Budapest: Akademiai Kiado, 1979. 457–466.
3. Sirotyuk, M. G. *Akusticheskaya kavitatsiya*. Nauka, 2008.
4. Akulichev, V. A. *Kavitatsiya v kriogennykh kipyashchikh zhidkostyakh*. M.: Nauka, 1978.
5. Zubrilov, S. P. *Fiziko-khimicheskie svoystva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoi kavitatsii*. SPb.: SPGUVK, 2010.
6. Efremov, I. F. *Periodicheskie kolloidnye struktury*. L.: Khimiya, 1971.
7. Bezyukov, O.K., Yu.A. Grivnin, S.P. Zubrilov, and V.A. Lavrin. “Vliyanie elektricheskogo, magnitnogo i teplovykh polei na kavitatsiyu i kavitatsionnyu eroziyu.” *Okhrana okruzhayushchei sredy: sb. nauch. tr.* SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 1993. 15–46.
8. Reuter, Fabian, Sergey Lesnik, Khadija Ayaz-Bustami, Gunther Brenner, and Robert Mettin. “Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitated jet.” *Ultrasonics sonochemistry* 55 (2019): 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.
9. Mettin, R., S. Luther, C.-D. Ohl, and W. Lauterborn. “Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model.” *Ultrasonics Sonochemistry* 6.1-2 (1999): 25–29. DOI: 10.1016/S1350-4177(98)00025-X.
10. Aganin, Alexandr Alexeevich, Anas Ilgizovich Davletshin, and Dmitriy Yurievich Toporkov. “Dynamics of a line of cavitation bubbles in an intense acoustic wave.” *Computational Technologies* 19.1 (2014): 3–19.
11. Karatanasis, I.K., P. Kukuvinis, E. Kontolatis, Z. Li, Dzh. Van, N. Mitroglu, and M. Gavaizes. “Vysokoskorostnaya vizualizatsiya vikhrevoi kavitatsii s ispol’zovaniem sinkhrotronnoho izlucheniya.” *Zhurnal mekhaniki zhidkosti* 838 (2018): 148–164.
12. Ohl, Siew-Wan, Evert Klaseboer, and Boo Cheong Khoo. “Bubble Dynamics and High Intensity Focused Ultrasound: Experimental Observations and Numerical Simulations using Boundary Element Method.” *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*. ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch29.
13. Beig, Shahaboddin A., and Eric Johnsen. “Bubble-Bubble Interactions and Wall Pressures Produced by the Collapse of a Bubble Pair near a Rigid Surface.” *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*. ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch30.
14. Zubrilov, S. P., and A. S. Zubrilov. “Effekty, soprovozhdayushchie szhatie kavitatsionnykh puzyr’kov.” *Zhurn fizich. khimii* 72.11 (1998): 2066–2068.
15. Kravtsova, A. Yu. Eksperimental’noe issledovanie kavitatsionnogo obtekaniya dvumernykh gidrokryl’ev. PhD Dis. Novosibirsk: In-t teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2018.
16. Zubrilov, A. S., and S. P. Zubrilov. “Kavitatsionnye kaverny v vide odnomernykh agregatov-tsepochek.” *Zhurnal fizicheskoi khimii* 71.7 (1997): 1336–1338.

17. Prigozhin, I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: Vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh*. 3-d ed. M.: Komniga, 2006.
18. Zubrilov, S. P. "Sopostavlenie razlichnykh mekhanizmov kavitatsii / Kratkie soobshcheniya." *Zhurnal fizicheskoi khimii* 74.9 (2000): 1700–1701.
19. Vanovskiy, Vladimir. "The Numerical Scheme for the History Force Integrals in Hydrodynamics." *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*. ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch196.
20. Garen, W., B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, and U. Teubner. "Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary." *30th International Symposium on Shock Waves 2*. Springer, Cham, 2017. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63
21. Lv, Liang, Yongxue Zhang, and Yuning Zhang. "Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble." *Ultrasonics sonochemistry* 56 (2019): 63–76. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.03.019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зубрилов Сергей Павлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf_ovrb@gumrf.ru

Растрыгин Николай Васильевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rastryginv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zubrilov, Sergey P. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf_ovrb@gumrf.ru

Rastrygin, Nikolay V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: rastryginv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2019 г.
Received: December 19, 2019.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-107-114

STUDYING THE THERMAL-HYDRAULIC EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE COOLING SYSTEMS FOR MARINE DIESEL ENGINES

V. A. Zhukov, A. A. Pulyaev, V. L. Erofeyev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

One of the perspective directions of improving diesels used as the main and auxiliary engines in the ship power plants composition is increasing the temperature level providing heat losses reduction, increase of engines thermal efficiency and their fuel economy. To implement this direction, many modern diesels are equipped with high-temperature cooling systems. Increasing the coolant temperature in such systems is accompanied by increasing the pressure in the cooling systems. Increasing pressure in the cooling systems leads to increasing the power consumption required to drive the circulation pump of the internal circuit of the diesel cooling system. The research purpose is a comparative assessment of the thermal-hydraulic efficiency of high-temperature and low-temperature cooling. As an evaluation criterion, the ratio of heat withdrawn through the cooling system and the power consumption for pumping the coolant, which provides this heat removal, is used. To determine this ratio, both known analytical dependencies and the results of numerical simulation of heat transfer processes in a cylindrical channel are used during the research. The use of both research methods allows us to obtain consistent results. Based on the conducted research results, it can be concluded that despite increasing the power costs for the circulation pump drive, the transition to high-temperature cooling provides an increase of the thermal-hydraulic efficiency of the ship diesel cooling systems. The most significant increasing the thermal-hydraulic efficiency of high-temperature cooling systems is possible when using water-water heat exchangers that provide the maximum permissible temperature difference of the coolant at the engine outlet and inlet.

Keywords: marine diesels, high-temperature cooling systems, heat-hydraulic efficiency, heat dissipation, power consumption, numerical simulation, specific enthalpy of the flow, specific kinetic energy of the flow.

For citation:

Zhukov, Vladimir A., Andrej A. Pulyaev, and Valentin L. Erofeyev. "Studying the thermal-hydraulic efficiency of high-temperature cooling systems for marine diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 107–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-107-114.

УДК 621.431.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В. А. Жуков, А. А. Пуляев, В. Л. Ерофеев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрено одно из перспективных направлений совершенствования дизелей, используемых в качестве главных и вспомогательных в составе судовых энергетических установок, такое как повышение температурного уровня, обеспечивающее сокращение тепловых потерь — повышение термического КПД двигателей и их топливной экономичности. Для реализации данного направления многие современные дизели оснащены высокотемпературными системами охлаждения. Повышение температуры охлаждающей жидкости в таких системах сопровождается повышением давления в системах охлаждения. Возрастание давления в системах охлаждения приводит к увеличению затрат мощности, необходимой

для привода циркуляционного насоса внутреннего контура системы охлаждения дизеля. Целью проведенных исследований являлась сравнительная оценка теплогидравлической эффективности высокотемпературного и низкотемпературного охлаждения. В качестве критерия оценки использовались отношение отводимой через систему охлаждения теплоты и затраты мощности на прокачивание охлаждающей жидкости, обеспечивающей данный отвод теплоты. Для определения указанного соотношения при проведении исследований использовались как известные аналитические зависимости, так и результаты проведенного численного моделирования процессов теплообмена в цилиндрическом канале. Использование обоих методов исследования позволило получить согласующиеся результаты. На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что несмотря на увеличение затрат мощности на привод циркуляционного насоса, переход на высокотемпературное охлаждение обеспечивает повышение теплогидравлической эффективности систем охлаждения судовых дизелей. Наиболее существенное повышение теплогидравлической эффективности систем высокотемпературного охлаждения возможно при условии использования водо-водяных теплообменных аппаратов, обеспечивающих максимально допустимую разность температур охлаждающей жидкости на выходе из двигателя и входе в него.

Ключевые слова: судовые дизели, высокотемпературные системы охлаждения, теплогидравлическая эффективность, отводимая теплота, затраты мощности, численное моделирование, удельная энтропия потока, удельная кинетическая энергия потока.

Для цитирования:

Жуков В. А. Исследование теплогидравлической эффективности высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков, А. А. Пуляев, В. Л. Ерофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 107–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-107-114.

Введение (Introduction)

Современные транспортные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), в том числе судовые, имеют жидкостные системы охлаждения, принципы действия которых, методики расчета и конструктивные особенности отдельных элементов подробно рассмотрены в работах [1]–[3]. Форсирование ДВС приводит к возрастанию тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы [4], [5], которые в большинстве современных моделей двигателей лимитируют ресурс [6], [7] и требуют разработки более эффективных систем охлаждения [8], [9]. К наиболее перспективным системам охлаждения следует отнести высокотемпературные системы охлаждения, теоретические основы которых подробно изложены в работе [10]. В настоящее время системы высокотемпературного охлаждения (ВТО), в которых температура охлаждающей жидкости достигает 120...130 °С применяются в конструкциях двигателей ведущих зарубежных и отечественных производителей: MAN B&W Diesel Ltd, Caterpillar, General Motors, Wartsila/Sulzer, Deutz AG, ОАО «Барнаултрансмаш» [11]. Перспективность и универсальность систем ВТО подтверждается тем, что данные двигатели имеют диаметры цилиндров 146–457 мм, частоту вращения коленчатого вала 277–2200 мин⁻¹ и перекрывают диапазон мощностей от 110 до 3680 кВт.

Основными достоинствами систем ВТО, обуславливающими их применение, являются [12]–[14]:

- уменьшение термических напряжений в цилиндровой втулке вследствие снижения разности температур на ее поверхностях и стабилизации температурных полей;
- уменьшение доли теплоты, отводимой через систему охлаждения за счет перераспределения составляющих теплового баланса;
- снижение механических потерь и износа деталей в паре «поршень – цилиндровая втулка»;
- увеличение возможностей утилизации вторичных энергетических ресурсов, отводимых с отработавшими газами и охлаждающей жидкостью;
- улучшение условий воспламенения и сгорания топлива в камере сгорания за счет повышения осредненной температуры цикла;
- уменьшение массогабаритных показателей теплообменных аппаратов системы охлаждения.

Однако перевод судовых дизелей на высокотемпературное охлаждение сопровождается специфическими проблемами, которые требуют своего решения. Основная из этих проблем связана с повышением давления в системах ВТО до 0,5 ... 0,6 МПа. Такое повышение давления требует

дополнительных мер по обеспечению герметичности полостей охлаждения и элементов системы, а также увеличения затрат мощности на прокачивание охлаждающей жидкости по внутреннему контуру системы охлаждения судового ДВС.

Проведенные исследования посвящены оценке теплогидравлической эффективности систем ВТО путем сопоставления интенсивности теплообмена и затрат мощности на прокачивание охлаждающей жидкости при повышенных давлениях в системе охлаждения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Традиционно [15], [16] теплогидравлическая эффективность систем охлаждения оценивается мощностным коэффициентом, представляющим собой отношение мощности, затрачиваемой на привод насосов системы охлаждения $N_{\text{охл}}$, к эффективной мощности двигателя N_e :

$$\varepsilon_{\text{охл}} = \frac{N_{\text{охл}}}{N_e} \quad (1)$$

или энергетическим коэффициентом, равным отношению количества теплоты $Q_{\text{охл}}$, отведенной через систему охлаждения к мощности, затрачиваемой на прокачивание теплоносителя $N_{\text{охл}}$:

$$E_{\text{охл}} = \frac{Q_{\text{охл}}}{N_{\text{охл}}}. \quad (2)$$

При сопоставлении систем охлаждения дизеля конкретной модели, отличающихся температурным уровнем для сравнения их теплогидравлической эффективности, второй показатель является более предпочтительным.

Количество теплоты, отводимой через систему охлаждения, определяются выражениями: для низкотемпературной системы охлаждения:

$$Q_{\text{охл}}^{\text{HT}} = G_{\text{охл}}^{\text{HT}} c_p^{\text{HT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}}; \quad (3)$$

для высокотемпературной системы охлаждения

$$Q_{\text{охл}}^{\text{BT}} = G_{\text{охл}}^{\text{BT}} c_p^{\text{BT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}} \quad (4)$$

где $G_{\text{охл}}^{\text{HT}}$, $G_{\text{охл}}^{\text{BT}}$ — массовый расход охлаждающей жидкости, соответственно, в низкотемпературной и высокотемпературной системе охлаждения, кг/ч; c_p^{HT} , c_p^{BT} — соответственно средняя изобарная теплоемкость охлаждающей жидкости в низкотемпературной и высокотемпературной системе охлаждения, кДж/(кг·К); $\Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}}$, $\Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}}$ — разность температур охлаждающей жидкости на выходе из двигателя и входе в него, соответственно, для низкотемпературной и высокотемпературной системы охлаждения, К.

Мощность, затрачиваемая на привод циркуляционного насоса внутреннего контура системы охлаждения, рассчитывается по формулам:

– для низкотемпературной системы охлаждения

$$N_{\text{охл}}^{\text{HT}} = \frac{p^{\text{HT}} G_{\text{охл}}^{\text{HT}}}{\eta_v \eta_{\text{мех}}}, \quad (5)$$

– для высокотемпературной системы охлаждения

$$N_{\text{охл}}^{\text{BT}} = \frac{p^{\text{BT}} G_{\text{охл}}^{\text{BT}}}{\eta_v \eta_{\text{мех}}}, \quad (6)$$

где p^{HT} , p^{BT} — давление, соответственно, в низкотемпературной и высокотемпературной системах охлаждения, МПа; $\eta_v = 0,6 \dots 0,7$ — гидравлический КПД насоса, $\eta_{\text{мех}} = 0,7 \dots 0,9$ — механический КПД насоса (для низкотемпературной и высокотемпературной систем охлаждения значения обоих КПД могут быть приняты одинаковыми, так как конструктивно насосы, устанавливаемые в обеих системах, не отличаются).

Используя выражения (3)–(6), можно записать энергетические коэффициенты теплогидравлической эффективности:

– для низкотемпературной системы охлаждения

$$E_{\text{охл}}^{\text{HT}} = \frac{c_p^{\text{HT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}}}{p^{\text{HT}}} \eta_v \eta_{\text{мех}}; \quad (7)$$

– для высокотемпературной системы охлаждения

$$E_{\text{охл}}^{\text{BT}} = \frac{c_p^{\text{BT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}}}{p^{\text{BT}}} \eta_v \eta_{\text{мех}}. \quad (8)$$

Для сравнения теплогидравлической эффективности высокотемпературной и низкотемпературной систем охлаждения можно использовать относительный энергетический коэффициент:

$$\bar{E}_{\text{охл}} = \frac{E_{\text{охл}}^{\text{BT}}}{E_{\text{охл}}^{\text{HT}}} = \frac{c_p^{\text{BT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}} p^{\text{HT}}}{c_p^{\text{HT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}} p^{\text{BT}}}. \quad (9)$$

Оценка теплогидравлической эффективности систем охлаждения с различным температурным уровнем может быть также проведена по результатам численного моделирования процессов теплообмена с заданными граничными условиями. В качестве математической модели использовался цилиндрический канал, описанный в работе [17].

В процессе численного моделирования определялись удельная энтальпия потока жидкости h , Дж/кг:

$$h = u + \frac{p}{\rho} + e, \quad (10)$$

где u — удельная внутренняя энергия потока жидкости, Дж/кг; p — давление жидкости, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³; e — удельная кинетическая энергия потока, м²/с² (Дж/кг):

$$e = \frac{v^2}{2}, \quad (11)$$

где v — скорость потока, м/с.

Результаты

Для проведения расчетов по формуле (9) использовались данные, приводимые в литературных источниках: разность температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя и входе в него для низкотемпературных систем охлаждения $\Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}}$ — 7...15 К [3], [15], для высокотемпературных систем охлаждения $\Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}}$ — 25 ... 35 К [18], [19], давление в низкотемпературных системах охлаждения p^{HT} — 0,11 ... 0,14 МПа [3], [15], давление в высокотемпературных системах охлаждения p^{BT} — 0,25 ... 0,5 МПа [18], [19]. Средняя изобарная теплоемкость охлаждающей жидкости, в качестве которой была принята вода, определялась по справочным таблицам [20] для низкотемпературных систем охлаждения — в диапазоне 70...90 °С, для высокотемпературных систем охлаждения — в диапазоне 100 ... 130 °С. Значения теплоемкостей составили $c_p^{\text{HT}} = 4,186$ кДж/(кг·К), $c_p^{\text{BT}} = 4,235$ кДж/(кг·К). Плотность воды, соответствующая температуре потока, также определялась по таблицам, приведенным в источнике [20].

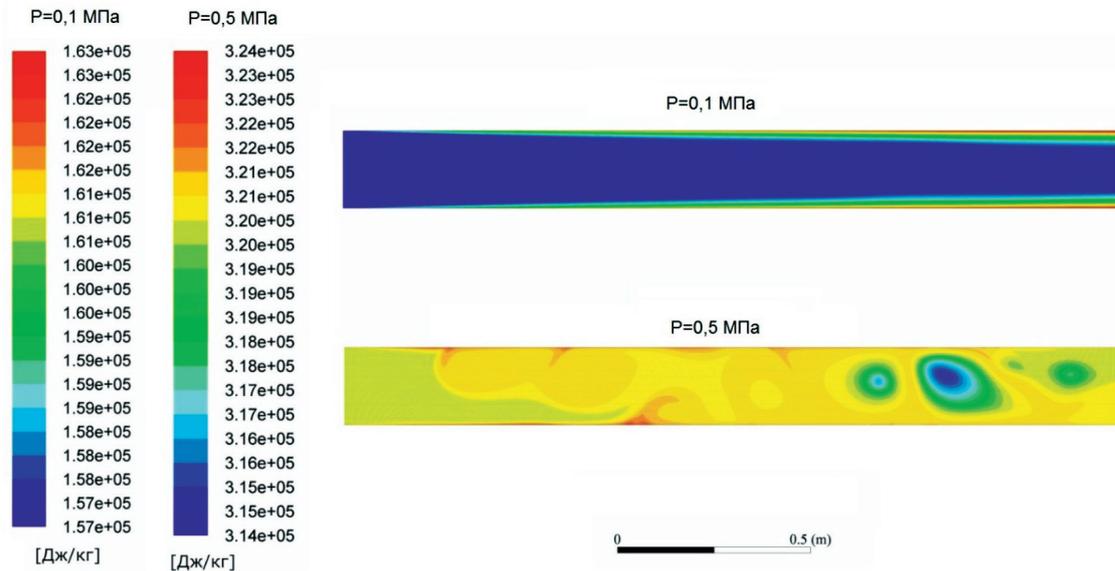
Расчеты, проведенные по формуле (9) с использованием характерных значений указанных ранее величин, позволили получить

$$\bar{E}_{\text{охл}} = \frac{E_{\text{охл}}^{\text{BT}}}{E_{\text{охл}}^{\text{HT}}} = \frac{c_p^{\text{BT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{BT}} p^{\text{HT}}}{c_p^{\text{HT}} \Delta T_{\text{охл}}^{\text{HT}} p^{\text{BT}}} = \frac{4,235 \cdot 30 \cdot 0,12}{4,186 \cdot 10 \cdot 0,3} = 1,21.$$

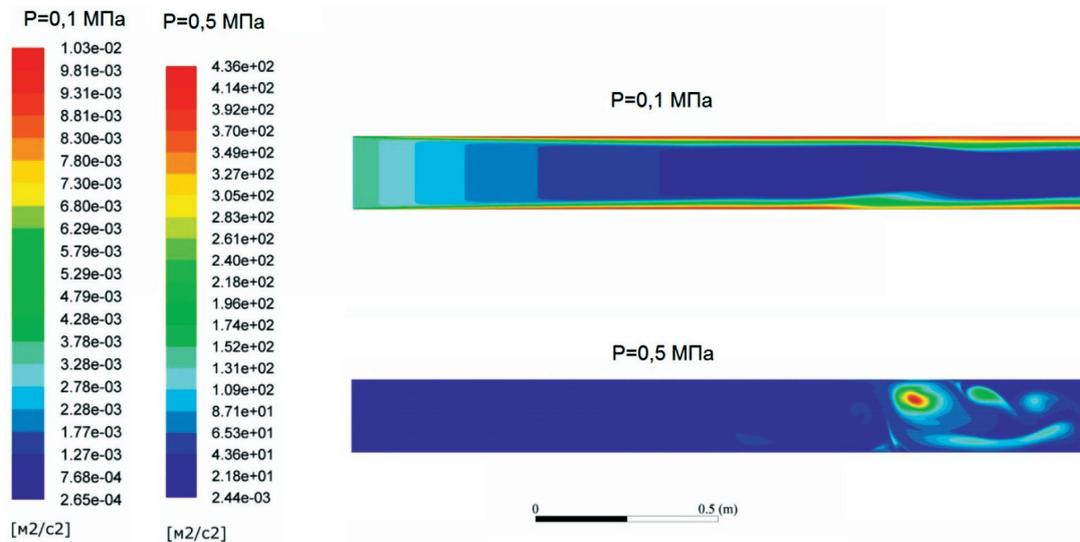
Полученный результат свидетельствует о том, что по теплогидравлической эффективности высокотемпературная система охлаждения превосходит низкотемпературную на 21 %. Аналогичные расчеты при других значениях величин из приведенных ранее диапазонов показывают, что при переходе на высокотемпературное охлаждение теплогидравлическая эффективность повышается на 20...40 %.

Результаты численного моделирования, выполненного с использованием программного продукта Autodesk CFD (распространяется свободно, Лицензионное соглашение Autodesk EULA, правообладатель Autodesk), реализующего метод конечных элементов, представлены на рисунке:

а)



б)



Распределение в потоке жидкости:

a — удельной энтальпии; *b* — удельной кинетической энергии

Результаты обработки численного моделирования с использованием формул (10) и (11) приведены в следующей таблице:

Влияние давления жидкости на удельную энтальпию и удельную внутреннюю энергию потока

Давление жидкости p , МПа	Удельная энтальпия потока h , Дж/кг	Удельная кинетическая энергия потока e , м ² /с ² (Дж/кг)	Скорость потока, соответствующая удельной кинетической энергии v , м/с	Отношение давления к плотности $\frac{p}{\rho}$, Дж/кг	Удельная внутренняя энергия потока u , Дж/кг
0,1	$1,57 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,1	100	$1,56 \cdot 10^5$
0,5	$3,20 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	4,7	530	$3,19 \cdot 10^5$

Обсуждение (Discussion)

Данные, полученные в результате численного моделирования, показывают, что удельная кинетическая энергия потока, характеризующая затраты энергии на прокачивание теплоносителя, при повышении давления в высокотемпературных системах охлаждения возрастает на 60...70 %. Учитывая, что затраты на привод циркуляционного насоса в низкотемпературных системах охлаждения составляют 0,5...1,5 % эффективной мощности двигателя [15], это возрастание (до 2...2,5 %) не окажет существенного влияния на увеличение механических потерь и снижение механического КПД. В то же время удельная внутренняя энергия потока, характеризующая интенсивность теплоотвода, обеспечиваемого потоком при увеличении давления от 0,1 МПа до 0,5 МПа, возросла в два раза. При увеличении давления до 0,25...0,3 МПа можно ожидать увеличение удельной внутренней энергии и, следовательно, повышение теплосъема с охлаждаемых поверхностей на 60 ... 70 %. Значительное увеличение скорости при повышении давления дает возможность уменьшения массового расхода теплоносителя, что подтверждается снижением габаритов теплообменных аппаратов, используемых в существующих высокотемпературных системах охлаждения дизелей.

Выводы (Conclusions)

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Данные расчетов, выполненных с использованием известных аналитических зависимостей, не противоречат результатам численного моделирования, выполненного с использованием программного продукта Autodesk CFD. Оба метода расчетов показали, что несмотря на увеличение затрат мощности на прокачивание теплоносителя, переход на высокотемпературное охлаждение повышает теплогидравлическую эффективность систем охлаждения судовых дизелей.

2. Повышение температуры охлаждающей жидкости до 120...130 °С при давлении в системе охлаждения 0,25...0,30 МПа обеспечивает повышение теплогидравлической эффективности системы охлаждения судового дизеля на 40...60 % по сравнению с традиционной низкотемпературной системой охлаждения, давление в которой составляет 0,11...0,13 МПа, а температура охлаждающей жидкости не превышает 85...90 °С. Полученный результат можно рассматривать как дополнение к известным ранее достоинствам высокотемпературного охлаждения.

3. Для наиболее полного использования эффекта повышения теплогидравлической эффективности систем высокотемпературного охлаждения судовых дизелей необходимо обеспечивать максимально возможную разность температур охлаждающей жидкости на выходе из двигателя и входе в него. Это условие может быть обеспечено путем совершенствования водо-водяных теплообменных аппаратов двухконтурных систем охлаждения судовых дизелей. Модернизация конструкции, оптимизация параметров теплообменных аппаратов и свойств теплоносителя внутреннего контура высокотемпературных систем охлаждения представляют собой перспективное направление совершенствования высокотемпературного охлаждения судовых дизелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кригер А. М. Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей / А. М. Кригер, М. Е. Дискин, А. Л. Новенников, В. И. Пикус. — М.: Машиностроение, 1985. — 176 с.
2. Петриченко Р. М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания / Р. М. Петриченко. — Л.: Машиностроение, 1975. — 224 с.
3. Иванов И. Е. Системы охлаждения поршневых ДВС: монография / И. Е. Иванов, М. Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская. — М.: МАДИ, 2015. — 168
4. Григорьев М. А. Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. — М.: Машиностроение, 1990. — 322 с.
5. Дорохов А. Ф. Моделирование теплопередачи через стенку рабочего цилиндра поршневого ДВС и управление его напряжённо-деформированным состоянием / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 1 (45). — С. 68–74.

6. Гулиев Н. Р. Анализ условий работы деталей цилиндропоршневой группы современных двигателей внутреннего сгорания / Н. Р. Гулиев [и др.] // Аграрные конференции. — 2017. — № 5 (5). — С. 19–29.
7. Ципленкин Г.Е. Уровень форсировки поршневых ДВС нового поколения / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2016. — № 1 (263). — С. 25–30.
8. Koch F. W. Cooling system development and optimization for di engines / F. W. Koch, F. G. Haubner. — SAE Technical Paper, 2000. — № 2000-01-0283. — 16 p. DOI: 10.4271/2000-01-0283.
9. Безюков О. К. Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 272 с.
10. Ливенцев Ф. Л. Высокотемпературное охлаждение поршневых двигателей внутреннего сгорания / Ф. Л. Ливенцев. — М.-Л.: Машиностроение, 1964. — 204 с.
11. Разуваев А. В. Повышение эффективности энергетических установок / А. В. Разуваев, Е. А. Соколова, Е.А. Разуваева // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — Т. 3. — № 1(46). — С. 150–159.
12. Churchill R. A. Low-Heat Rejection Engines — A Concept Review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clark, R. A. Turton // SAE transactions. — 1988. — Pp. 68–79.
13. Денисенко И. П. О возможности применения высокотемпературного охлаждения в современных поршневых двигателях внутреннего сгорания / И. П. Денисенко, Н. А. Устинов, А. А. Вандышева, М. С. Губатенко // Интернет-журнал «Науковедение». — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 64.
14. Жуков В. А. Расчетная оценка эффективности высокотемпературного охлаждения комбинированных ДВС / В. А. Жуков // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — № 10 (87). — С. 153–158.
15. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. — М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.
16. Якубович А.И. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2014. — 473 с.
17. Жуков В. А. Исследование процесса теплообмена в высокотемпературных системах охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1-1 (43). — С. 117–124.
18. Безюков О. К. Выбор параметров охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, А. А. Пуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 379–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-379-389.
19. Разуваев А. В. Поршневые двигатели внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением / А. В. Разуваев. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. — 128 с.
20. Теплотехника. Практикум / под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М.: Изд-во «Юрайт», 2017. — 395 с.

REFERENCES

1. Kriger, A. M., M. E. Diskin, A. L. Novennikov, and V. I. Pikus. *Zhidkostnoe okhlazhdenie avtomobil'nykh dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1985.
2. Petrichenko, R. M. *Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya bystrokhodnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. L.: Mashinostroenie, 1975.
3. Ivanov, I. E., M. G. Shatrov, and T.Yu. Krichevskaya. *Sistemy okhlazhdeniya porshnevykh DVS: monografiya*. M.: MADI, 2015.
4. Grigor'ev, M. A., and V. A. Doletskii. *Obespechenie nadezhnosti dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1990.
5. Dorokhov, A. F. “Heat transfer through the walls of the piston ice working cylinder simulation and management of its stress-strain condition.” *Modern technologies system analysis modeling* 1(45) (2015): 68–74.
6. Guliev, N. R., V. A. Ryzhov, E. V. Korobov, and D. A. Nikitin. “Analiz uslovii raboty detalei tsilindroporshnevoi gruppy sovremennykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya.” *Agrarnye konferentsii* 5(5) (2017): 19–29.
7. Tsyplenkin, G. E., and V. I. Iovlev. “New Generation Reciprocating Engines: Boost Level.” *Dvigatelistroenie* 1(263) (2016): 25–30.
8. Koch, Franz W., and Frank G. Haubner. *Cooling system development and optimization for di engines*. No. 2000-01-0283. SAE Technical Paper, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-0283

9. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O.Makarova, 2015.
10. Liventsev, F. L. *Vysokotemperaturnoe okhlazhdenie porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.-L.: Mashinostroenie, 1964.
11. Razuvayev, Aleksander Valentinovich, Elena Anatolievna Sokolova, and Elizaveta Aleksandrovna Razuvayeva. "Efficiency increase of power plants." *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3.1(46) (2010): 150–159.
12. Churchill, Randolph A., James E. Smith, Nigel N. Clark, and Richard A. Turton. "Low-Heat Rejection Engines—A Concept Review." *SAE transactions* (1988): 68–79.
13. Denisenko, Irina Petrovna, Nikolai Andreevich Ustinov, Anna Aleksandrovna Vandysheva, and Mark Sergeevich Gubatenko. "The possibility of using of the high-temperature cooling in the modern reciprocating internal combustion engines." *The Eurasian Scientific Journal* 9.2 (2017): 64.
14. Zhukov, V. A. "Raschetnaya otsenka effektivnosti vysokotemperaturnogo okhlazhdeniya kombinirovannykh DVS." *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* 10(87) (2011): 153–158.
15. Orlin, A. S., and M. G. Kruglov, eds. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Sistemy porshnevnykh i kombinirovannykh dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1985.
16. Yakubovich, A. I., G. M. Kukharenok, and V.E. Tarasenko. *Sistemy okhlazhdeniya traktornykh i avtomobil'nykh dvigatelei*. Minsk: Novoe znanie; M.: INFRA-M, 2014.
17. Zhukov, Vladimir A., Valery N. Polovinkin, Valery V. Medvedev, and Andrey A. Puljaev. "Study of process of heat exchange in the high temperature cooling systems marine diesel engines." *Marine Intellectual Technologies* 1-1(43) (2019): 117–124.
18. Bezjukov, Oleg K., Vladimir A. Zhukov, and Andrej A. Pulyaev. "The choice of cooling parameters for marine diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 379–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-379-389.
19. Razuvaev, A. V. *Porshnevye dvigateli vnutrennego sgoraniya s vysokotemperaturnym okhlazhdeniem*. Saratov: Sarat. gos.tekhn. un-t, 2001.
20. Erofeev, V. L., and A. S. Pryakhin. *Teplotekhnika. Praktikum*. M.: Izd-vo Yurait, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич — доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Пуляев Андрей Араратович — аспирант
Научный руководитель:
Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Ерофеев Валентин Леонидович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov, Vladimir A. — Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Pulyaev, Andrej A. — Postgraduate
Supervisor:
Zhukov, Vladimir A.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Erofeyev, Valentin L. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121

WAYS TO REDUCE THE AMOUNT OF PARTICULATE MATTER IN THE EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL ENGINES IN SHIP POWER PLANTS

N. N. Gorlova, G. V. Medvedev, O. G. Kuzmina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

Burning the liquid fuel in a marine internal combustion engine, which is part of a marine power plant, entails the formation of particulate matter of carbon origin (soot). Particulate matter emitted into the environment cause a significant negative impact on all components of the environment and harm to human health. The use of catalytic purification of exhaust gases using porous permeable catalytic materials can reduce the amount of emitted particles and reduce the burden on the environment. The use of self-propagating high-temperature synthesis in the preparation of porous permeable catalytic materials allows the formation of material properties that provide an acceptable degree of purification of exhaust gases of marine diesel engines from solid particles. The decrease in the concentration of solid particles as a result of the use of catalytic treatment is carried out as a result of the fact that solid particles in the polluted gas passing through the porous structure of used material are retained in the pores and burn out at high temperature. Ensuring high-quality purification of exhaust gas from solid particles depends on a certain pore size, porosity, tortuosity and other properties of the catalytic material. In order to determine the qualitative and quantitative composition of the porous permeable catalytic material used in the purification system, the studies on ilmenite ore-based samples are conducted. Such material, due to the use of ilmenite grinding ore as the basis of the charge, allows us to reduce the cost of catalytic material in comparison with materials that use refined components. The effect of changes in pore diameter, porosity of the catalytic material and the amount of ilmenite ore grinding in the composition of the mixture on the degree of purification of exhaust gases from solid particles is studied. The results are obtained for the first time and described by the least squares method. The results of the study allowed us to determine an acceptable amount of ilmenite ore in the composition of the catalytic material, which permit to reduce the concentration of solid particles in the exhaust gases of marine diesel engines.

Keywords: catalysts, catalytic neutralization, quality of treatment, neutralization, ilmenite ore, vessel, particulate matter, power plant.

For citation:

Gorlova, Nina N., Gennady V. Medvedev, and Olga G. Kuzmina. "Ways to reduce the amount of particulate matter in the exhaust gases of marine diesel engines in ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 115–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121.

УДК 629.5.03:502.1

ПУТИ СНИЖЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ В СОСТАВЕ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, О. Г. Кузьмина

Алтайский государственный технический университет им И. И. Ползунова,
Барнаул, Российская Федерация

Отмечается, что сжигание жидкого топлива в судовом двигателе внутреннего сгорания, входящее в состав судовой энергетической установки, влечет за собой образование твердых частиц углеродного происхождения (сажа). Выбрасываемые твердые частицы в окружающую среду наносят существенное негативное влияние на все составляющие окружающей среды и вред здоровью человека. Рассмотрено использование каталитической очистки отработавших газов с применением пористых проницаемых каталитических материалов, позволяющее сократить количество выбрасываемых твердых частиц и снизить

нагрузку на окружающую среду. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при получении пористых проницаемых каталитических материалов позволяет формировать такие свойства материала, которые обеспечивают приемлемую степень очистки отработавших газов судовых дизелей от твердых частиц. Снижение концентрации твердых частиц в результате использования каталитической очистки осуществляется в результате того, что твердые частицы в загрязненном газе, проходя через пористую структуру используемого материала, задерживаются в порах и сгорают при высокой температуре. Обеспечение качественной очистки отработавшего газа от твердых частиц зависит от определенного размера пор, пористости, извилистости и других свойств каталитического материала. С целью определения качественного и количественного состава используемого в системе очистки пористого проницаемого каталитического материала проведены исследования на образцах на основе руды ильменит. Такой материал за счет использования в основе шихты размола руды ильменит позволяет сократить затраты на каталитический материал по сравнению с материалами, в составе которых используются очищенные компоненты. Изучено влияние изменения диаметра пор, пористости каталитического материала и количества размола руды ильменит в составе шихты на степень очистки отработавших газов от твердых частиц. Полученные результаты были получены впервые и описаны методом наименьших квадратов. Результаты исследования позволили определить приемлемое количество руды ильменит в составе каталитического материала, позволяющее снизить концентрацию твердых частиц в отработавших газах судовых дизелей.

Ключевые слова: катализаторы, каталитическая нейтрализация, качество очистки, нейтрализация, руда ильменит, судно, твердые частицы, энергетическая установка.

Для цитирования:

Горлова Н. Н. Пути снижения количества образующихся твердых частиц в отработавших газах судовых дизелей в составе судовых энергетических установок / Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, О. Г. Кузьмина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 115–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121.

Введение (Introduction)

Течение преобразования энергии топлива в работу в цилиндре дизеля сопутствует образованию отработавших газов, которые представляют собой смесь ингредиентов в газовой, паровой и твердой фазах. Всего в отработавших газах судовых энергетических установок (СЭУ) с помощью всевозможных приборов и методов анализа обнаружено около 1000 компонентов [1], [2]. К токсичным веществам, образующимся в результате сжигания жидкого топлива, относятся: оксид азота (NO_x), образующийся при температуре более 1500 °С, становится при этом активным с точки зрения химии газом; оксиды серы, являющиеся продуктами окисления меркаптановой серы жидкого топлива; оксиды углерода, являющиеся продуктами сгорания углеводородного топлива; углеводороды и твердые частицы, являющиеся продуктами неполного сгорания жидкого топлива.

Особую опасность представляют твердые частицы в составе отработавших газов судовых дизелей. Высокий уровень содержания твердых частиц может привести к развитию рака легких. Так, твердые частицы размером менее 10 мкм (PM 10) в 7 раз тоньше человеческого волоса при вдыхании обходят естественную защиту органов дыхания, проникая в легкие.

Выбрасываемые в большом количестве отработавшие газы оказывают серьезное отрицательное влияние не только на человека, но и на все составляющие окружающей среды [3]–[5]. Одной из важных проблем представляется определение способов и материалов, позволяющих снизить выбросы продуктов сгорания жидкого топлива (твердых частиц) до допустимого предела.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наиболее результативным методом сокращения концентрации выбрасываемых твердых частиц является каталитическая очистка с применением пористых проницаемых СВС — каталитических материалов [6], [7]. В трудах В. Н. Красова, В. В. Евстигнеева, О. А. Лебедевой, Г. Ю. Филиппова, В. И. Пролубникова, А. Л. Новоселова описано использование каталитических материалов на основе окалина стали, полученных с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Достаточно подробно изучен каталитический материал на основе отходов металлообработки — окалины легированной стали. Недостатком такого каталитического материала представляется содержание весомого количества (21,07...21,39 %) масс дорогих ингредиентов (хрома, алюминия, никеля, иридия и родия), которые вносятся в очищенном виде для осуществления СВС [8]. Это, в свою очередь, является фактором повышения стоимости получаемых изделий и, как следствие, высокой стоимости очистки отработавших газов от вредных веществ. Решить проблему исключением хрома, алюминия, никеля из состава шихты невозможно вследствие специфики прохождения СВС, что приведет к нестойчивому горению и ухудшению свойств получаемого каталитического материала. В связи с этим изучена возможность использования такого состава шихты, который позволит гарантировать необходимые качества получаемого каталитического материала в результате эффективного протекания СВС [9].

В работе [10] рассмотрена возможность получения пористого проницаемого СВС — каталитического материала с замещением дорогих ингредиентов в шихте размолом руд, содержащих необходимые элементы для обеспечения СВ-синтеза и обеспечивающих получение материала с необходимыми свойствами и характеристиками каталитического материала.

В качестве компонента, заменяющего дорогие ингредиенты в составе шихты пористого проницаемого СВС-каталитического материала, предложено применение руды *ильменита* [11], представляющей собой титанистый железняк, имеющий в своем составе $FeTiO_3$, SiO_2 , Al и другие элементы, на основе которых возможно формирование скелетной структуры пористого проницаемого каталитического материала.

Результаты (Results)

Определено, что увеличение количества в шихте размола руды ильменита 1–5-го состава способствует изменению характеристик и качества полученного каталитического материала, приведенных в таблице, где представлены данные по основным составам шихты, без указания технологических допусков. Вычисление узловых точек полигона распределения показателей характеристик каталитического материала осуществлялось *методом экстраполяции*.

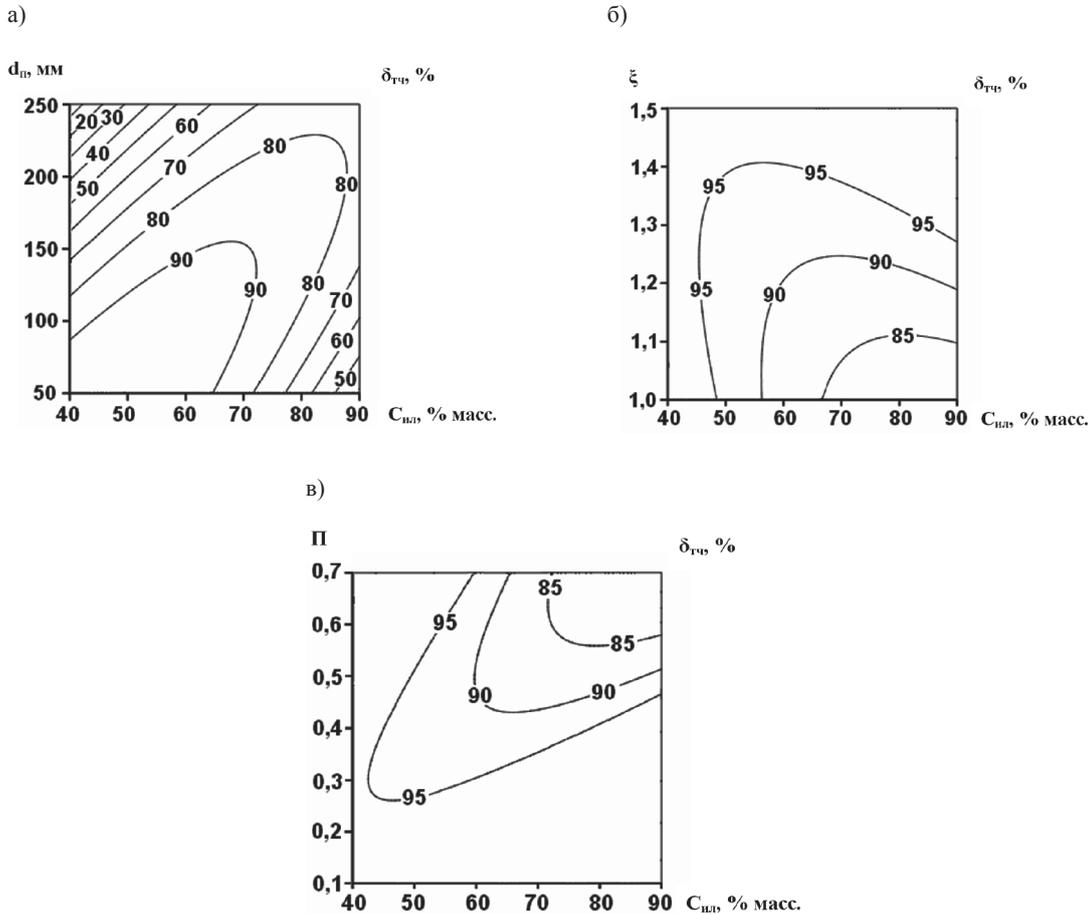
Очистка отработавших газов от твердых частиц с использованием каталитической нейтрализации реализуется во многом за счет прохождения отработавших газов сквозь пористую проницаемую текстуру каталитического материала, а также в результате догорания. Поэтому применяемые при каталитической очистке материалы должны иметь подходящие физические характеристики: средний приведенный диаметр пор, извилистость и пористость [12]. В связи с этим проведены опытные исследования по изучению связи степени очистки от твердых частиц ($\delta_{тч}$) отработавших газов СЭУ от диаметра пор (d_p), извилистости (ξ), пористости (Π) и содержания ключевого компонента — руды ильменит ($C_{ил}$). Оценка содержания твердых частиц в отработавших газах (дымности) проводилась фильтрационным способом по ГОСТу Р 51250–99 с последующим вычислением степени очистки отработавших газов от твердых частиц.

Свойства и характеристики каталитического материала на основе руды ильменит

Показатели	Варианты состава шихты				
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Ильменит (руда), %, по массе	71,69	66,86	64,35	61,40	55,42
Приведенный диаметр пор (средний), мкм	164	158	149	139	125
Извилистость пор	1,19	1,21	1,24	1,28	1,32
Удельная поверхность, м ² /г	137	126	116	108	100
Пористость	0,48	0,475	0,43	0,38	0,34
Прочность при сжатии, МПа	13,0	11,3	10,1	8,3	7,1
Прочность при изгибе, МПа	3,3	3,0	2,9	2,8	2,6
Потеря массы в смеси кислот, %	11,0	11,1	11,9	12,6	13,0

Обсуждение (Discussion)

Результаты изучения связи степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ (ЗД6 (6Ч 15/18) на номинальном режиме) от среднего приведенного диаметра пор и доли руды ильменит в шихте для получения каталитического СВС-материала представлены на рисунке *a*.



Зависимость степени очистки от твердых частиц ($\delta_{т.ч}$) отработавших газов СЭУ:

a — от среднего приведенного диаметра пор d_p и доли руды ильменит $C_{илл}$ в шихте для получения пористого каталитического материала;

б — от извилистости пор ξ и доли руды ильменит $C_{илл}$ для получения СВС-материала;

в — от пористости (P) и доли руды ильменит ($C_{илл}$) для получения пористого каталитического материала

Поскольку ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов дизеля СЭУ от среднего приведенного диаметра пор и доли руды ильменит в составе каталитического материала, они представляются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, % были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,98:

$$\delta_{т.ч} = 55,522 + 2,550C_{илл} - 0,553d_p - 0,033963C_{илл}^2 - \\ - 0,001519d_p^2 + 0,013309C_{илл}d_p.$$

О наличии контакта отработавших газов с поверхностью каталитического материала косвенно свидетельствует извилистость пор. Проведенные в работе исследования (см. рисунок *б*) позволили выявить степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от извилистости пор и доли руды ильменит для получения пористого СВС-материала.

Поскольку ранее в научно-технической литературе не были приведены зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от извилистости пор и доли руды ильменит

в шихте каталитического материала, они представляются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, %, были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,96:

$$\delta_{т.ч} = 269,092 - 2,918C_{ил} - 158,426\xi + 0,008469C_{ил}^2 + 38,330770\xi^2 + 1,393368C_{ил}\xi.$$

Свойства и характеристики каталитического материала во многом зависят от его пористости. В ходе проведенных опытных изучений определено влияние доли руды ильменит в шихте на пористость каталитического материала и обеспечение наилучшей степени очистки отработавших газов СЭУ от твердых частиц (см. рисунок в).

Ввиду того, что в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от пористости и доли руды ильменит в составе для получения пористого проницаемого СВС-каталитического материала, они являются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, %, были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,96:

$$\delta_{т.ч} = 101,487 - 0,452C_{ил} + 44,586\Pi + 0,011458C_{ил}^2 + 103,218410\Pi^2 - 2,459753C_{ил}\Pi.$$

Заключение (Conclusion)

Из приведенных зависимостей на рисунках а–в видно, что изменение доли руды ильменит в составе шихты в интервале 71,69...55,42 % по массе приводит к уменьшению среднего приведенного диаметра пор каталитического материала 164–125 мкм, увеличению извилистости от 1,19 до 1,32 и сокращению пористости в интервале 0,48–0,34 и обеспечивает степень очистки от твердых частиц в интервале 88,5...91,5%. Наиболее приемлемым является состав шихты с долей руды ильменит на уровне 66,86 % по массе, гарантирующий $\delta_{т.ч} = 89,5$ % при $d_{п} = 158$ мкм, $\xi = 1,21$, $\Pi = 0,475$.

Приемлемая доля руды ильменит в составе шихты для синтеза пористого проницаемого СВС-каталитического материала ($C_{ил} = 66,86$ % по массе) обеспечивает приемлемые свойства и характеристики используемого материала, что позволят использовать пористый проницаемый материал в качестве каталитического в системах очистки отработавших газов СЭУ от других вредных веществ.

В результате проведенных опытных изысканий была выявлена зависимость степени очистки отработавших газов СЭУ от твердых частиц с использованием каталитического материала на основе руды ильменит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормирование вредных выбросов судовыми двигателями. Состояние и перспективы. (материалы конгресса СИМАС–2016) // Двигателестроение. — 2018. — № 4 (274). — С. 40–56.
2. Живлюк Г. Е. Анализ возможностей снижения выбросов вредных веществ, эксплуатируемых СДЭУ / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2015. — № 1 (259). — С. 30–34.
3. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — Кн. III, пересмотр. изд. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — 336 с.
4. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
5. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

6. Панчишный В. И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей / В. И. Панчишный // Двигателестроение. — 2005. — № 2 (220). — С. 35–42.

7. Медведев Г. В. Металлокерамические фильтры очистки токсичных газов: водный транспорт: монография / Г. В. Медведев; под ред. В. П. Горелова. — М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. — 247 с. DOI: 10.23681/459342.

8. Новоселов А. Л. Материалы, используемые для очистки отработавших газов дизелей с целью снижения нагрузки на окружающую среду / А. Л. Новоселов, Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова, Д. С. Печеникова, Н.Н. Горлова // 7-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. — М.: МАДИ, 2015. — С. 147–148.

9. Новосёлова Т. В. Получение пористых металлокерамических материалов с использованием руд полиметаллов / Т. В. Новосёлова, Н. П. Тубалов, А. В. Маецкий // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. — Create Space, 2017. — С. 150–152.

10. Горлова Н. Н. Зависимость степени очистки отработавших газов судовых дизелей от физических характеристик и коррозионных свойств пористых проницаемых каталитических материалов / Н. Н. Горлова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2018. — № 2. — С. 94–97.

11. Пат. 2615672 Российская Федерация, МПК В22F 3/23, С22С 1/05, С22С 29/12, С04В 38/00. Шихта с рудой ильменита для получения пористого проницаемого каталитического материала / А. Е. Бакланов, Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, А. А. Ситников; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). — № 2015150641; заявл. 25.11.2015; опубл. 06.04.2017.

12. Камышов Ю. Н. Система очистки отработавших газов дизелей судовых энергетических установок на основе пористых проницаемых коррозионностойких материалов / Ю. Н. Камышов, Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S2. — С. 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197.

REFERENCES

1. “Normirovanie vrednykh vybrosov sudovymi dvigatelyami. Sostoyanie i perspektivy. (materialy kongressa CIMAC-2016).” *Dvigatelistroyeniye* 4(274) (2018): 40–56.

2. Jivlyuk, G. E., and A. P. Petrov. “Reserves of Improvement in Emission Performance of Marine Diesel Engines.” *Dvigatelistroyeniye* 1(259) (2015): 30–34.

3. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. SPb.: ZAO «TsNI-IMF», 2012.

4. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

5. Ivanchenko, A. A., A.P. Petrov, and G.E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112

6. Panchishnyi, V. I. “Neutralisation of Nitrogen Oxides in Engine Exhaust Gases.” *Dvigatelistroyeniye* 2(220) (2005): 35–42.

7. Medvedev, G. V. *Metallokeramicheskie fil'try ochistki toksichnykh gazov: vodnyi transport: monografiya*. Edited by V.P. Gorelov. M.; Berlin: Direkt-Media, 2017. DOI: 10.23681/459342

8. Novoselov A. L., G. V. Medvedev, N.N. Gorlova, D.S. Pechennikova, and N.N. Gorlova. “Materials used for cleaning exhaust gases of diesel engines in order to reduce the load on the environment.” *7-e Lukaninskie chteniya. Reshenie energo-ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse: tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchn.-tekhnich. konf.* M.: MADI, 2015. 147–148.

9. Novoselova, T. V., N. P. Tubalov, and A. V. Maetskii. “Poluchenie poristykh metallokeramicheskikh materialov s ispol'zovaniem rud polimetallov.” *21 vek: fundamental'naya nauka i tekhnologii: materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. CreateSpace, 2017. 150–152.

10. Gorlova, Nina N. “Dependence of the marine diesels’ exhaust gases purification efficiency from physical characteristics and corrosion properties of porous permeable catalytic materials.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 2 (2018): 94–97.

11. Baklanov, A. E., N. N. Gorlova, G. V. Medvedev, and A. A. Sitnikov. RU 2615672, IPC B 22F 3/23, C 22C

1/05, С 22С 29/12, С 04В 38/00. Shixta s rudoj il`menita dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala. Russian Federation, assignee. Publ. 6 April 2017.

12. Kamyshev, Yury N., Gennady V. Medvedev, and Nina N. Gorlova. "Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials." *Transactions of the Krylov State Research Centre S2* (2019): 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горлова Нина Николаевна —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Gnn.09@mail.ru

Медведев Геннадий Валериевич —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Genatswaly@mail.ru

Кузьмина Ольга Григорьевна —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Kuzmina_leya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorlova, Nina N. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Gnn.09@mail.ru

Medvedev, Gennady V. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Genatswaly@mail.ru

Kuzmina, Olga G. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Kuzmina_leya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2019 г.

Received: December 29, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138

TECHNICAL SUPPORT FOR SHIP POWER PLANTS COMPLIANCE WITH THE NEW REQUIREMENTS FOR NITROGEN OXIDE EMISSIONS IN 2021

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It is expected that since 2021, at the initiative of the International Maritime organization, the control zones for nitrogen oxide emissions in the exhaust gases of ship power plants will be expanded to cover the regions of the Baltic and North Seas. In such circumstances, shipowners operating in these regions, at the stages of modernization and construction of new ships inevitably face the problem of choosing a way to meet the new requirements. The following variants of compliance are considered: selective catalytic reduction of nitrogen oxides; application of exhaust gas recirculation system; use of alternative fuels, as well as a number of technical solutions related to the direct impact on the working process of the engine, aimed at reducing the emission of nitrogen oxides. It is noted that the consideration of various technologies to meet the new requirements and analysis of their advantages and disadvantages will create prerequisites for the choice of the concept and the way to achieve the requirements of the environmental standard TIER III, used in emission control zones. Attention is drawn to the fact that in order to achieve the requirements of the TIER III standard, first of all, the systems of selective catalytic recovery and exhaust gas recirculation are considered as the most proven technologies. In conclusion, it is noted that ensuring the environmental requirements of the TIER III standard for a wide range of operating modes of the ship's power plant is a complex task, the solution of which can be achieved during the engine design by the simultaneous implementation of various technologies to reduce NOx emissions. The increased demand for TIER III engines can be expected to provide additional motivation for manufacturers to find and implement new design solutions aimed at reducing the content of nitrogen oxides in exhaust gases, as well as to refine and make more extensive use of already known methods to combat NOx emissions.

Keywords: marine power plant, environmental safety, IMO requirements, NOx emission, control zones, compliance methods, selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation, alternative fuels, choice of option.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Technical support for ship power plants compliance with the new requirements for nitrogen oxide emissions in 2021." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.

УДК 621.43.074

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СООТВЕТСТВИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ 2021 г. ПО ВЫБРОСАМ ОКСИДОВ АЗОТА

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что с 2021 г., по инициативе Международной морской организации, зоны контроля эмиссии оксидов азота в отработавших газах судовых энергетических установок будут расширены и распространятся на регионы Балтийского и Северного морей. В таких условиях судовладельцы, осуществляющие деятельность в указанных регионах, на этапах модернизации и постройки новых судов неизбежно столкнутся с проблемой выбора способа соответствия новым требованиям. В качестве вариантов соответствия в данном исследовании рассмотрены: селективное каталитическое восстановление оксидов азота; применение системы рециркуляции отработавших газов; использование альтернативных видов топлива, а также ряд технических решений, связанных с непосредственным воздействием на рабочий

процесс двигателя, направленных на уменьшение эмиссии оксидов азота. Отмечается, что рассмотрение различных технологий соответствия новым требованиям и анализ их преимуществ и недостатков позволит создать предпосылки для выбора концепции и способа достижения требования экологического стандарта TIER III, применяемого в зонах контроля эмиссии. Обращается внимание на то, что для достижения требований стандарта TIER III, в первую очередь, рассматриваются системы селективного каталитического восстановления и рециркуляции отработавших газов как наиболее апробированные технологии. В заключение отмечается, что обеспечение экологических требований стандарта TIER III для широкого диапазона эксплуатационных режимов работы судовой энергетической установки представляется комплексной задачей, решение которой может достигаться в конструкции двигателя одновременной реализацией различных технологий сокращения выбросов NO_x . Можно ожидать, что повышенный спрос на двигатели, соответствующие стандарту TIER III, создаст дополнительную мотивацию заводам-изготовителям к поиску и внедрению новых конструкторских решений, направленных на понижение содержания в отработавших газах оксидов азота, а также доработку и более широкое использование уже известных способов борьбы с эмиссией NO_x .

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, требования ИМО, эмиссия NO_x , зоны контроля, способы соответствия, селективное каталитическое восстановление, рециркуляция отработавших газов, альтернативные виды топлива, выбор варианта.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 г. по выбросам оксидов азота / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.

Введение (Introduction)

В Международной судоходной отрасли происходит постоянное ужесточение нормативно-правовой базы на ограничения выбросов в атмосферу. Основным генератором экологически вредных веществ является энергетическая установка судна. В результате сгорания углеводородного топлива в тепловом двигателе образуется ряд веществ, оказывающих негативное влияние на состояние воздушного бассейна. К таким веществам относятся: парниковые газы, являющиеся естественными и полными продуктами окисления, оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды, оксиды серы (при наличии серы в топливе), твердые частицы, сажа. Наибольшую часть эмиссии вредных веществ с отработавшими газами поршневого ДВС составляют оксиды азота.

В целях минимизации вредного воздействия отработавших газов производится регламентирование выбросов путем введения экологических стандартов. Регулирование на водном транспорте введено Международной морской организацией (International Maritime Organization — IMO) начиная с 2000 г. Эмиссия вредных веществ с отработавшими газами ограничивается Прил. VI «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов» (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships — MARPOL 73/78), принятым в первой редакции в 1997 г. Одновременно ИМО был разработан и принят «Технический кодекс по выбросам оксидов азота судовых дизелей». В соответствии с Правилем 13 Прил. VI^{1,2} все суда валовой вместимостью более 400 т постройки после 1 января 2000 г. должны проходить освидетельствование и получать Международное свидетельство по предотвращению загрязнения атмосферы (International Air Pollution Prevention Certificate — IAPP) сроком на 5 лет. Дополнительно каждый судовой дизель мощностью более 130 кВт должен пройти освидетельствование и получить на 5 лет Международное свидетельство по предотвращению загрязнения атмосферы (Engine International Air Pollution Prevention Certificate — EIAPP). Значительно более жесткие требования по ограничению выбросов оксида азота действуют с 2016 г. для судов, которые были заложены после 1 января 2016 г. и работают в зоне контроля выбросов в Северной Америке и США (Карибский бассейн). Такие суда должны соответствовать предельным уровням выбросов по стандарту Tier III. Это означает, что

¹ Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx).

² New requirements for NOx emissions for vessels engaged in Chinese domestic trade. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/news/new-requirements-for-nox-emissions-for-vessels-engaged-in-chinese-domestic-trade-125086>.

судовые энергетические установки должны выбрасывать на 80 % меньше NO_x , чем установки, соответствующие требованиям 2000 г.¹. Ожидается, что с 2021 г. аналогичные ограничения будут распространяться также на Северное и Балтийское море для судов, которые будут заложены после 1 января 2021 г. [1]². В связи с ранее изложенным судовладельцы должны на этапе планирования своей дальнейшей деятельности и нового строительства тщательно продумать будущую эксплуатацию своих судов. Необходимо понимать значение различных технологических решений для сокращения выбросов NO_x и способы выполнения требований, поскольку они могут явиться основными факторами успеха любого нового плана судостроения.

Целью статьи являются анализ технологий для достижения судами требований уровня Tier III по NO_x и оценка эффективности принимаемых технических решений.

Для проведения дальнейшего анализа необходимо предварительно рассмотреть основные нормативно-правовые аспекты технического регулирования сокращения выбросов оксидов азота, на основании которых будет выполнена оценка эффективности существующих технологий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нормативно-правовые акты технического регулирования. Главным нормативным документом, регламентирующим выбросы основных загрязнителей воздуха, содержащихся в отработавших газах судов, включая оксиды серы (SO_x) и оксиды азота, является принятое в 1997 г. Прил. VI к MARPOL 73/78 (привязка к стандарту Tier I, см. рис. 1) — первый этап. На втором этапе, начиная с 2008 г., после пересмотра Прил. VI к MARPOL, Международная морская организация приняла решение о введении дополнительных ограничений на выбросы NO_x . На этом этапе (уровень Tier II) предусматривалось сокращение выбросов NO_x примерно на 20 % по сравнению со значениями, полученными в соответствии с требованиями Tier I.

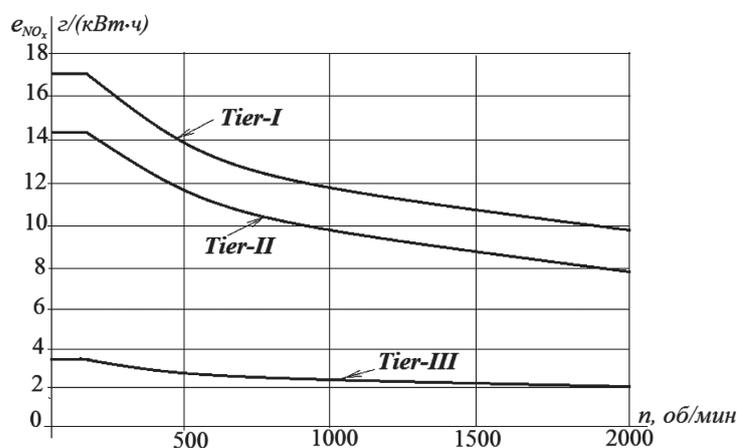


Рис. 1. Уровень выбросов основных загрязнителей воздуха стандартов различных уровней надежности

Дальнейшая регламентация снижения (порядка 80 %) выбросов NO_x (Tier-III) относится к определенной дате (1 января 2016 г.) закладки киля и области деятельности судна (зона контроля эмиссии оксидов азота (NO_x Emission Control Areas — NECA)). На третьем этапе были выявлены серьезные проблемы для производителей двигателей, операторов судов и сертификационных органов как с технической, так и с эксплуатационной точки зрения, поскольку достижение уровня Tier III без использования специальных технологий практически неосуществимо. В этой связи Морской комитет по охране окружающей среды (Maritime Environmental Protection Committee

¹ Shipping's impact on air quality. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.transportenvironment.org/what-we-do/shipping-and-environment/shipping%E2%80%99s-impact-air-quality>.

² Impact of a nitrogen emission control area (NECA) for ship traffic on the future air quality in the Baltic Sea region. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.5500K/abstract/>.

(МЕРС)) ИМО опубликовал Резолюцию МЕРС.198 (62)¹ [1], [2] и Резолюцию с поправками ИМО (МЕРС.260 (68))^{2,3} [3] для сертификации селективного каталитического восстановления (Selective Catalytic Reduction (SCR)) как наиболее эффективного, не требующего изменения конструкции двигателя способа очистки отработавших газов от оксидов азота. В обеспечение единого понимания этих документов для большинства признанных организаций Международная ассоциация классификационных обществ (International Association of Classification Societies (IACS)) опубликовала в 2015 г. интерпретации этих руководящих принципов⁴ [4], [5].

Таким образом, под ограничения стандарта Tier III подпадают только те суда, которые были построены (дата закладки киля) после 1 января 2016 г. и работают на севере в американских и / или американских Карибских морях (зоны NECA). Ожидается, что с 1 января 2021 г. зона NECA будет распространяться на Северное и Балтийское море (рис. 2). При этом суда более поздней постройки, не предназначенные для работы в этих зонах, не подпадают под требования стандарта Tier III, но должны соответствовать ограничениям на выбросы стандарта Tier II, которые были приняты в 2011 г. Одновременно следует отметить, что Китай также работает над приложением для NECA и намерен направить предложения в ИМО до 2020 г. В настоящее время объем требований и региональное расширение для новых зон контроля все еще находятся в стадии обсуждения.



Рис. 2. Распределение зон контроля эмиссии NO_x (NECA)

Особенности применения стандарта Tier III. Техническое регулирование стандарта Tier III распространяется на следующие суда:

- с двигателями мощностью более 130 кВт;
- с датой закладки киля после 1 января 2016 г. при условии, что суда работают в зонах контроля эмиссии Северной Америки и / или Карибском бассейне;
- с датой закладки киля после 1 января 2021 г., если зона деятельности судов затрагивает бассейн Северного и Балтийского морей.

В случаях, если судно не используется в NECA, к нему применяется стандарт Tier-II.

Необходимо отметить, что ранее изложенное относится только к судам без флага США. Для судов под американским флагом все двигатели, установленные на борту, должны соответствовать

¹ Бюллетень № 14 изменений и дополнений к Конвенции МАРПОЛ 73/78 и резолюций Комитета ИМО по защите морской среды от загрязнения с судов. СПб: ЦНИИМФ, 2012. 192 с.

² НД 2-030101-025. Руководство по применению положений технического кодекса по контролю выбросов окислов азота из судовых дизельных двигателей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2016. 126 с.

³ НД №2-030101-009. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. 313 с.

⁴ SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawing from European experiences – Delft: CE Delft, 2016. 45 p.

стандарту Tier III. Правительство США занимает позицию, согласно которой все двигатели (главные двигатели, вспомогательные двигатели, аварийный генератор и т. д.), установленные в соответствии с «Международной конвенцией по безопасности» (Safety of Life at Sea (SOLAS) [6] на борту судна постройки 2016 г. и позже, должны быть сертифицированы в соответствии с требованиями стандарта Tier III. При этом допускается ситуация, когда судно, построенное после 2016 г., имеет один или несколько двигателей, не сертифицированных по стандартам Tier III. В этих случаях владелец / оператор судна должен быть готов доказать, что эти двигатели не использовались и не будут использоваться в пределах NECA для Северной Америки и в Карибском море.

В общем случае, когда возникает необходимость замены двигателя в ходе модернизации судна постройки до 2016 г., работающего в зоне NECA, неидентичная замена двигателя должна соответствовать стандартам IMO Tier III. Однако существует ряд случаев, когда допустима замена двигателя моделью образца, аналогичного экологического уровня. К ним относятся следующие:

- подходящий новый двигатель, соответствующий требованиям стандарта Tier III, не является коммерчески доступным;
- для приведения подменного двигателя в соответствие стандарту Tier III необходима установка устройств для сокращения эмиссии NO_x , которые из-за своих габаритов не могут быть установлены в ограниченных пространствах на борту судна;
- установка дополнительного технологического оборудования вызовет значительное тепловыделение в машинном отделении, устранить воздействие которого будет невозможно;
- замена двигателя с технологическим оборудованием увеличит потребление энергии судовой электростанции сверх установленной мощности;
- конструктивные изменения, связанные с заменой, повлекут за собой ослабление структурной стабильности судна ниже приемлемого уровня;
- для реализации концепции SCR потребуются чрезмерная по конструктивным соображениям емкость хранения мочевины, разместить которую не представляется возможным;
- в случае использования SCR вес энергетической установки будет увеличен сверх допустимого;
- характеристики двигательной установки в результате замены двигателя не будут способны обеспечить сопоставимую маневренность или управляемость судна;
- некоторые другие случаи.

При возникновении рассмотренных ранее ситуаций отсутствия возможности замены двигателя судовладелец должен представить доказательства того, что двигатель, соответствующий стандарту Tier III, не может быть установлен, и должен сообщить конкретно, что этому препятствует. Судовладелец должен документировать поиск двигателей, соответствующих стандарту Tier III разных производителей, и объяснить, почему доступные самые близкие двигатели по размеру или характеристикам не подходят для судна. Документированное обоснование несоответствующей стандарту Tier III замены двигателя должно храниться с заменой сертификата EIAPP. В качестве аргументов, препятствующих установке Tier III совместимого двигателя, не должны рассматриваться гарантийный срок и ресурс двигателя, его стоимость и сроки поставки или производства.

Дополнительным стимулом к установке технологий, соответствующих стандарту IMO Tier III по NO_x , могут являться прямые финансовые преимущества, поскольку крупные порты предлагают значительные скидки в портовых сборах. Одним из часто используемых показателей интенсивности воздействия судоходства на окружающую среду является *экологический индекс судов* (Environmental Shipping Index (ESI-индекс)), используемый основными портами для расчета портовых сборов. С учетом того, что реализация судовой энергетической установкой уровня Tier III добавляет примерно пять баллов по шкале ESI по сравнению с Tier II, возможно получение дополнительных финансовых преимуществ в портовых сборах для разных портов.

Например, сокращения сборов для судов, работающие на уровне III, предоставляются следующими портами:

- Лос-Анджелес: 2500 долл. (ESI выше 50);
- Гамбург: 1500 евро (ESI выше 50);
- Роттердам — 20 % скидка на Tier III;
- Антверпен — 10 % (ESI выше, чем 31) и др.

Существуют и другие схемы стимулирования: Фонд NO_x для Норвегии, Финская инвестиционная помощь, Морская Сингапурская зеленая инициатива, схема стимулирования Шэньчжэнь, Финансирование инфраструктуры (Европейские порты) и т. д.

Проблемы модернизации судов до уровня Tier III. В связи с ожидаемым расширением зон NECA с 1 января 2021 г. возможно проявление определенных сложностей в применении технологий обеспечения требований стандарта Tier III для судов, рабочая зона которых ранее планировалась вне NECA. Модернизация энергетических установок таких судов, в соответствии с требованиями стандарта Tier III, может потребовать необходимость наличия дополнительного пространства машинного отделения под установку технологического оборудования, поэтому выполнить мероприятия по модернизации бывает крайне затруднительно. Немаловажной проблемой является также контроль и мониторинг системы, а главное, — тестирование оборудования на соответствие. Техническое регулирование требует выполнения тестирования соответствия по определенным программам испытаний, которые предусматривают проведение измерений на стационарных режимах в определенных точках нагрузки. Выполнение таких измерений параметров работы двигателя возможно только на испытательных стендах, а не на двигателе, установленном на борту судна.

Еще одним аспектом проблемы является изменение остаточной стоимости судов на вторичном рынке. Очевидно, суда, соответствующие требованиям стандарта Tier III, при перепродаже будут обладать более высокой стоимостью и окажутся более востребованными, чем суда, не соответствующие стандарту. Поскольку область деятельности новых владельцев судов, не соответствующих установленным требованиям, будет ограничена, спрос и стоимость таких судов тоже будут снижены или судовладельцы вынуждены будут выполнять модернизацию, направленную на соблюдение новых требований. Поэтому владельцы судов должны тщательно изучать технологии установки оборудования для соответствия требованиям Tier III на этапе строительства, даже если первоначально запланированная зона эксплуатации судна находится за пределами NECA.

Выбор вариантов соответствия. Для соблюдения ограничений на выбросы NO_x в соответствии со стандартом Tier III операторы судов могут выбирать различные варианты. Выбор варианта соответствия зависит от индивидуальной модели торговли, типа двигателя, скорости судна и других факторов. К доступным технологиям сокращения эмиссии NO_x, в первую очередь, следует отнести:

- селективное каталитическое восстановление (SCR);
- систему рециркуляции отработавших газов (Exhaust Gas Recirculation (EGR));
- использование альтернативных видов.

Кроме того, возможно использование других технологий достижения соответствия, таких как внутренние модификации двигателя, применение водо-топливной эмульсии (Fuel-Water Emulsion (FWE)), непосредственный впрыск воды в камеру сгорания (Direct Water Injection (DWI)), увлажнение всасываемого воздуха (Intake air Humidification and Humid air Motors (HAM)) и т. д.

Селективное каталитическое восстановление (SCR). Селективное каталитическое восстановление (SCR) является периферийной системой обработки отработавших газов, способной снизить выбросы NO_x более чем на 80 % на любом типе двигателя. SCR — это хорошо известное и хорошо себя зарекомендовавшее в автотранспортном приложении «дополнение» системы очистки отработавших газов¹. Система как таковая не требует изменений основной конструкции двигателя и, по существу, позволяет свободно выбирать любого производителя двигателя. Кон-

¹ Passenger Cars / Light and Medium Duty Vehicles May 2019. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.continental-automotive.com/getattachment/8f2dedad-b510-4672-a005-3156f77d1f85/EMISSIONBOOKLET_2019.pdf.

цепция SCR (рис. 3) предполагает использование в системе выпуска каталитической установки (реактора), который производит восстановление оксидов азота посредством взаимодействия их с раствором мочевины распыленным в потоке отработавших газов в присутствии катализатора (оксиды металлов переменной валентности). Несмотря на кажущуюся простоту процессов, при использовании SCR могут возникнуть особые проблемы использования в тех случаях, когда системы поставляются не производителями оригинального оборудования. В этой связи в последнее время ведущие производители двигателей самостоятельно производят разработку и комплектование своей продукции системами SCR, управление которыми производится по оригинальным программам.

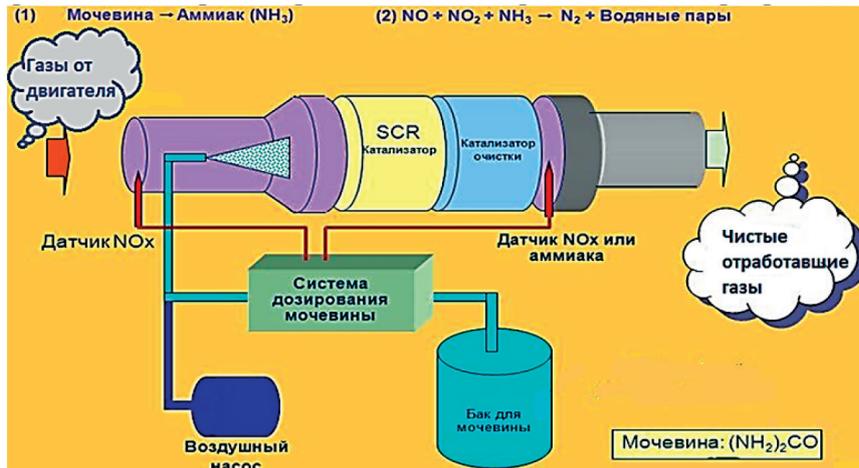


Рис. 3. Концепция селективного каталитического восстановления SCR

Эффективное протекание каталитической реакции восстановления оксидов азота в реакторе SCR требует определенного уровня температур отработавших газов, что делает проблематичным использование реактора на режимах малой нагрузки двигателя. Поэтому для двухтактных двигателей наиболее вероятным является расположение блока SCR в непосредственной близости от двигателя, перед турбинной частью турбокомпрессора, что позволяет расширить диапазон активного функционирования SCR. Таким образом, уместно рассмотреть системы SCR высокого и низкого давления. Основной принцип системы SCR высокого давления показан на рис. 4, а.

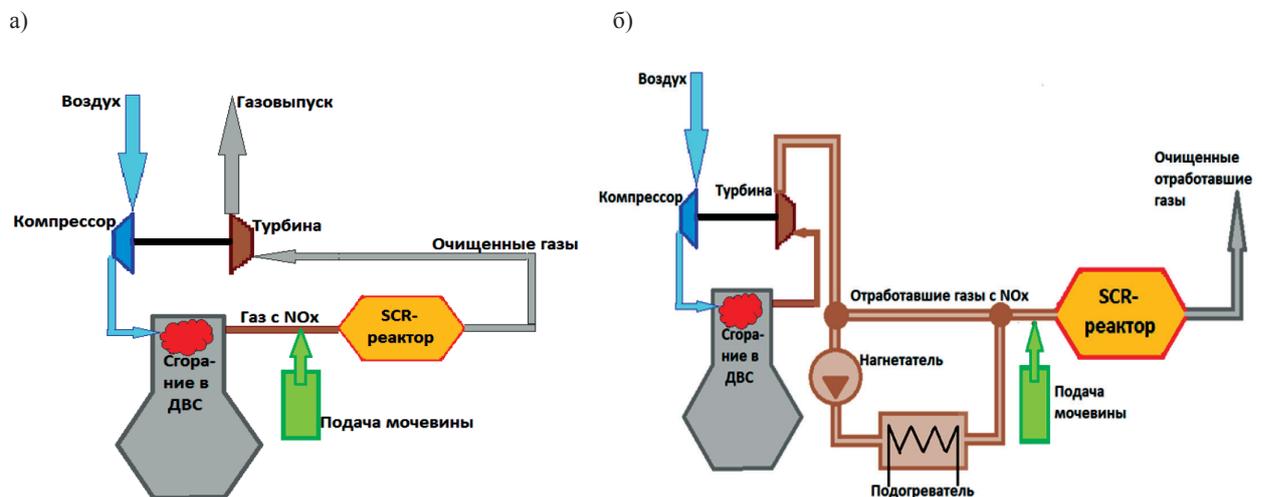


Рис. 4. Схемы систем SCR:
а — высокого давления; б — низкого давления

В системе SCR высокого давления (см. рис. 4, а) модуль реактора устанавливается перед турбиной турбокомпрессора и находится в зоне повышенного давления отработавших газов. Ввиду малого удельного объема газа, находящегося под давлением перед турбиной, система оказывается компактной, но требует усиления конструкции, способной выдержать развиваемое давление. Несмотря на то, что газ имеет достаточно высокую температуру (поскольку поступает в систему непосредственно из цилиндров двигателя), создание условий протекания каталитических реакций восстановления на режимах низких нагрузок остается проблематичным. Для работы системы необходима дополнительная электроэнергия обеспечения вспомогательных систем, что при суммировании с повышением противодействия на выпуске двигателя обуславливает неизбежность некоторого увеличения расхода топлива энергетической установкой. Такая система способна в особых случаях поддерживать работу главного двигателя на тяжелом топливе.

Альтернативным решением является система SCR низкого давления, схема которой представлена на рис. 4, б. В отличие от системы SCR высокого давления, модуль реактора SCR низкого давления устанавливается за турбиной, что конструктивно оказывается проще. Кроме того, избыточное давление в системе практически отсутствует, и к конструкции не предъявляются повышенные требования по прочности, при этом она имеет большие габариты. Тем не менее объем машинного отделения, занимаемый системой, может быть минимизирован за счет способности катализатора ослаблять шум системы газовыпуска. Каталитический блок может частично или полностью заменить глушитель, и сегодня комбинированные пакеты SCR и глушителя доступны для оптимизации занимаемого системой пространства.

Использование байпасного хода с подогревателем газа позволяет расширить мощностной диапазон использования каталитического восстановления NO_x несмотря на то, что температура отработавших газов при проходе через проточные части турбины понижается. Однако в случае необходимости применения подогревателя газа в системе низкого давления неизбежны дополнительные потери электроэнергии. Вне зависимости от выбранной конфигурации системы SCR, наиболее уязвимым элементом системы является каталитический модуль, который подлежит периодической замене. Срок службы и частота замены элементов катализатора в основном зависят от времени работы, качества топлива, типа катализатора и других факторов. Для обеспечения работы двигателя при засорении или разрушении блока катализатора в конструкции должна быть предусмотрена обводная магистраль отработавших газов, минуя систему SCR.

Расширение диапазона режимов работы двигателя с системой SCR остается важной проблемой. Ограничений в применении SCR не существует для непрерывного функционирования четырехтактных двигателей, работающих на винт с регулируемым шагом или для главного дизель-генератора при электродвижении судна. В таких случаях нагрузка двигателя выше 20 % и требуемая температура отработавших газов, равная 310–350 °С, может поддерживаться всеми возможными способами судном даже во время маневрирования. В отношении двухтактных двигателей, которые имеют механическую передачу на винт фиксированного шага, существуют некоторые проблемы с SCR. Главный двигатель таких судов должен работать при крайне низкой нагрузке, даже останавливаясь для реверса во время маневрирования. На таких режимах работы блок SCR для двухтактных двигателей должен быть отключен. Таким образом, очевидно, что для двухтактных двигателей имеется определенный потенциал для дальнейшего улучшения технологии SCR при низкой нагрузке двигателя или на маневровых режимах. При этом следует отметить, что переходные режимы двигателя выходят за рамки «Положения о контроле выбросов NO_x от морских дизельных двигателей». Это означает, что непродолжительные периоды работы двигателя, включая запуск двигателя и короткие периоды маневрирования, требующие реверса двигателя, не подпадают под нормативную базу Правила 13 Прил. VI к Конвенции МАРПОЛ.

При рассмотрении вопросов распределения пространства для систем SCR, необходимо прежде всего отметить, что требования стандарта Tier III применяются для новых судов, следовательно, дополнительное пространство должно выделяться еще на этапе проектирования. В настоящее время системы SCR установлены на более чем 300 судах, в большинстве случаев в ходе

модификации энергетических установок. В ходе модернизации энергетических установок судов, находящихся в эксплуатации в зонах NECA, возможно возникновении затруднений с размещением оборудования в машинном отделении. Так, если объем каталитического реактора SCR низкого давления составляет порядка 1,5–3 м³ на каждый МВт установленной мощности, то должно быть выделено достаточное пространство для подсистемы подготовки, подачи и дозирования мочевины, которое обычно составляет 2–6 м прямой выпускной трубы (в зависимости от рабочего объема двигателя) перед катализатором. Кроме того, необходимо наличие отдельного пространства для размещения бака (баков) хранения мочевины. Размер бака водного раствора мочевины (40 %) зависит от размера двигателя и от того, насколько часто используется SCR, а также как часто судно может брать мочевину на борт. Современные суда (оффшорные, RoPax, рыболовные суда) используют емкость для мочевины 30–100 м³, которая распределяется между одним-двумя танками. Общая мощность двигателя с SCR этих судов составляет 3–25 МВт, в результате чего емкость бака мочевины варьируется в пределах 4–10 м³ / МВт. Меньшие суда обычно работают локально и могут заполнять танки чаще при условии, что мочевина доступна в портах.

Как отмечалось ранее, системы SCR критичны к качеству используемого топлива. Принципиальным является то, что системы SCR могут быть использованы при работе двигателя на высокосернистом тяжелом топливе, если система очистки отработавших газов правильно спроектирована и поддерживается в работоспособном состоянии. Содержание серы в мазуте и, соответственно, концентрация SO_x в отработавших газах является критическим параметром при работе систем SCR. Следует избегать кристаллизации бисульфата аммония, происходящей при работе на низкой нагрузке. Для того чтобы предотвратить конденсацию бисульфата аммония на каталитических элементах, необходимо поддерживать температуру отработавших газов на достаточно высоком уровне. Конденсация способна оказать большое влияние на производительность системы SCR по снижению NO_x и будет вызывать повышенное противодавление (вследствие засорения каталитического модуля), которое, в конечном итоге, может привести к ухудшению работы двигателя. Исходя из этого, впрыск мочевины и температура газа в катализаторе должны контролироваться в целях минимизации этого риска.

Для минимизации первоначальных инвестиционных затрат следует также сократить пространство, необходимое для системы SCR (можно, например, на стадии проектирования предусмотреть такое решение, как работу двигателя в зонах NECA на режиме частичной нагрузки). Неполноформатные (уменьшенные) системы SCR и двойной рейтинг двигателя не упоминаются в руководящих правилах. Однако, если производитель двигателя демонстрирует достаточные доказательства того, что все требования нормы соблюдены, то такой подход может быть принят к исполнению. Для оценки соблюдения правил изготовитель двигателя должен предоставить полный комплект документации, где должно быть предписано правило переключения и записи режимов уровня нейтрализации NO_x (рис. 5).

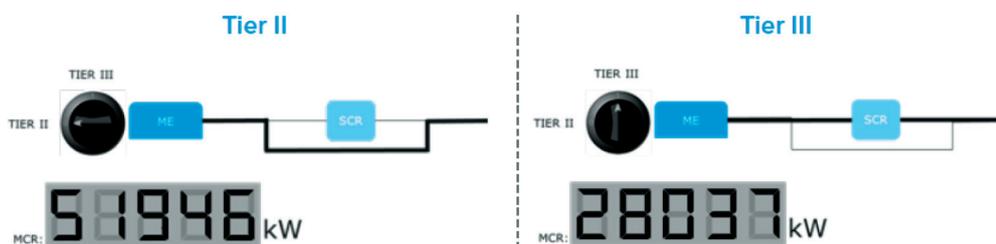


Рис. 5. Переключение режимов работы двигателя

На данный момент все двойные рейтинги двигателя и подходы к использованию SCR уменьшенной производительности рассматриваются на индивидуальной основе. В любом случае для уровней стандартов Tier II и Tier III режимы работы должны быть проверены на испытательном стенде. Оба рейтинга должны быть указаны на шильде двигателя, как показано на рис. 6.

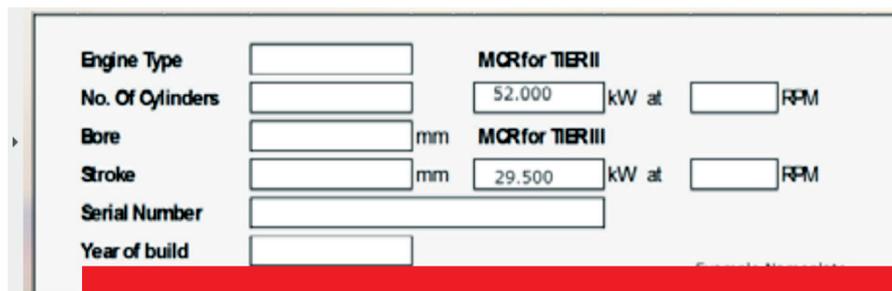


Рис. 6. Шильда двигателя с двойным рейтингом

Исходя из ранее изложенного о системах селективного каталитического восстановления, можно сделать вывод о том, что система SCR, являясь периферийной по отношению к двигателю, оказывает минимальное влияние на процессы, протекающие в цилиндре, и способна гарантированно обеспечить достижение требований стандарта Tier III. В табл. 1 приведены достоинства и недостатки системы, которые необходимо учитывать при выборе этого способа соответствия требованиям стандарта Tier III.

Таблица 1

Достоинства и недостатки SCR

Достоинства	Обеспечение возможности сокращения выбросов оксидов азота более чем на 80 % и достижение соответствие эмиссии NO _x уровня стандарта Tier III
	Минимальное воздействие на рабочие процессы в двигателе, отсутствие требований к изменению конструкции двигателя
	Достаточно эффективное удаление NO _x для большинства режимов работы двигателя
	Доступная и отработанная технология, растущая справочная база, более трехсот установок по всему миру
Недостатки	Ограниченное удаление NO _x при низких нагрузках двигателя (маневрирование, операции динамического позиционирования и т. д.)
	Занимает дополнительное пространство машинного отделения, необходим резервуар для хранения мочевины на борту. Требуется периодическое пополнение запасов мочевины
	Может привести к незначительному увеличению расхода топлива двигателем (менее чем на 1 %)
	Дополнительные расходы на потребление мочевины в районах NO _x ECA (примерно до 8 % дополнительно к стоимости расходуемого топлива)
	Использование SCR связано с увеличением расхода топлива энергетической установкой в основном за счет работы подсистем обеспечения реакций восстановления

В заключение рассмотрения технологии SCR необходимо отметить, что система каталитического восстановления оксидов азота достаточно широко апробирована с конца прошлого века в двигателях автотранспортного назначения и хорошо себя зарекомендовала в достижении требований стандарта Евро 5 и выше. Поэтому адаптация автомобильных приложений систем SCR к судовым ДВС является в основном сугубо технической задачей.

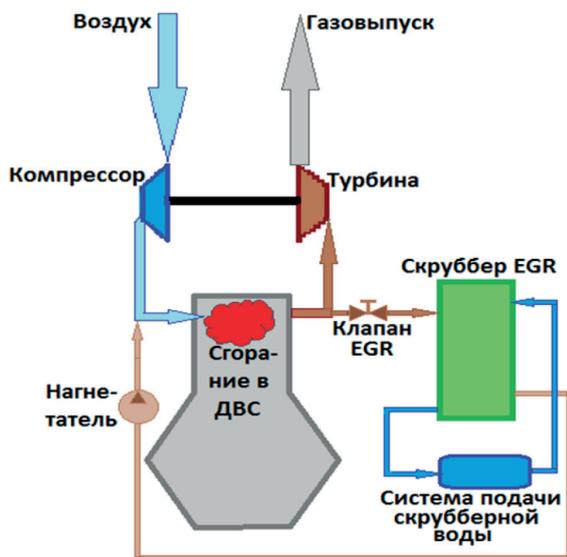
Система рециркуляции отработавших газов (EGR). Так же, как и системы SCR, системы рециркуляции отработавших газов широко доступны в автотранспортном приложении как технологии сокращения эмиссии NO_x и снижения шумности работы дизельного двигателя. Несмотря на периферийное расположение, системы EGR можно отнести к внутренним технологиям двигателя, поскольку они оказывают непосредственное влияние на протекание внутрицилиндровых процессов.

Концепция EGR основана на двух факторах влияния. Во-первых, подмешивание продуктов сгорания в свежий заряд цилиндра сокращает количество кислорода в камере сгорания, тем

самым замедляя скорость протекания реакций окисления углеводородов, препятствуя резкому росту температур в цикле дизельного двигателя и, как следствие, окислению молекул азота воздуха. Одновременно в заряде цилиндра уменьшается количество свободного кислорода, способного вступить в реакцию образования NO_x . Во-вторых, добавление в свежий заряд цилиндра продуктов сгорания, в частности, углекислого газа, обладающего высокой теплоемкостью, приводит к дополнительному снижению температур сгорания в цикле, что в свою очередь также приводит к снижению образования NO_x . Побочным эффектом уменьшения концентрации O_2 в камере сгорания двигателя является потенциальная возможность увеличения содержания сажи в отработавших газах, что необходимо учитывать при реализации рассматриваемой технологии.

Отработавшие газы для осуществления рециркуляции могут отводиться из зоны высокого давления газа (перед турбиной турбокомпрессора). В этом случае система называется *EGR высокого давления* — рис. 7, а. В системах *EGR* низкого давления отвод отработавшего газа производится после турбины, как показано на рис. 7, б. Обе конфигурации доступны на рынке. При этом текущие исследования демонстрируют, что системы *EGR* низкого давления позволяют снизить начальные и эксплуатационные расходы.

а)



б)

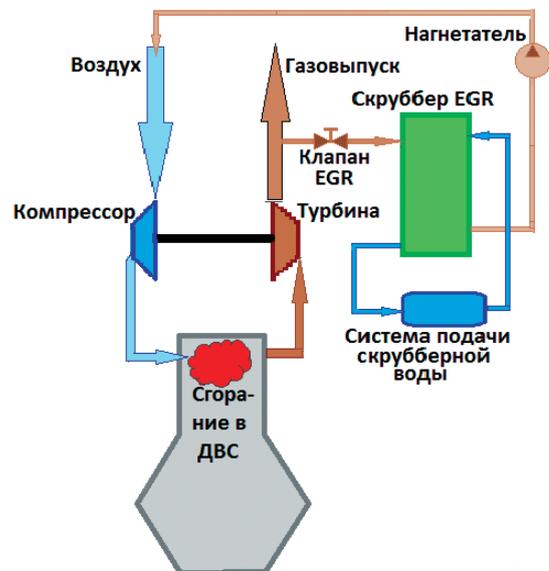


Рис. 7. Системы EGR:

а — высокого давления; б — низкого давления

Во избежание облитерации проточных частей системы впуска твердыми включениями, содержащимися в отработавших газах двигателя, участвующих в рециркуляции, как это часто происходит в автотранспортных приложениях, а также для предотвращения коррозии и образования сажи в камере сгорания отработавший газ необходимо очистить. По этой причине системы *EGR* оснащены небольшим скруббером, функционирование и конструкция которого идентичны скрубберу SO_x [7] или скрубберу систем инертного газа, используемых на танкерах, гораздо меньшей производительности. Требования, предъявляемые к промывочной воде скруббера *EGR*, аналогичны требованиям к скрубберной воде в системах сокращения выбросов SO_x . По этой причине современные системы рециркуляции отработавших газов оснащены системой очистки промывочной воды, которая в большинстве случаев также требует подачи едкого натра (NaOH). В перспективе ИМО необходимо разработать руководство по выпуску отводимой воды из систем *EGR* снижения выбросов NO_x . Для сбора шлама из скруббера *EGR* требуется специальный резервуар, так как шлам, выделенный из отработавших газов в системе очистки, не должен смешиваться с другими отходами, накопившимися на борту корабля.

В связи с тем, что EGR — это процесс, интегрированный в двигатель, технология EGR имеет существенное преимущество в случае возникновения вопроса о требованиях к пространству для размещения системы. При использовании EGR габариты двигателя остаются практически неизменными, а система подачи, хранения и подготовки скрубберной воды может быть гибко размещена в пространстве машинного отделения. Тем не менее размещение установки систем скрубберной воды, резервуаров для каустической соды и шлама должны быть приняты во внимание на стадии проектирования. Поскольку система EGR оказывает влияние на процесс сгорания, возможно некоторое увеличение расхода топлива и дымности отработавших газов. Также при выборе системы в качестве способа соответствия требованиям стандарта Tier III следует учитывать определенное снижение располагаемой тепловой энергии для систем утилизации энергии отработавших газов.

Несмотря на то, что начальные инвестиционные затраты на создание силовых установок с технологией EGR оказываются более высокими, чем для систем SCR, эксплуатационные расходы системы в большинстве случаев ниже. Тем не менее, в отличие от двигателей автотранспортного назначения, в которых системы EGR получили широкое распространение, процесс использования систем рециркуляции отработавших газов для крупных судовых двигателей не представляется достаточно широко апробированным. Ведущие производители судовых ДВС проявляют все большую заинтересованность к рассматриваемой технологии. К примеру, MAN Diesel & Turbo объявила о получении сертификата IMO для использования двухтактного двигателя MAN B & W 6G70ME-C9.5 с интегрированной системой EGR¹. Суда Suezmax будут первыми с укладкой килля после 1 января 2016 г., официально сертифицированными как соответствующие ограничениям на выбросы Tier III в рамках существующих норм выбросов NOx в Северной Америке (районы контроля NECA) и США (NECA Карибского моря). Такое состояние дел способствует накоплению опыта в области выявления особенностей эксплуатации судовых систем рециркуляции отработавших газов и развитию нормативной базы. Далее необходимо выполнить сопоставление двух рассмотренных технологий в эксплуатационных и инвестиционных аспектах. Основные данные представлены в форме табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление характеристик систем EGR и SCR

Фактор влияния	EGR	SCR
Влияние на процесс сгорания в двигателе	Снижение эффективности	Не оказывает влияния
Влияние на ресурсные показатели двигателя	Не исключается	Не оказывает влияния
Требования к пространству для размещения системы	Система компактна	Требуется дополнительный объем машинного отделения
Производство шлама	Да	Нет
Требования к сбору, хранению и переработке побочных продуктов	Необходимо соблюдение	Требования отсутствуют
Опыт использования в судостроении	Ограничен	Да
Возможность совмещение технологии со скруббером SO _x	Да	Необходим учет специальных условий
Возможность использования тяжелых топлив (HFO)	Использование возможно	Не рекомендуется
Эксплуатационные расходы	Низкие	Высокие
Влияние на топливную экономичность установки	Ухудшение до 4 %	Крайне незначительное, менее 1 % в сторону снижения

¹ MAN Diesel & Turbo Delivers World's First IMO-Certified Two-Stroke Engine with Tier III NOx Control, Exhaust Gas Recirculation Systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://corporate.man-es.com/press-media/news-overview/details/2016/04/04/MAN-Diesel-Turbo-Delivers-World-s-First-IMO-Certified-Two-Stroke-Engine-with-Tier-III-NOx-Control-Exhaust-Gas-Recirculation-Systems>.

Использование альтернативных видов топлива. Использование альтернативных видов топлива, таких как сжиженный природный газ (Liquefied Natural Gas (LNG)), сжиженный газ (Liquefied Petroleum Gas (LPG)), метанол и др. в обедненной смеси двигателей реализует еще одно средство для снижения выбросов NO_x. Применение обедненных смесей природного газа в двигателе внутреннего сгорания способно уменьшать выбросы NO_x до 80–90 %, тем самым обеспечивая соблюдение требований стандарта Tier III. Тем не менее следует отметить, что концентрация NO_x в отработавших газах в значительной степени зависит от способа организации процесса сгорания, вне зависимости от типа используемого топлива. В случае использования в двигателе цикла с принудительным воспламенением топлива (*цикл Отто*) при работе на природном газе или других альтернативных видов топлива пиковые температуры заряда цилиндра уменьшаются по сравнению с максимальными температурами цикла современного дизельного двигателя. Совместное влияние уменьшенного содержания кислорода в камере сгорания двигателя Отто по сравнению с зарядом камеры дизельного двигателя и снижение пиковых температур в цикле создают предпосылки для ограничения образования оксидов азота в рабочем процессе двигателя. Из всех доступных альтернативных видов топлива наиболее высокий потенциал снижения эмиссии NO_x обеспечивает сжиженный природный газ LNG, поскольку другие альтернативные виды топлива в настоящее время широко не используются. Ожидаемые результаты использования альтернативных видов топлива с акцентированием внимания на LNG сведены в табл. 3.

Таблица 3

Преимущества и недостатки использования LNG

Достоинства	Потенциально низкие эксплуатационные расходы, особенно для энергетических установок газозовозов и при возможности оплаты топлива судовладельцем / оператором без посредников
	Использование LNG обеспечивает одновременное достижение соответствия требованиям IMO по выбросам SO _x и NO _x для четырехтактных двигателей (100 % удаление SO _x и до 85 % удаления оксидов азота из отработавших газов). Для двухтактных двигателей сокращение NO _x составляет примерно 40 %
	Использование технологий двухтопливных двигателей (газодизель) открывают доступ к разным видам топлива и обеспечивают возможность использования в качестве топлива перевозимых грузов (танкеры, газозовозы)
	Постоянно растущая правовая база и поддержка стандартизации LNG в качестве «экологически чистого» топлива
	Постоянно растущий интерес операторов торгового флота к использованию LNG в качестве топлива
Недостатки	Организация судовых систем хранения LNG в настоящее время все еще требуют значительных инвестиций.
	Недостаточно развитая инфраструктура использования LNG. Схемы бункеровки находится в стадии разработки
	Системы хранения LNG достаточно громоздки и поглощают часть грузового пространства судна

Следует отметить, что особую привлекательность в экологическом аспекте концепция LNG имеет в свете совместного рассмотрения вопросов соответствия по выбросам оксидов серы, азота и твердых частиц. Более подробные сведения об использовании СПГ в качестве топлива и финансовых аспектов применения альтернативных видов топлива можно найти в источниках [8], [9].

Другие доступные технологии соответствия. Помимо SCR, EGR и использования альтернативных видов топлива, доступны и другие технологии, к которым, в первую очередь, следует отнести непосредственный (прямой) впрыск воды в цилиндр (Direct Water Injection (DWI)), водотопливную эмульсию (Fuel-Water Emulsion (FWE)), увлажнение всасываемого воздуха (Intake air

Humidification and Humid air Motors (НАМ)) и др., однако эти технологии не получили широкого распространения и в основном находятся в стадии разработки.

Впрыскивание пресной воды в свежий заряд цилиндра способно уменьшать температуру процесса сгорания за счет отбора от заряда энергии, необходимой на совершение фазового перехода (теплота парообразования) и подогрев образующегося водяного пара. Как показывают исследования [10], [11], в настоящее время с технологией DWI возможно достижение только 50 % снижения выбросов NO_x . Это означает, что данная технология не позволяет в полной мере обеспечить достижение требований стандарта Tier III. Кроме того, в ходе реализации технологии возникают дополнительные проблемы, связанные с организацией бункеровки или производства, мест хранения и подготовки пресной воды, необходимой для распыливания.

Технология использования водо-топливных эмульсий имеет довольно долгую историю. При применении FWE пресная вода смешивается с топливом на борту судна до того, как смесь подается в камеру сгорания. Испарение воды в объеме топливного факела вызывает локальное охлаждение заряда цилиндра и снижение температур сгорания топливно-воздушной смеси, тем самым уменьшая образование NO_x . Результаты исследовательских работ свидетельствуют о том, что в среднем каждый процент воды в смеси с топливом пропорционально уменьшает выбросы NO_x (примерно на процент). Исходя из особенностей образования эмульсий, уровень снижения NO_x может составить до 30 %, что не позволит обеспечить достижение требований стандарта. Также необходимо принимать во внимание, что применение водотопливных эмульсий связано со значительным усложнением топливной системы энергетической установки за счет установки дополнительного оборудования и требует существенных финансовых инвестиций, а также тот факт, что FWE вызывают повышенные износы топливоподающих систем дизельного двигателя и при отклонении технологии использования способны нанести непоправимый ущерб конструкции.

В системах увлажнения всасываемого воздуха НАМ горячий наддувочный воздух от компрессора увлажняется либо за счет прямой подачи пара, генерируемого из морской воды, либо за счет впрыскивания во впускной тракт двигателя пресной воды под высоким давлением, образуя небольшие капли воды для дальнейшего испарения. В результате увеличивается теплоемкость воздуха, что позволяет ему поглощать больше тепла, при этом одновременно в воздухе сокращается содержание кислорода. Это приводит к более низкой температуре горения в двигателе, таким образом, уменьшая тенденцию образования NO_x в процессе сгорания. Принципиально технология увлажнения всасываемого воздуха НАМ может уменьшить выбросы NO_x от 30 до 70 %. При этом нужно принимать во внимание, что увлажнение воздуха на впуске в современных типах двигателей, имеющих высокое давление наддува, ограничено ввиду относительно низких температур точки росы водяного пара при высоком давлении. Потенциал технологии увлажнения всасываемого воздуха НАМ в настоящее время находится в стадии дальнейшего исследования.

Близкими по идеологии к технологиям НАМ и EGR являются разработки Asahi Kasei Chemicals Corporation (Япония) на основе мембраны для снижения содержания кислорода (ORM — Oxygen Reduction Membrane) [12]. Эта система снижает выбросы NO_x путем уменьшения концентрации кислорода в используемом двигателем воздухе. Система ORM устанавливается на стороне впуска газо-воздушного тракта, поэтому на ее работу не оказывают влияние ни вид топлива (например, мазут, морское дизельное топливо или газ), ни его отдельные характеристики (например, содержание серы). Выполненные экспериментальные исследования демонстрируют достижение требований стандарта Tier III при сокращении концентрации кислорода в подаваемом на впуск воздухе с 21 % до 17 % и менее.

Отдельный интерес могут представлять технологии сокращения эмиссии NO_x путем непосредственного воздействия на внутрицилиндровые процессы, к которым можно отнести внутрисистемную каталитическую обработку топлива, специальное управление процессом сгорания путем использования электронно-управляемых систем впрыска, управление температурой заряда

цилиндра посредством изменения фаз газораспределения для реализации цикла Миллера и др. Однако рассмотрение этих технологий, глубоко интегрированных в конструкцию двигателя, выходит за рамки рассмотрения предлагаемой публикации.

Заключение (Conclusion)

Ожидаемое расширение зон контроля эмиссии NO_x в бассейне Балтийского и Северного морей побуждают судовладельцев и операторов судов, осуществляющих деятельность в этих регионах, к обдумыванию своей стратегии дальнейшей деятельности в новых зонах NECA. Выбор стратегии соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии оксидов азота энергетическими установками новых или модернизируемых судов оказывается сложным решением на альтернативной основе. В качестве способов соответствия необходимо рассматривать разработанные и вновь разрабатываемые технологии, такие как селективное каталитическое восстановление, рециркуляция отработавших газов, использование альтернативных видов топлива, применение водо-топливных эмульсий, непосредственный (прямой) впрыск воды в цилиндр, увлажнение всасываемого воздуха, снижение концентрации кислорода в воздухе, подаваемом на наполнение цилиндра, специальное управление внутрицилиндровыми процессами и некоторые другие. При этом любой из доступных вариантов должен обеспечивать неуклонное достижение требований стандарта Tier III. Соответствие судовой энергетической установки стандарту Tier III по эмиссии NO_x делает суда более привлекательными для фрахтователей, обеспечивает премиальные тарифы в портовых сборах целого ряда портов и высокий рейтинг таких судов на вторичном рынке.

Лидером среди технологий сокращения выбросов оксидов азота является SCR. Технология SCR гарантированно обеспечивает достижение требований стандарта Tier III по эмиссии NO_x , не требуя вмешательства в конструкцию двигателя. Она затрагивает только систему газораздела, что объясняет повышенный интерес к системе в плане модификации установок. Однако система каталитического восстановления NO_x имеет существенный недостаток, который помимо необходимости выделения специального пространства в машинном отделении и дополнительных финансовых затрат на реагенты связан с возникающими сложностями поддержания условий протекания процесса восстановления на режимах малой мощности ввиду низких температур отработавших газов. Данный фактор представляет серьезные, но не являющиеся непреодолимыми трудности.

Систему EGR можно рассматривать как вторую в рейтинге технологий сокращения эмиссии NO_x . Она достаточно хорошо зарекомендовала себя в автотранспортных приложениях и способна обеспечивать требования Tier III по эмиссии NO_x на любых эксплуатационных режимах. При этом система рециркуляции отработавших газов оказывает непосредственное воздействие на протекание внутрицилиндровых процессов двигателя и требует проведения определенных дополнительных настроек рабочего процесса, которые могут быть выполнены только заводом-изготовителем. Кроме того, система требует удаления высокотоксичного шлама, образующегося при очистке отработавших газов, участвующих в рециркуляции, нормативная база утилизации которого пока находится в стадии доработки.

Не менее надежным, чем EGR и SCR, способом соблюдения требований стандарта Tier III является использование альтернативных видов топлива, в основном LNG. Результат сокращения выбросов NO_x от использования альтернативных видов топлива напрямую зависит от технологии двигателя. В случае двигателя с принудительным воспламенением топливовоздушной смеси следует ожидать сокращение NO_x до 90 % от уровня Tier I.

Повышенный спрос на двигатели, соответствующие стандарту Tier III по эмиссии NO_x , в связи с расширением зон NECA создаст дополнительную мотивацию заводам-изготовителям судовых двигателей к поиску и внедрению новых конструкторских решений, направленных на снижение содержания в отработавших газах оксидов азота, а также доработку и более широкое использование уже известных способов борьбы с эмиссией NO_x . В свою очередь, увеличение ассор-

тимента выпускаемых экологически безопасных двигателей значительно увеличит возможности выбора способа соответствия новым требованиям ИМО для судовладельцев и проектировщиков.

Необходимо также отметить, что обеспечение экологических требований стандарта Tier III для широкого диапазона эксплуатационных режимов работы судовой энергетической установки представляется комплексной задачей, решение которой может быть достигнуто в конструкции двигателя одновременной реализацией различных технологий сокращения выбросов NO_x .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
2. Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.
3. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Семанов Г. Н. Вредные выбросы в атмосферу от судов: на пути к стандартам ИМО / Г. Н. Семанов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 45–47.
5. Латухов С. В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС–74). (Консолидированный текст, изм. Протоколом 1988 г. к ней, с поправками). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2015. — 1088 с.
7. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.
8. Van T. C. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T. C. Van, J. Ramirez, T. Rainey, Z. Ristovski, R. J. Brown // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2019. — Vol. 70. — Pp. 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.
9. Латухов С. В. Технологии обеспечения экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]; под ред. д-ра географ. наук, проф. С. В. Латухова. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2019. — 156 с.
10. Hountalas D. T. Use of water emulsion and intake water injection as NO_x reduction techniques for heavy duty diesel engines / D. Hountalas, G. Mavropoulos, T. Zannis, S. Mamalis. — SAE Technical Paper, 2006. — №. 2006-01-1414. DOI: 10.4271/2006-01-1414.
11. Brusca S. Evaluation of the effects of water injection in a single cylinder CFR cetane engine / S. Brusca, R. Lanzafame. — SAE Technical Paper, 2001. — №. 2001-01-2012. DOI: 10.4271/2001-01-2012.
12. Khotseng L. Oxygen Reduction Reaction / L. Khotseng // Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution - Theory to Design. — 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79098.

REFERENCES

1. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
2. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

3. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Semanov, G. N. "Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO." *Nauka i transport. Mor-skoj i rechnoj transport* 1(5) (2013): 45–47.
5. Latukhov, S. V., V. A. Nikitin, V. N. Okunev, et al. *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva: monografiya*. SPb: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015.
6. *1974 International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS-74). (Consolidated text as amended by the 1988 Protocol to it, as amended)*. St. Petersburg: JSC TsNIIMF, 2015.
7. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.
8. Van, Thuy Chu, Jerome Ramirez, Thomas Rainey, Zoran Ristovski, and Richard J. Brown. "Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 70 (2019): 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.
9. Latukhov, S. V., O. V. Solyakov, V. A. Nikitin, V.N. Okunev, S.V. Titov, V.V. Yakunchikov, I.M. Dantsevich, A. A. Romanenko, and N. V.Pershin. *Ecological safety technologies for shipping: monograph*. Edited by S. V. Latukhov. SPb.: MANEB Publishing House, 2019.
10. Hountalas, Dimitrios Theofanis, G. Mavropoulos, T. Zannis, and S. Mamalis. *Use of water emulsion and intake water injection as NOx reduction techniques for heavy duty diesel engines*. No. 2006-01-1414. SAE Technical Paper, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-1414
11. Brusca, S., and R. Lanzafame. *Evaluation of the effects of water injection in a single cylinder CFR cetane engine*. No. 2001-01-2012. SAE Technical Paper, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-2012.
12. Khotseng, Lindiwe. "Oxygen Reduction Reaction." *Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution - Theory to Design*. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79098.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Petrov, Aleksandr P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2019 г.
Received: December 27, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153

RESEARCHES REVIEW OF MODELLING ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS COMPONENTS

A. B. Karakayev, G. A. Galiev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The results of collection, analysis and generalization of scientific materials that describe development of adaptive models of electrical power system components control are provided in the paper. The following topical problems are distinguished: creation of aggregated intelligent electrical power system with active-adaptive network; distributed electrical energy generation problem; development of flexible alternating current transmission systems; tasks of reducing the cost of the sophisticated systems analysis; metaprogramming methods application; instrumentation of genetic algorithms; the correlation problem between reliability indicators and control depth factor of ship electrical equipment; technical diagnostic systems optimization; raise of reliability by means of technical conditions forecast and malfunctions prevention; control algorithms optimization; artificial neural networks appliance; energy consumption short-term forecasting methods based on artificial neural networks appliance; active learning systems; weak parts detection during transient phenomena; modelling the processes control under non-deterministic disturbances; expert systems development problems; solving the modelling problems by various software means. It is noticed that the majority of different problems are economical and technical. On the other hand, a few tasks provide ecological function. Moreover, educational and social problems are almost not presented. Some perspective research fields are described. Namely, development of methodology based on complex system approach to the analysis of electrical power systems, artificial neural networks libraries application at C++ and Java projects, realization of electrical power systems fuzzy-neural adaptive model with reduced requirements for the computing power of hardware with the possibility of using the model for staff training.

Keywords: adaptive models, electrical power systems, distributed electrical power generation, genetic algorithms, forecasting the technical condition, artificial neural networks, active learning systems, expert systems, system concept, fuzzy-neural models.

For citation:

Karakayev, Aleksandr B., and Gleb A. Galiev. "Researches review of modelling adaptive automatic control systems of electrical power systems components." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.

УДК 621.3.078.4

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Б. Каракаев, Г. А. Галиев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты анализа и обобщения научных работ, описывающего разработку адаптивных моделей управления компонентами электроэнергетических систем. Выявлены следующие актуальные проблемы: создание единой интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью; проблема распределенной генерации электроэнергии; разработка гибких систем

передачи переменного тока; задачи снижения затрат на анализ сложных систем; использование методов метапрограммирования; применение эволюционных (генетических) алгоритмов; проблема зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования; оптимизация системы использования средств технической диагностики; повышение надежности посредством прогнозирования технического состояния электроэнергетической системы и предотвращения отказов; оптимизация алгоритмов управления; использование искусственных нейронных сетей в задачах повышения надежности; методика краткосрочного прогнозирования энергопотребления на базе искусственных нейронных сетей; системы активного обучения; проблемы решения задачи выделения слабых звеньев при переходных процессах в электроэнергетических системах; моделирование управления процессами при недетерминированных возмущающих воздействиях; проблемы разработки экспертных систем; решение задач моделирования различными программными средствами. Выявлены следующие перспективные направления исследования: разработка методики моделирования, основанной на комплексном системном подходе к анализу электроэнергетических систем; вопрос соотношения быстродействия и точности моделей электроэнергетических систем; широкое распространение прогностических адаптивных моделей; применение библиотек искусственных нейронных сетей в проектах C++ и Java; реализация нейронечеткой адаптивной модели электроэнергетических систем с пониженными требованиями к вычислительной мощности технических средств с возможностью использования модели для подготовки персонала.

Ключевые слова: адаптивные модели, электроэнергетические системы, распределенная генерация электроэнергии, эволюционные алгоритмы, прогнозирование технического состояния, искусственные нейронные сети, системы активного обучения, экспертные системы, системный подход, нейронечеткие модели.

Для цитирования:

Каракаев А. Б. Обзор исследований моделирования адаптивных систем автоматического управления компонентами электроэнергетических систем / А. Б. Каракаев, Г. А. Галиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.

Введение (Introduction)

Задача построения наиболее эффективных моделей систем автоматического управления элементами электроэнергетических систем является достаточно актуальной в настоящее время, поскольку повышается уровень энерговооруженности судов и, соответственно, уровень автоматизации. В связи с этим на первый план выходит задача оптимального управления и повышения надежности. Одним из подходов может стать формирование новой технологической платформы — интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [1], [2].

Целью данной работы являлось определение ключевых проблем в данной области. Были поставлены и решены следующие задачи:

- сформулированы основные критерии, характеризующие проблематику в области построения наиболее эффективных моделей систем автоматического управления элементами электроэнергетических систем;
- на основании обзора соответствующих работ выделены наиболее перспективные направления дальнейших исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения сравнительного анализа научной литературы выделены (рис. 1) следующие критерии содержания научных исследований: повышение качества электроэнергии оптимизация энергоснабжения [1]–[3]; исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем (ЭЭС) [4]–[9]; решение проблем обеспечения и повышения надежности функционирования ЭЭС, оптимизации процессов диагностирования и прогнозирования [10]–[19]; применение искусственных нейронных сетей (ИНС) в электроэнергетике (ЭЭ) [20]–[26]; моделирование адаптивных систем автоматического регулирования (САР) [27]–[35]; проектирование экспертных систем [36]–[40]. Рассмотрим данные вопросы подробнее.



Рис. 1. Основные критерии содержания научных исследований

Повышение качества электроэнергии, оптимизация энергоснабжения. Одной из наиболее актуальных современных концепций является идея создания единой интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью [1]. В рамках рассмотрения данной проблемы вводится понятие *распределенной генерации* — совокупности источников тепловой и электрической энергии мощностью не более нескольких тысяч киловатт, максимально приближенных к потребителям, что исключает необходимость создания электрических и тепловых сетей, а значит, снижает потери энергии [2]. Этому же вопросу посвящена работа [3], в которой изучены следующие вопросы. Рассмотрена задача управления региональной ЭЭС. Проведено описание компонентов системы. Определена основная задача — оптимизация алгоритмов управления. Предложен вариант ее решения, основанный на оценке текущего состояния и прогнозировании. Представлен процесс прогнозирования потребления электроэнергии региональной ЭЭС. Реализация модели осуществлена средствами C# и платформы .Net. Предложены срезы интерфейсов. Рассмотрены различные варианты прогнозирования: при помощи коэффициента роста / спада спроса и нейронечеткое прогнозирование.

Исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем. Концепция интеллектуальных ЭЭС представляет их основанными на активно-адаптивных электрических сетях (ЭС), характерными элементами которых являются гибкие системы передачи переменного тока (FACTS) и устройства постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) [4]. Существуют два вида статических преобразователей: тока и напряжения. Преимуществами преобразователя напряжения являются: быстрдействие, возможность работать при несимметрии, хорошая электромагнитная совместимость. Интеллектуальные ЭЭС на основе активно-адаптивных ЭС могут быть успешно применены для питания подводных кабелей с высоким емкостным сопротивлением, передачи электроэнергии на большие расстояния, увеличения мощности ЭС, передачи электроэнергии между несинхронизированными ЭЭС, уменьшения сечения проводов и высоты вышек. Однако существует проблема обеспечения надежности работы интеллектуальной ЭЭС на основе ПТВН и проблема моделирования таких систем (моделирование режимов без декомпозиции и ограничения во времени, необходимость точного решения нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка, взаимосвязь с внешними интерфейсами). Решение данных

проблем может быть найдено путем применения гибридного моделирования, как совокупности аналогового, цифрового и физического методов. В работе [4] представлен алгоритм построения модели синхронного гибридного процессора для решения указанной проблемы со следующими свойствами: универсальность и структурность модели. Также приведены результаты моделирования, которые показывают применимость данной концепции с единственным ограничением состоящим в том, что изменение схемы ЭЭС приводит к необходимости конструктивного изменения модели.

Разработке темы интеллектуальных сетей посвящены работы [5]–[7]. В [6] рассмотрены перспективы развития электроэнергетики в области разработки ЭЭС Smart Grid, характеризующихся большим количеством параметров. Вследствие этого рассмотрены проблемы децентрализации и необходимости решения априорно противоречивых задач, процессы изменения и проблемы применения, эрозия границ *человек – система*, штатный характер отказов. Все это ограничивает применение традиционных методов программирования, среди которых особенно сложными являются: согласование порядка внесения изменений, подстройка интерфейсов программного доступа к модулям под окружение, обеспечение интегральной производительности. Решение данной проблемы предложено в области метапрограммирования.

В рамках решения задачи снижения затрат на анализ сложных систем предложено использование следующих методов метапрограммирования: разработка, управляемая моделями, аспектно-ориентированный подход. Практическое использование данного подхода реализовано при проектировании математического обеспечения интеллектуальных ЭЭС. Для решения данной задачи предложены алгоритмы, основанные на теории категорий.

Решение проблем обеспечения и повышения надежности функционирования электроэнергетических систем, оптимизации процессов диагностирования и прогнозирования. К вопросу о применении сложных и наукоемких методов моделирования ЭЭС можно отнести рассмотрение ряда алгоритмов оптимизации параметров и мест установки устройств управления передачей ЭЭ [8]. В [9] представлена актуальность применения методов искусственного интеллекта для решения задач оптимизации. Более подробно рассмотрен процесс применения эволюционных (генетических) алгоритмов (ГА). Выделены преимущества применения ГА: быстроедействие, не требуют ограничений на оптимизируемую функцию, простота понимания и компьютерной реализации, гибкость. Сформулирована задача применения FACTS в ЭЭС в данный момент времени: минимизация потерь мощности, учесть ограничения установившегося режима и предельные ограничения значений параметров реактивной мощности, комплексных напряжений. Представлен обобщенный алгоритм решения задачи и результаты моделирования для стандартной 30-узловой схемы IEEE: шесть ТЭС и двадцать четыре нагрузочные станции. Однако данный метод имеет ограничение точности оптимизации.

Задачи оптимизации являются одним из основных направлений исследований в электротехнике в настоящее время, поскольку позволяют получить значительную экономию затрат на проектирование и эксплуатацию ЭЭС, что является достаточно актуальной проблемой, поскольку с 1990 г. в России удельный расход топлива увеличился на 10 – 20 %, потери в ЭС выросли в 1,5 раза, понизилась эффективность использования гидроэнергетических ресурсов, выросли затраты на поддержание качества электроэнергии [10]. В работе [10] выполнены обзор и сравнение методов оптимизации по критериям: быстроедействие – надежность. Определены значимые проблемы в области проектирования ЭЭС: ошибочность проектных решений, которая может проявляться по прошествии длительного времени эксплуатации, а также недостаточная определенность и достоверность исходной информации. Рассмотрены следующие задачи оптимизации проектирования ЭЭС: номинальное напряжение сети, качество электроэнергии, величина потерь, определение системы напряжений для региона, нахождение оптимального радиуса действия распределительной сети, величина мощности компенсаторов. Также представлены задачи при модернизации и реконструкции сетей: выбор оптимальных трансформаторов, замена проводов и т. д. Описаны методы решения многокритериальных задач оптимизации, выбора критериев оптимизации. Например, при решении задачи оптимизации режимов эксплуатации для некоторого периода критерием являются потери энергии, а для текущего момента — потери мощности.

Исследование основных зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования (СЭО) проведено в работе [11]. Предложено рассмотреть показатель глубины контроля работоспособности и поиска дефектов как основного показателя контролепригодности, выполнена оценка коэффициента готовности, определена основная составляющая времени восстановления — время поиска дефекта. Предложено соотношение между глубиной контроля и временем поиска дефекта, приведены ограничения на определение исходных значений данных параметров, описан алгоритм поиска дефекта и приведена формула расчета оптимального коэффициента готовности. Определены зависимости между сложностью объекта и коэффициентом глубины контроля. Предложен алгоритм увеличения коэффициента глубины контроля для различных значений сложности объекта. Выявлены параметры, характеризующие надежность и уровень контролепригодности ЭО: среднее время восстановления, коэффициент готовности, величина сложности объекта, среднее время оценки работоспособности и поиска дефекта, коэффициент простоя. Приведенный анализ позволяет выбрать стратегии повышения надежности оборудования за счет изменения глубины контроля. Выполнен проверочный расчет по предложенной модели.

Сложность математического моделирования в части определения стратегии ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности в ОЭС [12] обусловлена неоднозначностью решения задач, зависящих от математических моделей, а также стратегий выбора управляющих воздействий. В [13] предложено использование нелинейных моделей и активной частотной стратегии. Основная задача в рамках предложенной работы сводится к анализу баланса мощности и энергии. Показана приоритетность исследования баланса мощности. Определена проблема в решении задачи балансовой надежности, а именно ограниченная пропускная способность межсистемных связей. Предложена вероятностная модель ЭЭС с биномиальным законом распределения вероятностей состояний генераторов. Показана проблема выбора алгоритма расчета балансовой надежности для существенно различающихся результатов проведенных расчетов по различным моделям, которая заключается в отсутствии эталонного метода расчета балансовой надежности. Рассмотрен ряд стратегий расчета, выделены и рекомендованы активная частотная стратегия и алгоритм обеспеченного спроса.

В работе [14] рассмотрены особенности щеточно-контактного аппарата современных генераторов. Определена важная задача щеточно-контактного аппарата мощных агрегатов: равномерное распределение тока, снимаемого с кольца. Сформулированы основные проблемы для решения данной задачи. Рассмотрены вопросы эксплуатации щеточно-контактного аппарата. Обоснована актуальность задачи повышения его надежности. Предложена система использования средств технической диагностики. Рассмотрены особенности устройства измерительного преобразователя. Представлена схема приемника сигнала от измерительного преобразователя. Определены характеристики АЦП. Указана возможность соединения с ЭВМ посредством специального ПО.

Однако повышение надежности возможно не только путем использования средств технической диагностики, но и посредством прогнозирования технического состояния ЭЭС и предотвращения отказов [15]–[19]. В работе [15] рассмотрены вопросы управления региональной ЭЭС. Проведено описание компонентов системы. Определена основная задача оптимизации алгоритмов управления. Предложен вариант ее решения на основе оценки текущего состояния и прогнозирования. Представлен процесс прогнозирования потребления электроэнергии региональной ЭЭС. Реализация модели осуществлена средствами C# и платформы .Net. Предложены срезы интерфейсов. Рассмотрены различные варианты прогнозирования: при помощи коэффициента роста / спада спроса и нейро-нечеткое прогнозирование.

Вопросы организации ЭЭС, ценовая модель оптового рынка электроэнергии и мощности, модель оптимального функционирования ЭЭС рассмотрены в работе [16]. Представлены алгоритмы оптимизации модели: минимума математического ожидания, минимума среднеарифметических затрат, минимальных / максимальных затрат. Показана сложность внедрения прогностических моделей для конечного потребителя и в блок генерации. Предложено повышение точности централизованного прогнозирования как средство решения данной проблемы.

Применение искусственных нейронных сетей в электроэнергетике. Использование ИНС в задачах повышения надёжности показано в [20], [21]–[24]. В [20] представлена методика краткосрочного прогнозирования энергопотребления ЭЭС на базе ИНС. Предложена модель ИНС, отвечающая требованиям поставленной задачи. Определено значение допустимой погрешности прогнозирования на базе ИНС (2,1 %). Обоснована целесообразность применения данной модели. В работе [22] обоснована необходимость оптимизации процесса функциональной диагностики. Рассмотрены существующие системы и методы диагностики. Определены недостатки этих методов. Предложена модель диагностирования на основе ИНС. Разработана принципиальная схема ИНС. На основе проведенного расчета по данной модели сделан вывод о целесообразности использования ИНС для создания адаптивных систем защиты и диагностики.

Однако, как отмечалось ранее, усложнение структуры ЭЭС приводит к увеличению контролируемых параметров и, следовательно, к усложнению вычислений и математических моделей. Для более экономичного машинного обучения можно использовать системы активного обучения. В рамках данного подхода машина сама принимает участие в выборе данных для обучения. Однако имеются значительные проблемы практического применения активного обучения: редкость использования данного подхода и соответственно, недостаточная развитость сложных алгоритмов обучения; выбор из общего пула данных не одного, а нескольких параметров за итерацию; зашумленность данных для обучения (результаты измерения, оценки экспертов); различная стоимость получения данных; различие между запросом и обучаемой моделью; многозадачное активное обучение; изменяющиеся или неизвестные классы моделей. Все это накладывает ограничения на применение обозначенного подхода [25], [26].

Моделирование адаптивных систем автоматического регулирования. В работе [27] рассмотрена математическая модель ЭЭС, позволяющая определять слабые звенья, приводящие к нарушению статической устойчивости. Приведен алгоритм решения задачи выделения слабых звеньев при переходе ЭЭС в новое состояние, характеризующееся некоторым запасом устойчивости вследствие введения новых элементов в систему, изменения уставок регуляторов возбуждения генераторов, форсировки емкостных компенсаторов, изменения режимов работы системы и т. д. Рассмотрены задачи моделирования режимных и структурных мероприятий, обеспечивающих повышение запаса устойчивости системы. Предложен способ оценки эффективности изменения структуры системы, основанный на авторском методе решения линейных матричных уравнений. Результаты применения данного алгоритма к конкретной модели энергосистемы позволяют выполнить локализацию элементов ЭЭС, изменение параметров которых наиболее сильно влияет на изменение устойчивости системы.

Определение запасов статической аperiodической устойчивости ЭЭС в стохастической постановке проведено в [28]. Приводится анализ устойчивости ЭЭС, включающий определение предельных режимов, границ областей устойчивости, оценку величины запаса устойчивости. Определены границы применимости данных параметров при решении практических задач. Показана необходимость нахождения нового параметра для организации быстродействующих методов оценки запаса устойчивости – критическое направление утяжеления. Предложен стохастический подход к решению поставленной задачи. Показана проблема при моделировании подобного решения: получение тривиального (нулевого) решения. Предложены пути ее решения. Выполнено численное моделирование по предложенной методике, показывающее увеличение риска нарушения устойчивости при росте размаха колебаний нагрузки, отключении одного из генераторов ЭЭС (наброс нагрузки), отключении линии электропередачи (сброс нагрузки). Предложены следующие результаты: различие моделирования в стохастической и детерминированной постановке, завышенное значение запаса устойчивости при увеличении дисперсии.

Работа [29] посвящена моделированию управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях. В ней разработана модель ЭЭС с генераторами, приводимыми в действие газодизельными двигателями с микропроцессорным управлением. В рамках модели решаются задачи управления, обеспечения качества ЭЭ. Моделирование выполнено посредством Proteus, Matlab. Рассмотрены предпосылки применения газодизельных

двигателей в автономных ЭЭС судов и буровых платформ. Определены сложности их использования: высокая степень зависимости частоты вращения от нагрузки, что не позволяет использовать распространенные регуляторы частоты вращения при параллельной работе генераторных агрегатов. Рассмотрен вопрос применения механических и электронных регуляторов частоты вращения. Обоснована целесообразность исследования вопроса распределения нагрузки и параллельной работы на математической модели. Сформулирована проблема анализа устойчивости работы генераторов. Предложена модель газодизельного двигателя и системы управления. В результате моделирования определено, что реализация контроля углового положения роторов генераторов и моментов на валу каждого двигателя обеспечивает распределение мощности в статических и динамических режимах, установлены наилучшие условия параллельной работы генераторов.

Моделирование ЭЭС с генераторами, приводимыми в действие газовыми и паровыми турбинными установками (соответственно ГТУ и ПТУ) проведено в [30], рассмотрены проблемы обеспечения регулировочных характеристик генераторов, приводимых ГТУ и ПТУ. Определена необходимость моделирования установок. Рассмотрены особенности моделирования ГТУ и ПТУ: упрощение модели до момента синхронизации с сетью большой мощности, управление с оценкой рассогласования по частоте (резервно — по скорости вращения), скорость изменения мощности, определяемая регуляторами температуры, ускорения и скорости вращения. Выявлена проблема дефицита исходных данных, связанных с неполной информацией о системах регулирования. Получение данной информации определяется экспериментальными измерениями и прогностическими моделями. Рассмотрены вопросы повышения надежности функционирования установок. Приведены различные модели ГТ. Выполнен сравнительный анализ. Сформулированы рекомендации к моделированию переходных процессов. Обоснована необходимость моделирования генератора совместно с приводным двигателем. Показана важная роль моделирования системы автоматического управления.

Важным решением является создание модели САР в среде Matlab на основе простейших электронных устройств [31]. В работе рассматривается процесс смены элементной базы систем автоматического управления. Приведены примеры современных устройств и систем. Рассмотрены преимущества и недостатки цифровой техники. Обоснована актуальность разработки современных САР. Предложены предпосылки к моделированию простейших электронных компонентов. Моделирование ведется средствами Matlab. Приводятся модели различных цифровых компонентов САР. Предложена дальнейшая разработка данного направления исследований, создание модели микроконтроллера на базе предложенных моделей и в дальнейшем создание модели САР.

Новый подход к регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме по минимуму потерь предложен в работе [32]. Рассмотрены вопросы применения САР с использованием цифровой элементной базы. Определены задачи САР в статическом и динамическом режимах ЭЭС. Поставлена проблема регулирования напряжения и реактивной мощности в реальном времени. Рассмотрено современное состояние уровня оптимизации в данном вопросе. Указаны следующие недостатки: необходимость расчета установившегося режима для устранения погрешностей измерения, сложность поиска оптимальных напряжений. Предложен метод решения данных проблем.

В статье [33] описана методика применения адаптивного нечеткого контроллера для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока. Для анализа выбран двигатель постоянного тока с постоянными магнитами. Применение именно методики нечеткого моделирования обуславливается неполной информацией о моделируемой системе. Показана проблема настройки параметров контроллера. Моделирование выполняется на базе Arduino DUE, определена конструкция нечеткого адаптивного ПИ-контроллера, рассмотрена методика моделирования и применения Arduino. Результаты работы показывают преимущества предложенного метода при моделировании изменения нагрузки на 30 и 60 %.

В статье [34] поставлена задача разработки программных средств расчёта по обеспечению устойчивости ЭЭС. Подобный адаптивный алгоритм использован в работе [35]. Обоснована актуальность исследований по моделированию адаптивного алгоритма управления САУ ГТУ. Постав-

лена задача оптимизации частоты тока синхронного генератора. Предложена математическая модель синхронного генератора. Представлена быстро решаемая модель ГТУ на основе модели СГ и статических характеристик, полученных экспериментально. Выполнено ограничение применения данного подхода для задач с точностью 2–5 %. Определены передаточные функции регулятора. Выполнена настройка регулятора. Проведено моделирование, на основании которого показано, что применение адаптивного регулятора приближает характеристики ГТУ к эталонным.

Проектирование экспертных систем. Сложность технических процессов приводит к необходимости разработки экспертных систем [36]–[38]. Определенные проблемы развития ЭЭС: увеличение параметров контроля, разнородность функциональных целей, сложность выбора оптимального решения в условиях многокритериальных оценок, обосновывают необходимость разработки адаптивных экспертных систем в области электроэнергетики [39].

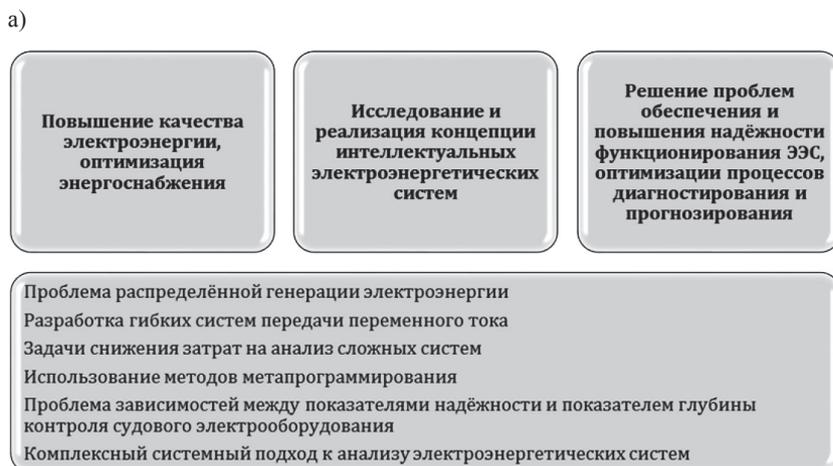
В работе [39] приведены различные методы моделирования. Предложено использовать метод частных критериев. Среди критериев выделены: суммарные затраты (экономический критерий), годовая потеря электроэнергии (технический критерий), экономические потери от нарушения энергоснабжения (техничко-экономический критерий), площадь используемой территории (социально-экономический критерий). Представлены методы расчета указанных критериев, диаграмма моделирования. Решение задачи моделирования проведено средствами С#. На основании проведенного моделирования предложено использовать данный метод для разработки автоматизированной системы принятия решений.

Многокритериальные системы принятия решений на основе нечетких множеств описаны в статье [40]. Проведен сравнительный анализ литературы, посвященной данной теме, проведена оценка производительности различных моделей. Отмечено, что в реальных условиях значения критериев недетерминированы и не могут быть определены точно, что приводит к необходимости использования нечетких множеств. Анализ выполнен по следующим критериям: количество альтернатив, признаков; метод выбора весов критериев из различных распределений; уровень нечеткости. Конечные результаты анализа были получены путем применения *tau-b* корреляции Кендалла и ро-теста Спирмана посредством соответствующего ПО.

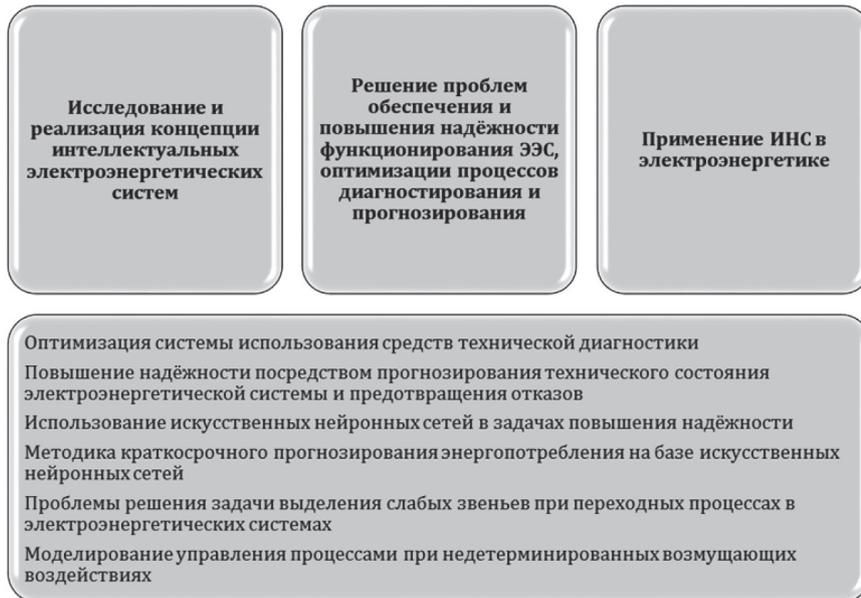
Фаззификация (введение нечеткости) матриц принятия решений выполнена средствами Matlab с использованием треугольной функции принадлежности. Предложена формула для оценки веса подзаключений, метод нахождения компромисса в условиях нечеткости. Были исследованы следующие методы: ELECTRE, TOPSIS, SAW, WPM, АНР, VIKOR, СР. При этом результаты моделирования ELECTRE и VIKOR отличались от остальных. В работе показана необходимость выбора методики применения нечетких множеств для каждой задачи в отдельности.

Обсуждение (Discussion)

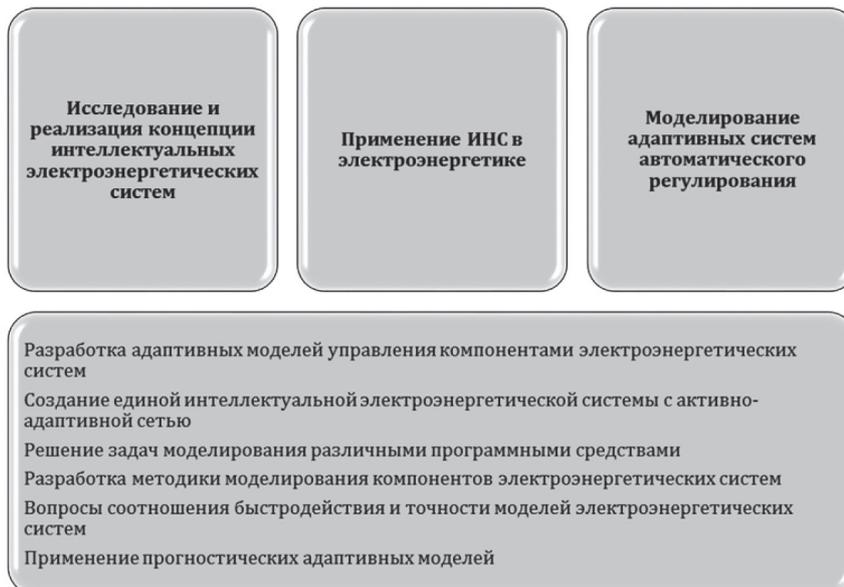
В ходе рассмотрения выделенных критериев актуальных исследований им в соответствии были поставлены различные проблемы (рис. 2).



б)



в)



г)



Рис. 2. Соответствие проблем и критериев направления исследований:
 а — этап 1; б — этап 2; в — этап 3; г — этап 4

Распределение библиографических источников по выделенным для исследования темам в рамках данного обзора представлено на рис. 3. Можно отметить сравнительно небольшое количество статей, посвященных повышению качества электроэнергии, оптимизации энергопотребления. В действительности, данная проблема является частью более широкого класса задач, а именно реализации концепции интеллектуальных ЭЭС. С этой областью исследований тесно связаны темы моделирования адаптивных САР, проектирования экспертных систем, повышения надежности ЭЭС. Частным случаем ряда представленных задач является методика применения ИНС в ЭЭ.

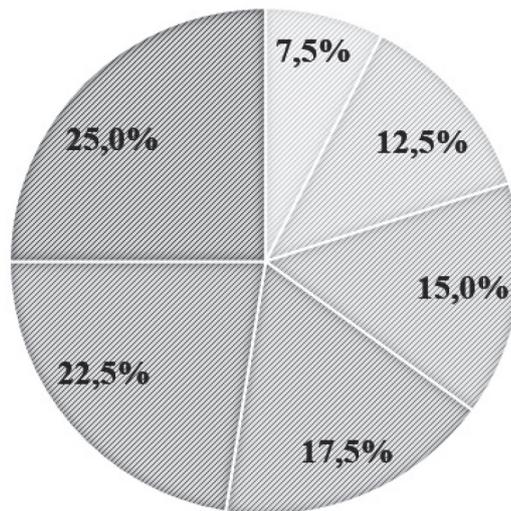


Рис. 3. Распределение источников по выделенным темам: повышение качества электроэнергии, оптимизация электроснабжения — 7,5 %; проектирование экспертных систем — 12,5 %; исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем — 15 %; применение искусственных нейронных сетей в электроэнергетике — 17,5 %; моделирование адаптивных систем автоматического регулирования — 22,5 %; решение проблем обеспечения и повывшения надежности функционирования ЭЭС, оптимизация процессов диагностирования и прогнозирования — 25 %

Выводы (Conclusions)

1. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы: ряд проблем в области электротехники, электротехнических комплексов и систем в настоящее время вызывает большой интерес у исследователей.

2. Рассмотренная литература определяет следующую тематику актуальных исследований: концепция распределенной генерации электроэнергии, задача создания интеллектуальных электроэнергетических систем, исследования в области повышения надежности, оптимизация средств технического диагностирования и прогнозирования, разработка адаптивных систем автоматического управления, оптимизация устойчивости работы генераторных агрегатов, экспертные системы и лабораторно-тренажерные комплексы.

3. Данные задачи обуславливают применение различных наукоемких методов моделирования и оптимизации: генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети, теория нечетких множеств, метод агрегативного моделирования, теория категорий, многокритериальные задачи, стохастические модели, метод частных критериев, линейные матричные уравнения, детерминированные модели, быстрорешаемые модели (совокупность упрощенной математической модели и статических характеристик моделируемого объекта).

4. Следует также уделить внимание используемым для моделирования техническим и компьютерным средствам: большая часть задач решается в среде Matlab; реализация генетических алгоритмов, методов нечетких множеств, ИНС осуществляется также на языках Python, R. Однако проводятся разработки библиотек для языков C++ и Java. Применение языка C# и платформы Net

для реализации вышеуказанных алгоритмов менее предпочтительна из-за сложности кроссплатформенного применения. Менее широко используются пакеты Mathcad, DIgSILENT Power Factory, Fazonord. Возможна также реализация ИНС на базе платформы Arduino DUE. Однако в основе своей большинство задач имеет строго экономическую или технико-экономическую направленность. Довольно узкий класс задач нацелен на выполнение экологической функции и совсем малая часть исследований в данной области имеет образовательную и социальную направленность.

5. В результате критического анализа и оценки результатов научных исследований были выявлены следующие перспективные направления исследования: разработка методик моделирования, основанной на комплексном системном подходе к анализу ЭЭС; проблема создания единой интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью; соотношение быстродействия и точности моделей ЭЭС; повышение точности оптимизации процессов; разработка моделей, менее чувствительных к неполной определенности и недостаточной достоверности исходной информации; широкое распространение прогностических адаптивных моделей; соотношение применения библиотек ИНС в проектах C++ и Java; реализация нейро-нечеткой адаптивной модели ЭЭС с пониженными требованиями к вычислительной мощности технических средств с возможностью использования модели для подготовки персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Новая эпоха в энергетике и умные сети / А. Кузнецов // Наука и инновации. — 2017. — № 8 (174). — С. 22–27.
2. Головищиков В. О. Распределенная генерация (включая возобновляемые источники энергии), как элемент интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / В. О. Головищиков, С.З. Закирова // Современные технологии и научно-технический прогресс. — 2016. — Т. 1. — С. 86–87.
3. Булатов Ю. Н. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. — 2016. — № 1 (29). — С. 63–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69.
4. Гусев А. С. Гибридная модель вставки постоянного тока / А. С. Гусев [и др.] // Энергия единой сети. — 2016. — № 2 (25). — С. 52–61.
5. Дубенко Ю. В. Обзор современной элементной базы в рамках концепции «умных» сетей / Ю. В. Дубенко, Ю. Н. Тимченко, Н. Н. Тимченко // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. — 2016. — № 121. — С. 1595–1607. DOI: 10.21515/1990-4665-121-096.
6. Ковалёв С. П. Применение метапрограммирования для повышения технологичности больших автоматизированных систем / С. П. Ковалёв // Информатика и ее применения. — 2016. — Т. 10. — № 1. — С. 56–66. DOI: 10.14357/19922264160105.
7. Халилов Э. Д. О моделировании режимов электроэнергетических систем с устройствами FACTS / Э.Д. Халилов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2017. — Т. 60. — № 4. — С. 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351.
8. Булатов Ю. Н. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2016. — № 2. — С. 30–45.
9. Поляхов Н. Д. Определение параметров и мест установки устройств управления передачей электроэнергии / Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, И. В. Швыров // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. — 2016. — Т. 1. — С. 106–111.
10. Хасанзода Н. Оценка эффективности функционирования распределительных сетей при оптимизация режимов электроэнергетических систем / Н. Хасанзода // Архивариус. — 2016. — Т. 2. — № 1 (5). — С. 9–13.
11. Каракаев А. Б. Исследование основных зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 180–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-180-192.
12. Беляев Н. А. Расчет показателей балансовой надежности энергосистем с учетом переменной топологии электрической сети / Н. А. Беляев, Н. В. Коровкин, В. С. Чудный // Электричество. — 2016. — № 4. — С. 4–10.

13. *Обоскалов В. П.* Математические модели и стратегии ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности в ОЭС / В. П. Обоскалов, Р. Т. Валиев, С. А. Гусев // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. — 2017. — № 4. — С. 25–36.

14. *Марков А.М.* Автоматизированная система мониторинга основных параметров щёточно-контактного аппарата электроэнергетического турбогенератора / А.М. Марков // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 32–40.

15. *Бурковский В. Л.* Реализация программного комплекса прогнозирования уровня регионального энергопотребления / В. Л. Бурковский, В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2016. — Т. 12. — № 3. — С. 41–47.

16. *Крысанов В. Н.* Функционально-алгоритмическая организация систем регионального энергопотребления / В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков, О. Ш. М. Шукур // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2016. — Т. 12. — № 1. — С. 44–49.

17. *Стеклов А. С.* Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 5. — С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.

18. *Kozarević S.* Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain / S. Kozarević, A. Puška // Operations Research Perspectives. — 2018. — Vol. 5. — Pp. 150–160. DOI: 10.1016/j.orp.2018.07.001

19. *Lan J.* Priority degrees for hesitant fuzzy sets: Application to multiple attribute decision making / J. Lan, R. Jin, Z. Zheng, M. Hu // Operations Research Perspectives. — 2017. — Vol. 4. — Pp. 67–73. DOI: 10.1016/j.orp.2017.05.001.

20. *Алексеева И. Ю.* Повышение надежности электроэнергетических систем на основе нейронных технологий / И.Ю. Алексеева // Электротехнические системы и комплексы. — 2016. — № 3 (32). — С. 15–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-15-19.

21. *Каменев А. С.* Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / А. С. Каменев, С. Ю. Королев, В. Н. Сокотущенко; под ред. В. В. Бушуева. — М.: Энергия, 2012. — 124 с.

22. *Пономарев В. А.* Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов // Новости электротехники. — 2011. — № 2.

23. *Торопов А. С.* Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей / А. С. Торопов, А. Н. Туликов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 5 (124). — С. 143–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.

24. *Yin J.* Partial orientation and local structural learning of causal networks for prediction / J. Yin, Y. Zhou, C. Wang, P. He, C. Zheng, Z. Geng // Causation and Prediction Challenge. — 2008. — Pp. 93–105.

25. *de Abril I. M.* Supervised neural network structure recovery / I. M. de Abril, A. Nowe // Neural Connections Workshop. — 2015. — Pp. 37–44.

26. *Settles B.* From theories to queries: Active learning in practice / B. Settles // Active Learning and Experimental Design workshop In conjunction with AISTATS 2010. — 2011. — Pp. 1–18.

27. *Абдурахманов А. М.* Алгоритм оперативного определения слабых звеньев сети, приводящих к нарушению статической устойчивости / А. М. Абдурахманов, К. А. Зимин, В. Н. Рябченко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2016. — Т. 3. — № 3. — С. 20–26.

28. *Крюков А. В.* Определение запасов статической аperiodической устойчивости электроэнергетических систем в стохастической постановке / А. В. Крюков, В. В. Сенько, Е. О. Тихомиров // Вестник Иркутского Государственного технического ун-та. — 2016. — № 4 (111). — С. 125–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-125-135.

29. *Черный С. Г.* Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация процессов управления. — 2016. — № 1 (43). — С. 37–46.

30. *Бахмисов О. В.* Выбор моделей газотурбинных и парогазовых установок для исследования процессов в ЭЭС / О. В. Бахмисов, О. Н. Кузнецов // Электричество. — 2016. — № 9. — С. 15–22.

31. *Пионкевич В. А.* Математическое моделирование элементов цифровой электроники для решения задач автоматического управления в энергетике / В. А. Пионкевич // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. — 2016. — № 4 (111). — С. 136–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-136-144.

32. Тамазов А. И. Новый подход к регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме по минимуму потерь / А. И. Тамазов // *Электричество*. — 2016. — № 8. — С. 29–36.
33. Zaki A. M. Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control / A. M. Zaki, M. El-Bardini, F. A. S. Soliman, M. M. Sharaf // *Ain Shams Engineering Journal*. — 2018. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 65-75. DOI: 10.1016/j.asej.2015.10.003.
34. Авраменко В.Н. Автоматизация расчета дозированных управляющих воздействий в адаптивной автоматике обеспечения устойчивости ЭЭС / В. Н. Авраменко, Н. Т. Юнеева // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. — 2016. — № 1. — С. 8–13.
35. Зиятдинов И. П. Исследование адаптивного алгоритма управления газотурбинными установками с учетом динамики синхронного генератора / И. П. Зиятдинов, Б. В. Кавалеров, И. А. Крылова // *Современные наукоемкие технологии*. — 2016. — № 8–2. — С. 225–231.
36. Бордюг А. С. Моделирование элементов идентификации и контроля параметров системы для интеллектуальной поддержки принятия решений / А. С. Бордюг, И. Л. Титов, А. А. Железняк // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2016. — № 3. — С. 75–85.
37. Кацадзе Т. Л. Принятие решений по рациональному регулированию режимов неоднородных электрических сетей / Т. Л. Кацадзе // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. — 2016. — № 1. — С. 14–19.
38. Стеклов А. С. Разработка модели экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. — 2016. — Т. 3. — № 2. — С. 24–27.
39. Семенова Н. Г. Математические модели частных критериев и их программная реализация в оценке принимаемого решения по развитию системы электроснабжения промышленного района города / Н. Г. Семенова, А. Д. Чернова // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. — 2016. — № 4. — С. 94–99.
40. Zamani-Sabzi H. Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment / H. Zamani-Sabzi, J. P. King, C. C. Gard, S. Abudu // *Operations Research Perspectives*. — 2016. — Vol. 3. — Pp. 92–117. DOI: 10.1016/j.orp.2016.11.001.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Aleksandr. “A new era in energy and smart networks.” *Science and Innovations* 8(174) (2017): 22–27.
2. Golovshchikov, V. O., and S. Z. Zakirova. “Distributed generation (including renewable energy), as an element of intellectual power system with active-adaptive network.” *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* 1 (2016): 86–87.
3. Bulatov, Yu. N., A. V. Kryukov, and Van Khuan Nguen. “Forecasting controls for distributed generation plants.” *Systems. Methods. Technologies* 1(29) (2016): 63–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69
4. Gusev, A. S., A. O. Sulaimanov, R. A. Ufa, A.S. Vasil’ev, N.G. Lozinova, and O. V. Suslova. “Gibridnaya model’ vstavki postoyannogo toka.” *Energiya edinoi seti* 2(25) (2016): 52–61.
5. Dubenko, Yurii Vladimirovich, Yurii Nikolaevich Timchenko, and Nikolai Nikolaevich Timchenko. “A review of the current element base within the concept of smart grids.” *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University* 121 (2016): 1595–1607. DOI: 10.21515/1990-4665-121-096.
6. Kovalyov, Sergey P. “Metaprogramming to increase manufacturability of large-scale software-intensive systems.” *Informatics and Applications* 10.1 (2016): 56–66. DOI: 10.14357/19922264160105.
7. Halilov, E.D. “On the Simulation of Modes of Electric Power Systems with FACTS Devices.” *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 60.4 (2017): 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351.
8. Bulatov, Yury N., and Andrey V. Kryukov. “Application of genetic algorithms for setting adjustment controllers of distributed generation plants.” *Information and mathematical technologies in science and management* 2 (2016): 30–45.
9. Polyakhov, N.D., I.A. Prikhodko, and I.V. Shvyrov. “Determination of the parameters and place of the installation flexible AC transmission systems.” *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike* 1 (2016): 106–111.
10. Khasanzoda, Nasrullo. “Assessment of efficiency of functioning of distributive networks at optimization of the modes of electrical power systems.” *Arkhivarius* 2.1(5) (2016): 9–13.

11. Karakaev, Aleksandr Bakhtireevich, and Andrey Vladimirovich Lukanin. "Investigation main dependences between indicators of reliability and indicator of ship electroequipment control depth." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 180–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-180-192.
12. Belyaev, N. A., N. V. Korovkin, and V. S. Chudnyi. "Calculating Power System Balance Reliability Indicators Taking into Account Variable Electric Network Topology." *Electricity* 4 (2016): 4–10.
13. Oboskalov, V. P., R. T. Valiev, and S. A. Gusev. "Mathematical models and strategies of load shedding for optimal distribution of power short age in united electrical power system." *Thermal Engineering* 4 (2017): 25–36.
14. Markov, A. M. "Automatic system monitoring of the main parameters brush-contact device turbo-alternator." *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 3 (2016): 32–40.
15. Burkovskii, V. L., V. N. Krysanov, and A. L. Rutskov. "Sales program complex prediction of the regional level of energy consumption." *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.3 (2016): 41–47.
16. Krysanov, V. N., A. L. Rutskov, and Omar Shukur Makhmud Shukur. "Functional and algorithmic organization systems of regional energy consumption." *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.1 (2016): 44–49.
17. Steklov, A. S., A. V. Serebryakov, and V.G. Titov. "Forecasting technical condition of ship electric power systems." *Vestnik IGEU* 5 (2016): 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.
18. Kozarević, Safet, and Adis Puška. "Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain." *Operations Research Perspectives* 5 (2018): 150–160. 10.1016/j.orp.2018.07.001.
19. Lan, Jibin, R. Jin, Z. Zheng, and M. Hu. "Priority degrees for hesitant fuzzy sets: application to multiple attribute decision making." *Operations Research Perspectives* 4 (2017): 67–73. DOI: 10.1016/j.orp.2017.05.001.
20. Alekseeva, Inna Yu. "Improving The Reliability of Electric Energy Systems on The Basis of Neural Technologies." *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(32) (2016): 15–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-15-19.
21. Kamenev, A. S., S. Yu. Korolev, and V. N. Sokotushchenko. *Neiromodelirovanie kak instrument intellektualizatsii energoinformatsionnykh setei*. M: Energiya, 2012.
22. Ponomarev, V. A., and I. F. Suvorov. "Kompleksnyi metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelyi na osnove ispol'zovaniya iskusstvennykh neuronnykh setei." *Novosti elektrotekhniki* 2 (2011).
23. Toropov, Andrei S., and Aleksandr N. Tulikov. "Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.5(124) (2017): 143–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
24. Yin, Jianxin, Y. Zhou, C. Wang, P. He, C. Zheng, and Z. Geng. "Partial orientation and local structural learning of causal networks for prediction." *Causation and Prediction Challenge*. 2008. 93–105.
25. de Abril, Ildelfons Magrans, and Ann Nowe. "Supervised neural network structure recovery." *Neural Connectomics Workshop*. 2015. 37–44
26. Settles, Burr. "From theories to queries: Active learning in practice." *Active Learning and Experimental Design workshop In conjunction with AISTATS 2010*. 2011. 1–18.
27. Abdurakhmanov, A.M., K.A. Zimin, and V.N. Ryabchenko. "The Operational Definition Algorithm of Weak Links Network, Leading to Violation of the Small Signal Stability." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 3.3 (2016): 20–26.
28. Kryukov, Andrei, Vladislav Senko, and Evgeniy Tikhomirov. "Determination of aperiodic static stability margins of electrical power systems based on a stochastic approach." *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 4(111) (2016): 125–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-125-135.
29. Chernyi, Sergei Grigorievich, and Anton Aleksandrovich Zhilenkov. "Processes control modeling in complex systems in case of indeterminate perturbation actions." *Automation of Control Processes* 1(43) (2016): 37–46.
30. Bakhmisov, Oleg Vladimirovich, and Oleg Nikolayevich Kuznetsov. "Experimental Comparison and Selection of Models of Gas Thrbine Units and Combined Cycle Plants for Investigating Processes in Electric Power Systems." *Elektrichestvo* 9 (2016): 15–22.
31. Pionkevich, Vladimir. "Mathematical modeling of digital electronics elements to solve automatic control problems in power engineering." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 4(111) (2016): 136–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-136-144.
32. Tamazov, Aleksandr Iosifovich. "A New Approach to Control of Voltages and Reactive Power in a Power System Based on the Minimal Loss Criterion." *Elektrichestvo* 8 (2016): 29–36.

33. Zaki, Ahmad M., Mohammad El-Bardini, F. A. S. Soliman, and Mohammed Mabrouk Sharaf. "Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control." *Ain Shams Engineering Journal* 9.1 (2018): 65–75. DOI: 10.1016/j.asej.2015.10.003.
34. Avramenko, Vladimir Nikolaevich, and Nataliya Takhirdzhanovna Yuneeva. "Avtomatizatsiya rascheta dozirovannykh upravlyayushchikh vozdeistvii v adaptivnoi avtomatike obespecheniya ustoichivosti ees." *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* 1 (2016): 8–13.
35. Ziyatdinov, I. R., B. V. Kavalero, and I. A. Krylova. "Research of gas turbine units adaptive control algorithms to the dynamics of the synchronous generator." *Modern high technologies* 8-2 (2016): 225–231.
36. Bordyug, Aleksandr Sergeevich, Ivan Leonidovich Titov, and Aleksandr Aleksandrovich Zheleznyak. "Modeling elements for identification and control of the system parameters for intellectual decision-making support." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2016): 75–85.
37. Katsadze, Teimuraz Luarsabovich. "Prinyatie reshenii po ratsional'nomu regulirovaniyu rezhimov neodnorodnykh elektricheskikh setei." *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* 1 (2016): 14–19.
38. Steklov, A. S., A. V. Serebryakov, and V. G. Titov. "Developing a Model of Expert System Diagnostics and Forecasting Technical Condition of Ship Electric Power Systems." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 3.2 (2016): 24–27.
39. Semenova, N. G., and A. D. Chernova. "Mathematical models for multiple criteria and its software for evaluating decisions on development of electric power supply of industrial city's district." *Intellect. Innovation. Investments* 4 (2016): 94–99.
40. Zamani-Sabzi, Hamed, James Phillip King, Charlotte C. Gard, and Shalamu Abudu. "Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment." *Operations Research Perspectives* 3 (2016): 92–117. DOI: 10.1016/j.orp.2016.11.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракаев Александр Бахтыреевич — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: aleksandr.karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru
Галиев Глеб Андреевич — аспирант
 Научный руководитель:
 Каракаев Александр Бахтыреевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: veilagbelg@mail.ru, kaf_ose@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karakayev, Aleksandr B. — Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: aleksandr.karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru
Galiev, Gleb A. — Postgraduate
 Supervisor:
 Karakayev, Aleksandr B.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: veilagbelg@mail.ru, kaf_ose@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.
 Received: November 27, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164

COMPUTER SIMULATION OF ELECTRICAL PROPULSION COMPLEX FOR «YAMAL LNG» ARCTIC GAS CARRIER

L. E. Egorov, A. A. Vinogradov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

At present, when studying the dynamic modes of complex objects operation, computer modeling is widely used, the basis of which is a programmatic interpretation of the mathematical model of an object that reproduces the processes of its functioning in time. The use of modern software products for mathematical modeling can significantly simplify the task of creating a model. Modern software applications for visual graphic modeling, for example, Matlab / Simulink, allow you to develop computer models without using programming skills. On modern Arctic gas tankers, six-phase synchronous electric motors with an excitation winding and damper windings on the rotor are used as propulsion motors. A computer model of the electric propulsion system of the Arctic gas tanker of the Yamal LNG project and a study of its operating modes by computer simulation are presented in the paper. For ice class vessels, the following modes are distinguished: maneuvering the vessel, the course of the vessel on the high seas, the operation of the vessel in ices. The propulsive complexes of such vessels should be adapted to these modes, providing maximum efficiency in each of them. The mathematical model of the object, its parameters, the computer model of the complex in the Matlab / Simulink environment, as well as the simulation results of the modes of maneuvering the vessel, the vessel course on the high seas and vessel work in the ice conditions, are described in the paper. The simulation results analysis from the point of view of increasing the electric propulsion complex efficiency in the various modes of its operation is carried out. Recommendations on the settings and limitations of a computer model of the electromotive propulsion complex are given. A computer model can be used both to study the functioning one complex and to develop computer models of integrated shipboard automated electric power systems with several electric propulsion systems.

Keywords: Arctic gas carrier, electrical propulsion complex, Azipod, computer model, operating mode.

For citation:

Egorov, Lev E., and Andrey A. Vinogradov. "Computer simulation of electrical propulsion complex for «Yamal LNG» Arctic gas carrier." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164.

УДК 621.313.323.8

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОГО ТАНКЕРА-ГАЗОВОЗА ПРОЕКТА «YAMALMAX»

Л. Е. Егоров, А. А. Виноградов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что в настоящее время при исследовании динамических режимов работы сложных объектов находит широкое применение компьютерное моделирование, основой которого является программная интерпретация математической модели объекта, воспроизводящая процессы его функционирования во времени. Рассмотрены применяемые современные программные продукты для математического моделирования, позволяющие существенно упростить задачу создания модели. Современные программные приложения визуального графического моделирования, например, Matlab/Simulink, позволяют разрабатывать компьютерные модели без использования навыков программирования. На современных арктических танкерах-газовозах в качестве гребных электродвигателей используются шестифазные синхронные электродвигатели с обмоткой возбуждения и демпферными обмотками на роторе. В работе представлена компьютерная модель электродвигательного пропульсивного комплекса арктического танкера-газовоза проекта «Yamalmax» и проведено исследование его режимов работы методом компьютерного моделиро-

вания. Для судов ледового класса различают режимы: маневрирования судна, хода судна в открытом море, работы судна во льдах. Пропульсивные комплексы таких судов должны быть адаптированы к этим режимам, обеспечивая максимальную эффективность в каждом из них. В статье приведены математическая модель объекта, ее параметры, компьютерная модель комплекса в среде Matlab/Simulink, а также результаты моделирования режимов маневрирования судна, хода судна в открытом море, работы в ледовых условиях. Выполнен анализ результатов моделирования с точки зрения повышения эффективности работы электродвигательного пропульсивного комплекса в различных режимах его работы. Даны рекомендации по настройкам и ограничениям компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса. Компьютерная модель может быть использована как для исследований функционирования одного комплекса, так и при разработке компьютерных моделей единых судовых автоматизированных электроэнергетических систем с несколькими электродвигательными пропульсивными комплексами.

Ключевые слова: арктический газовоз, электродвигательный пропульсивный комплекс, Azipod, компьютерная модель, режим работы.

Для цитирования:

Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование режимов работы электродвигательного пропульсивного комплекса арктического танкера-газовоза проекта «Yamalmax» / Л. Е. Егоров, А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164.

Введение (Introduction)

Для круглогодичной транспортировки сжиженного природного газа в Арктическом регионе в настоящее время активно строятся и эксплуатируются арктические танкеры-газовозы класса ARC7 (согласно классификации PC) с полноповоротными винторулевыми электродвигательными пропульсивными комплексами (ЭДПК) типа Azipod, способные самостоятельно двигаться в ледовых условиях без ледокольной поддержки. На рис. 1 представлена единая судовая автоматизированная электроэнергетическая система (ЕСАЭЭС) с тремя комплексами Azipod арктического танкера-газовоза типа «Кристоф де Маржери».

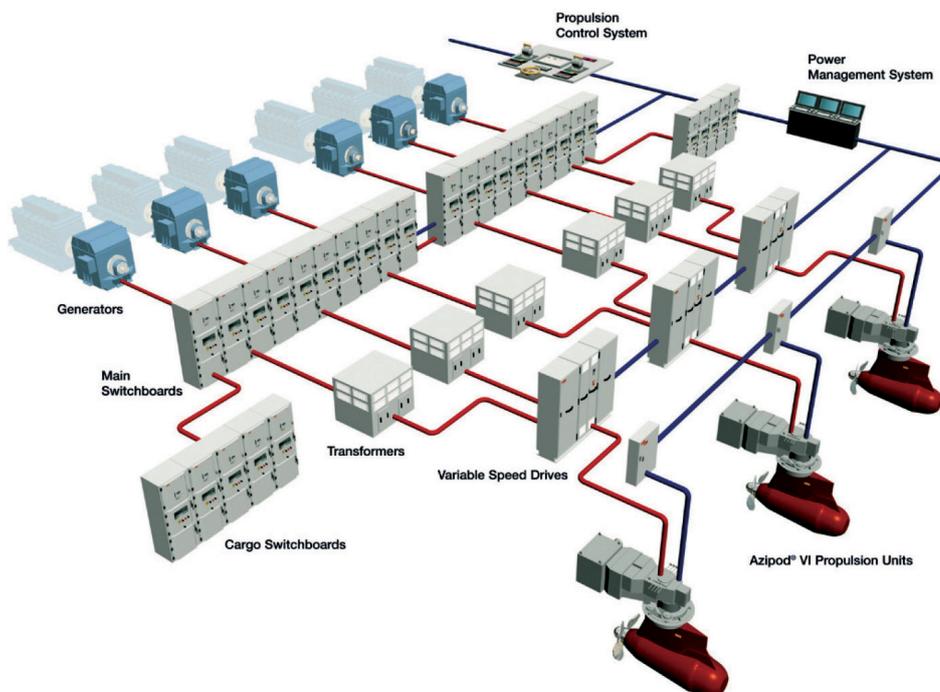


Рис. 1. Единая судовая автоматизированная электроэнергетическая система с тремя комплексами Azipod

Опыт эксплуатации таких судов и их систем электродвижения в акватории Обской губы [1] показал необходимость в дополнительных исследованиях режимов работы ЭДПК с перегрузочным

моментом на валу, разработки новых алгоритмов управления и защиты комплексов в тяжелых ледовых условиях, развитии навыков управления и поиска неисправностей для обслуживающего персонала.

Эффективным способом решения поставленных задач является компьютерное моделирование режимов работы ЭДПК в специальных компьютерных приложениях. Компьютерному моделированию современных ЕСАЭЭС посвящены работы [2]–[4], в которых рассматриваются методы расчета этих установок, при этом вопросы разработки и настройки комплексных систем автоматизации объектов рассмотрены недостаточно. В работе [5] исследуется способ проектирования систем управления сложными динамическими объектами, в основе которого находится метод модельно-ориентированного проектирования в рамках единой компьютерной среды. Таким образом, применение компьютерного моделирования при решении задач управления режимами ЕСАЭЭС является актуальным и целесообразным.

Основной целью данной работы является разработка компьютерной модели автоматизированного ЭДПК. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую и компьютерную модель ЭДПК, учитывающую тип гребного электродвигателя (ГЭД), его параметры (активные и индуктивные сопротивления обмоток, инерционную постоянную ротора и т. д.), особенности динамики движения судна.
2. Разработать компьютерную модель системы автоматизации ЭДПК, на основе динамических характеристик модели объекта.
3. Исследовать функционирование автоматизированного ЭДПК в различных режимах работы комплекса (режим маневрирования судна, ход судна в открытой воде, ход судна во льдах) методом компьютерного моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При исследовании динамических режимов работы объектов в настоящее время все чаще используют компьютерное моделирование, основой которого является программная интерпретация математической модели объекта, воспроизводящая процессы его функционирования во времени. Применение современных программных продуктов для математического моделирования позволяет существенно упростить задачу создания модели. Современные программные приложения визуального графического моделирования (например, Matlab / Simulink) позволяют разрабатывать компьютерные модели без использования навыков программирования [5], [6].

Основные этапы компьютерного моделирования:

1. Разработка математической модели объекта и ее программная реализация.
2. Исследование режимов работы объекта на компьютерной модели и ее верификация.
3. Разработка и проверка управляющих алгоритмов в составе компьютерной модели.
4. Анализ и интерпретация результатов моделирования, рекомендации к использованию.

В состав математической модели ЭДПК входят модель гребного электродвигателя (ГЭД), модель системы *судно – гребной винт*, а также модель системы управления. На современных арктических танкерах-газовозах в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) используются шести-фазные синхронные электродвигатели (ШСГЭД) с обмоткой возбуждения и демпферными обмотками на роторе, математическая модель которого представлена системой уравнений (1).

Параметры ШСГЭД, используемые в модели, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры шестифазного синхронного гребного электродвигателя

Наименование	Обозначение	Значение	Единица измерения
Номинальная мощность	P_n	15000	кВт
Номинальное напряжение	U_n	2950	В
Номинальный ток	I_n	2·3049	А
Номинальный момент	M_n	1326	кН·м

Таблица 1
 (Окончание)

Номинальная частота вращения ротора	ω_n	108	об/мин
Номинальная частота	f_n	10,8	Гц
Активное сопротивление обмотки статора	R_s	0,0144	о. е.
Активное сопротивление обмотки возбуждения	r_f	0,008	о. е.
Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси	r_D	0,0723	о. е.
Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси	r_Q	0,0447	о. е.
Сопротивление рассеяния обмотки статора	x_s	0,189	о. е.
Сопротивление рассеяния демпферной обмотки по продольной оси	x_{Ds}	0,292	о. е.
Сопротивление рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси	x_{Qs}	0,2792	о. е.
Сопротивление рассеяния обмотки возбуждения	x_{fs}	0,37	о. е.
Сопротивление взаимоиנדукции по продольной оси (ненас.)	x_{md}	2,102	о. е.
Сопротивление взаимоиנדукции по поперечной оси (ненас.)	x_{mq}	1,099	о. е.
Сопротивление рассеяния между статорными обмотками	x_{s12}	0,00	о. е.
Постоянная ротора	T_J	1	с

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_{d1} &= u_{d1} - r_s i_{d1} + \omega \Psi_{q1}; \\
 p\Psi_{q1} &= u_{q1} - r_s i_{q1} - \omega \Psi_{d1}; \\
 p\Psi_{d2} &= u_{d2} - r i_{d2} + \omega \Psi_{q2}; \\
 p\Psi_{q2} &= u_{q2} - r_s i_{q2} - \omega \Psi_{d2}; \\
 i_f &= u_f - T_f p\Psi_f; \\
 i_D &= -T_D p\Psi_D; \\
 i_Q &= -T_Q p\Psi_Q; \\
 \omega &= \frac{1}{T_J p} (m_{\Sigma 1} + m_{\Sigma 2} - m_c); \\
 m_{\Sigma 1} &= \Psi_{d1} i_{q1} - \Psi_{q1} i_{d1}; \\
 m_{\Sigma 2} &= \Psi_{d2} i_{q2} - \Psi_{q2} i_{d2}; \\
 \Psi_{d1} &= x_{s1} i_{d1} + x_{s12} (i_{d1} + i_{d2}) + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_{d2} &= x_{s2} i_{d2} + x_{s12} (i_{d1} + i_{d2}) + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_{q1} &= x_{s1} i_{q1} + x_{s12} (i_{q1} + i_{q2}) + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_{q2} &= x_{s2} i_{q2} + x_{s12} (i_{q1} + i_{q2}) + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_f &= x_{fs} i_f + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_D &= x_{Ds} i_D + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_Q &= x_{Qs} i_Q + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_{md} &= x_{md} (i_f + i_D + i_{d1} + i_{d2}); \\
 \Psi_{mq} &= x_{mq} (i_{q1} + i_{q2} + i_Q),
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_{d1}, u_{q1}, i_{d1}, i_{q1}, \Psi_{d1}, \Psi_{q1}, u_{d2}, u_{q2}, i_{d2}, i_{q2}, \Psi_{d2}, \Psi_{q2}$ — напряжения, токи и потокосцепления статорных обмоток двигателя по осям d, q ; u_f, i_f, Ψ_f — напряжение, ток и потокосцепление обмотки возбуждения двигателя; $m_{1\sigma}, m_{2\sigma}$ — электромагнитные моменты двигателя; m_c — момент сопротивления двигателя; ω — относительная частота вращения двигателя; r_s — активное сопротивление

обмотки статора; T_f, T_D, T_Q — постоянные времени обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя; T_j — инерционная постоянная двигателя; $x_{d1}, x_{q1}, x_{d2}, x_{q2}$ — индуктивные сопротивления статорных обмоток по продольной и поперечной осям; x_{md}, x_{mq} — сопротивления взаимоиндукции обмоток по продольной и поперечной осям; x_f, x_D, x_Q — индуктивные сопротивления обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя; x_{d12}, x_{q12} — индуктивные сопротивления обмоток статора по продольной и поперечной осям; x_{s1}, x_{s2} — индуктивные сопротивления рассеяния статорных обмоток; x_{s12} — индуктивное сопротивление рассеяния взаимоиндукции между статорными обмотками; x_{fs}, x_{Ds}, x_{Qs} — индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя [7]–[9].

Модель системы *судно – гребной винт* в относительных единицах описывается уравнениями (2):

$$\left. \begin{aligned} T_c \frac{dv_c}{dt} &= \omega^2 - v_c^2; \\ m_c &= k_{2ш} \omega^2 - (k_{2ш} - 1) v_c^2 + m_{доп}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где T_c — постоянная времени судна; v_c — скорость судна; m_c — момент сопротивления гребного винта; где $m_{доп}$ — дополнительный момент создаваемый внешними силами (качкой судна, ледовыми массами и т. д.); $k_{2ш}$ — коэффициент момента в швартовном режиме; ω — угловая частота вращения винта.

На основе представленных уравнений в среде Matlab/Simulink разработана программа для моделирования режимов ЭДПК (рис. 2), представляющая собой совокупность компьютерной модели комплекса (рис. 3), виртуальной панели управления и средств визуализации исследуемых параметров [10]–[12]. Программа позволяет моделировать как отдельный комплекс, так и системы электродвижения с несколькими ЭДПК.

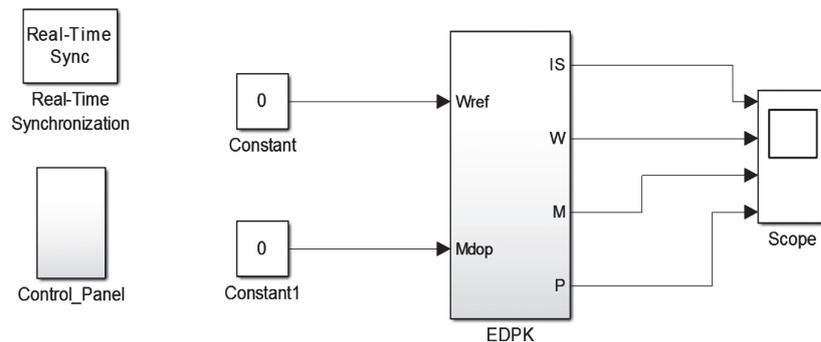


Рис. 2. Графический интерфейс программы для моделирования режимов электродвигательного пропульсивного комплекса

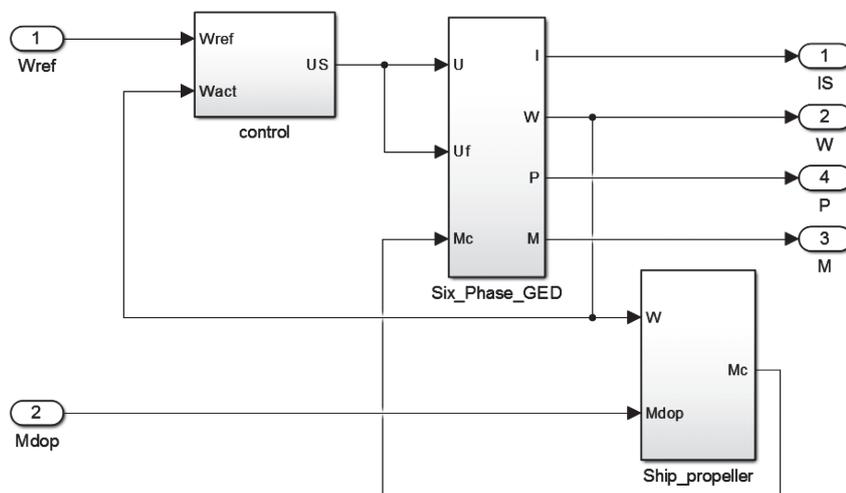


Рис. 3. Структурная схема компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса

Результаты (Results)

Различают следующие режимы работы судов ледового класса: маневрирования судна, хода судна в открытом море и работы судна во льдах. Пропульсивные комплексы таких судов должны быть адаптированы к этим режимам, обеспечивая при этом максимальную эффективность в каждом из них [13], [14].

Маневренный режим (Maneuvering Mode). В этом режиме частота вращения и мощность ЭДПК ограничены определенным диапазоном, автоматически выбирается режим регулирования частоты вращения ГЭД [15]. Система обладает максимальным быстродействием и точностью регулирования.

На рис. 4 представлены результаты моделирования маневренного режима работы ЭДПК, в данном режиме действуют следующие ограничения: частота вращения — 62,5 %, момент — 100 %, мощность — 50 %. В начальный момент времени происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения, в момент времени 20 с происходит увеличение момента сопротивления на валу ГЭД, в момент времени 40 с — резкое снижение момента на валу ГЭД [16], [17].

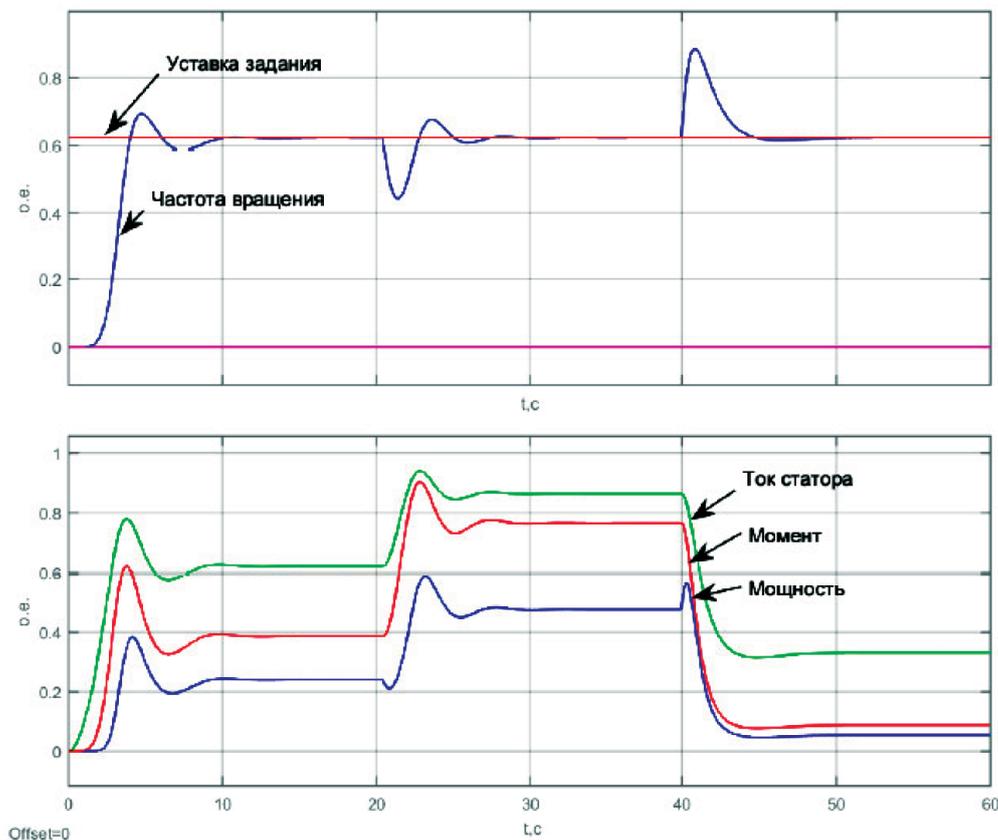


Рис. 4. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании режима маневрирования судна

Режим открытого моря (Open Sea Mode). В этом режиме ограничения по частоте вращения отсутствуют. При увеличении мощности ГЭД система управления автоматически переключается с режима регулирования частоты вращения на режим регулирования мощности. На рис. 5 представлены результаты моделирования режима работы ЭДПК в открытом море. На ГЭД действуют следующие ограничения: частота вращения — 100 %, момент — 100 %, мощность — 100 %. В момент, равный 10 с, происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения. По мере разгона судна момент на валу ГЭД снижается, также снижаются ток статора и мощность ГЭД, при этом система управления поддерживает постоянство его частоты вращения.

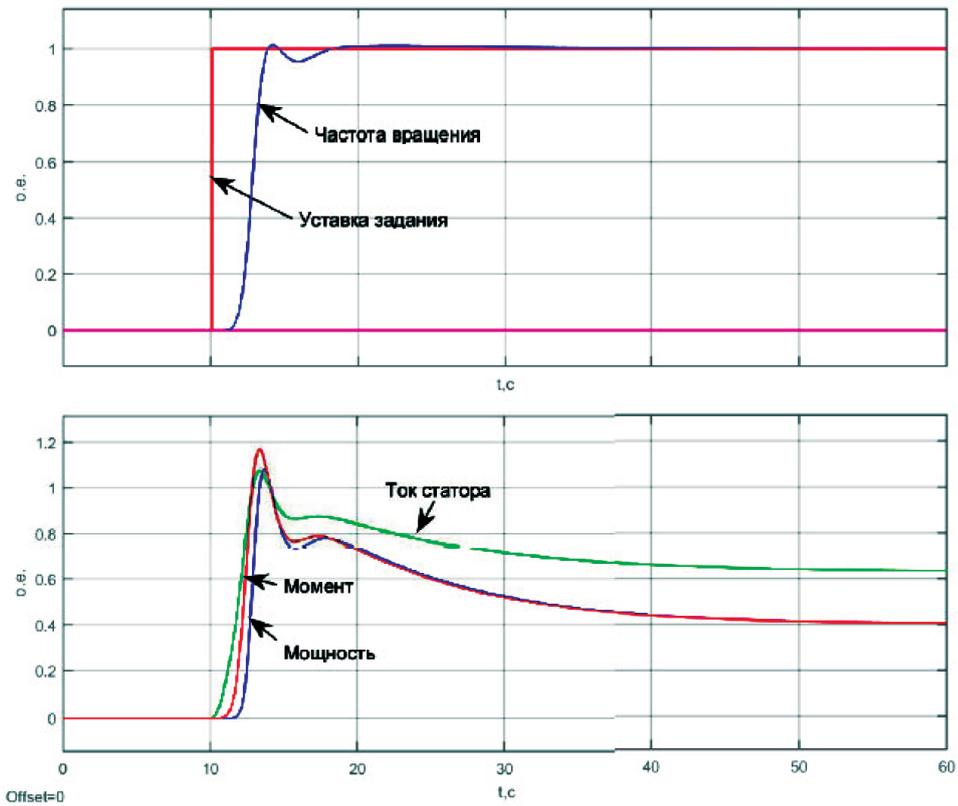


Рис. 5. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании режима открытого моря

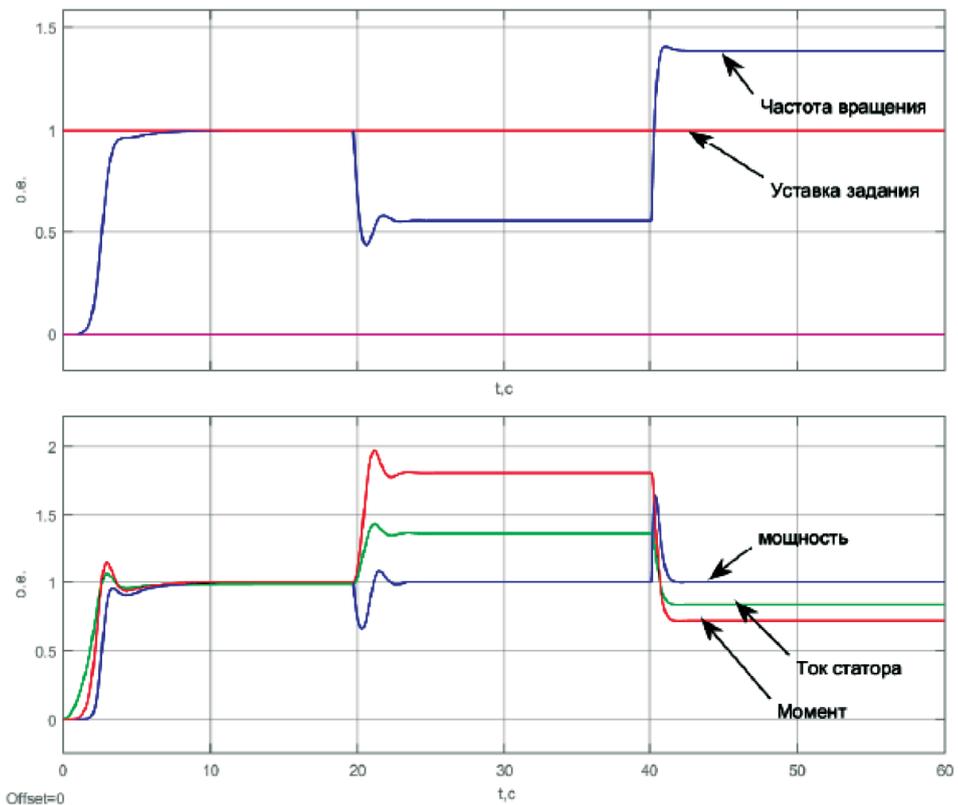


Рис. 6. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании ледового режима

Ледовый режим (Ice Mode). При работе судна в ледовых условиях происходит взаимодействие гребных винтов со льдом, при этом частота вращения ГЭД может значительно снизиться. Чтобы компенсировать влияние ледовых масс на ГЭД, его крутящий момент в ледовом режиме увеличивается до 180 %. При этом система управления ЭДПК автоматически переходит в режим регулирования мощности. На рис. 6 представлены результаты моделирования ледового режима ЭДПК. В начальный момент времени происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения, в момент времени 20 с наблюдается резкое увеличение момента сопротивления на валу ГЭД, комплекс начинает работать в режиме с перегрузочным моментом и пониженной частотой вращения, сохраняя постоянство мощности, в момент времени 40 с происходит резкое снижение момента на валу ГЭД, комплекс переходит в режим работы при частоте вращения выше номинальной и пониженном моменте на валу.

Обсуждения (Discussions)

Результаты моделирования наглядно подтверждают, что для повышения эффективности работы ЭДПК в различных режимах его система управления должна иметь соответствующие настройки и ограничения [18]–[20]. Настройки и ограничения системы управления представленной компьютерной модели ЭДПК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Настройки и ограничения системы управления компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса

Настройки и ограничения	Режим маневрирования	Режим открытого моря	Ледовый режим
Максимальная частота вращения, %	62,5	100	100
Максимальный момент, %	100	100	180
Максимальная мощность, %	50	100	100
Уровень автоматического перехода в режим регулирования частоты вращения, % (уменьшение параметра)	Режим регулирования частоты вращения	62,5	Режим регулирования мощности
Уровень автоматического перехода в режим регулирования мощности, % (увеличение параметра)		68	

В качестве основных рекомендаций к системам управления ЭДПК могут быть предложены следующие:

1. В маневренном режиме для обеспечения быстродействия и точности регулирования параметров использование режима регулирования частоты вращения ГЭД (Speed Mode).
2. В ледовых условиях для предотвращения резких изменений нагрузки генераторных агрегатов и перегрузки ГЭД использование режима регулирования мощности (Power Mode).
3. Для предотвращения перегрузки генераторных агрегатов использование функций ограничения и снижения мощности ГЭД.
4. Ограничение интенсивности увеличения и снижения мощности ГЭД является особенно актуальной функцией при работе главных дизель-генераторных агрегатов на природном газе, отличающихся замедленной реакцией на изменение нагрузки.
5. Для шестифазных ГЭД возможность реализации режима работы на одной статорной обмотке (Half Mode) с ограничением мощности ГЭД до 50 %.

Выводы (Summary)

К основным результатам работы можно отнести следующие:

1. В среде Matlab / Simulink разработана компьютерная модель электродвигательного пропульсивного комплекса арктического газовоза, которая позволяет исследовать динамические

режимы работы объекта как при изменениях управляющего сигнала, так и при возмущающих воздействиях со стороны гребного винта. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными реальных объектов и доказывают адекватность модели.

2. С помощью полученной модели в той же программной среде разработаны управляющие алгоритмы ЭДПК в режимах с регулированием частоты вращения и мощности ГЭД, приведены основные рекомендации по настройке систем управления, которые могут быть использованы в качестве базовых при разработке судовых систем электродвижения [21], [22].

3. Метод модельно-ориентированного проектирования позволяет значительно упростить процедуру разработки систем управления элементами ЕСАЭЭС. Моделирование позволяет в короткие сроки определить динамические характеристики объектов, требования, предъявляемые к их системам управления, и ошибки их построения еще на этапе предварительного проектирования. При этом разработанные таким образом модели алгоритмы нуждаются в настройке и доработке непосредственно на реальных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесниченко В. Ю. Единая электроэнергетическая система и гребная электрическая установка танкера ледового класса ARC7 «Штурман Скуратов» / В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

2. Васин И. М. Создание перспективных электротехнических и энергетических комплексов судовых единых электроэнергетических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Игорь Михайлович Васин. — СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», 2011. — 357 с.

3. Васин И. М. Расчет и моделирование режимов работы единых электроэнергетических систем судов с электродвижением / И. М. Васин // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 110.

4. Калинин И. М. Развитие теории и методов расчета режимов судовых единых электроэнергетических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / И. М. Калинин. — СПб.: «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии», 2014. — 328 с.

5. Деменков Н. П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления / Н. П. Деменков // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2008. — № 11. — С. 66–69.

6. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 : защищена 03.03.2015 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

7. Головкин С. В. Моделирование управления судовым электрооборудованием по диагностируемым параметрам / С. В. Головкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2008. — № 5 (46). — С. 34–38.

8. Труднев С. Ю. Разработка цифровых моделей режимных свойств для исследования динамической устойчивости судовой электроэнергетической системы / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2012. — № 20. — С. 37–41.

9. Егоров Л. Е. Математические модели электронных регуляторов напряжения и частоты судовых генераторных агрегатов / Л. Е. Егоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 37–41.

10. Баранов А. П. Математическая модель высоковольтного бесщеточного синхронного генератора / А. П. Баранов, Л. Е. Егоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 43–46.

11. Wilffinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilffinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

12. *Mahmud K.* A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks / K. Mahmud, G. E. Town // *Applied Energy*. — 2016. — Vol. 172. — Pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
13. *Gierusz W.* Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part 1: Forces generated by pods / W. Gierusz // *Ocean Engineering*. — 2015. — Vol. 108. — Pp. 105–114. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.031.
14. *Yutao C.* Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // *Energy Procedia*. — 2012. — Vol. 17. — Pp. 540–546. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.133.
15. *Luo L.* The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship / L. Luo, L. Gao, H. Fu // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. — 2011. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 31–37.
16. *Hansen J. F.* Modelling and control of marine power systems: Dr. thesis / J. F. Hansen. — Trondheim, Norwat: Norwegian University of Science and Technology, 2000. — 111 p.
17. *Sanjari M. J.* Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices / M. J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G. B. Gharehpetian // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. — 2013. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 109–121. DOI: 10.1002/etep.1619.
18. *Budashko V. V.* Physical modeling of multi-propulsion complex / V. V. Budashko, O. A. Onischenko, E. A. Yushkov // *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*. — 2014. — № 2. — Pp. 88–92.
19. *Budashko V. V.* Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes / V. V. Budashko, Y. A. Yushkov // *Electronic Modeling*. — 2015. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 101–114. DOI: 10.15407/emodel.
20. *French C.* Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique / C. French, P. Acarnley // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1996. — Vol. 32. — Is. 5. — Pp. 1089–1097. DOI: 10.1109/28.536870.
21. *Mohan N.* Power electronics: converters, applications, and design / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. — John Wiley & Sons, 2003. — 802 p.
22. *Yu Q.* Design, Modeling, and Simulation of Power Generation and Electric Propulsion System for IPS for All-Electric Ships / Q. Yu, N. N. Schulz // *American society of naval engineers. Virginia*. — 2007. — Vol. 358. — Pp. 1–8.

REFERENCES

1. Kolesnichenko, Vitalii U. “The unified electric power system and electrical propulsion system of the ARC7 ice-class tanker «Shturman Skuratov».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.
2. Vasin, I. M. Sozdanie perspektivnykh elektrotekhnicheskikh i energeticheskikh kompleksov sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh system. Dr. Diss. Sankt-Peterburg, 2011.
3. Vasin, I. M. “Calculation and mathematical modeling of operating modes of integrated electrical power systems of vessels with electric propulsion.” *Modern problems of science and education* 3 (2014): 110.
4. Kalinin, I. M. Razvitie teorii i metodov rascheta rezhimov sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh system. Dr. Diss. Sankt-Peterburg, 2014.
5. Demenkov, N. P. “Model’no-orientirovannoe proektirovanie sistem upravleniya.” *Promyshlennye ASU i kontroly* 11 (2008): 66–69.
6. Egorov, L. E. Komp’yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol’tnoi sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy s propul’sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal’nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD Diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S. O. Makarova», 2014.
7. Golovko, Sergey Vladimirovich. “Modelling of ship electrical equipment management due to diagnostic parameters.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 5(46) (2008): 34–38.
8. Trudnev, S. U., and N. N. Portnyagin. “Development of digital models of regime properties for research of dynamic stability of a ship electrical power system.” *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 20 (2012): 37–41.
9. Egorov, L. E. “Mathematical models of electronic voltage and frequency regulators of ships generators.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 37–41.
10. Baranov, A. P., and L. E. Egorov. “Mathematical model of high-voltage brushless synchronous generator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 43–46.

11. Wilflinger, Johann, Peter Ortner, Luigi del Re, and Michael Aschaber. "Simulation and control design of hybrid propulsions in boats." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.
12. Mahmud, Khizir, and Graham E. Town. "A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks." *Applied Energy* 172 (2016): 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
13. Gierusz, Witold. "Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part 1: Forces generated by pods." *Ocean Engineering* 108 (2015): 105–114. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.031.
14. Yutao, Chen, Zeng Fanning, and Wu Jiaming. "Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System." *Energy Procedia* 17 (2012): 540–546. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.133.
15. Luo, Le, Lan Gao, and Hehe Fu. "The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship." *International Journal of Information Technology and Computer Science* 3.2 (2011): 31–37.
16. Hansen, Jan Frederik. Modelling and control of marine power systems. Dr. thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2000.
17. Sanjari, M. J., O. Alizadeh Mousavi, and G. B. Gharehpetian. "Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 23.1 (2013): 109–121. DOI: 10.1002/etep.1619.
18. Budashko, V. V., O. A. Onischenko, and E.A. Yushkov. "Physical modeling of multi-propulsion complex." *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)* 2 (2014): 88–92.
19. Budashko, V. V., and Y. A. Yushkov. "Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes." *Electronic Modeling* 37.2 (2015): 101–114. DOI: 10.15407/emodel.
20. French, Chris, and Paul Acarnley. "Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique." *IEEE Transactions on Industry Applications* 32.5 (1996): 1089–1097. DOI: 10.1109/28.536870
21. Mohan, N., T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2003.
22. Yu, Q., and N. N. Schulz. "Design, Modeling, and Simulation of Power Generation and Electric Propulsion System for IPS for All-Electric Ships." *American society of naval engineers. Virginia* 358 (2007): 1–8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егоров Лев Евгеньевич — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: lev-egorov@mail.ru

Виноградов Андрей Александрович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egorov, Lev E. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: lev-egorov@mail.ru

Vinogradov, Andrey A. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2019 г.
Received: November 11, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173

**OPTOELECTRONIC MEANS OF ENERGY AND INFORMATION TRANSMISSION
IN THE ELECTROMECHANICAL TRANSFORMERS OF THE ROBOTIC
DIGITAL COMPLEX FOR MANAGING AND CONTROLLING MOTION
OF SMALL-DISPLACEMENT SURVEYING VESSEL**

V. E. Terentiev, L. B. Ochina

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The actual direction of maritime and inland water transport is alternative energy supply by the optoelectronic means. The study of brushless electromotor with electric energy delivery by the laser ray with using the fiber optic elements and photoelectronic transformers for the robotic digital complex for management and control of small-displacement surveying vessel motion is perspective. The connection between energy and information transmitted in the dynamic electromechanical transformers of the robotic digital complex is examined in the paper. It has been showed that the information and energy methods for processing the same experimental data lead to the identical results, namely, measuring information and energy are transmitted simultaneously through the measuring and information channel. Based on the conducted researches of brushless motor model and patents for inventions obtained by the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, a four-propellers robotic digital complex for managing and controlling the small-displacement self-propelled electric propulsion surveying vessel motion. The robotic small – displacement surveying vessels in conjunction with the base automatic surveying posts, combined by the atmospheric radio-optical and terrestrial fiber-optic communication channels, can be the basis of terrestrial segment of the digital measuring and information network of the Russian inland waterways.

Keywords: electric power, information, electromechanical transformer, brushless motor, robotic digital complex for motion management and control, small-displacement surveying vessel.

For citation:

Terentiev, Vladislav E., and Ludmila B. Ochina. "Optoelectronic means of energy and information transmission in the electromechanical transformers of the robotic digital complex for managing and controlling motion of small-displacement surveying vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 165–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173.

УДК 656.09

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ
РОБОТИЗИРОВАННОГО ЦИФРОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ МАЛОМЕРНОГО СУДНА**

В. Е. Терентьев, Л. Б. Очина

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что актуальным направлением развития инфраструктуры морского и внутреннего водного транспорта является альтернативное энергоснабжение с применением оптоэлектронных средств. Применение оптоэлектронных средств для электроснабжения на водном транспорте в настоящее время ограничено недостаточной изученностью вопросов одновременной передачи мощности и информации по оптическому каналу, а также отсутствием производства фотоэлектронных преобразователей, парных к изготавливаемым мощным лазерным источникам. Для решения вопросов управления и контроля движения маломерного промерного судна перспективными являются исследования бесколлекторного электродвигателя с доставкой электроэнергии по лучу лазера с использованием волоконно-оптических элементов и фотоэлектронных преобразователей. В настоящей работе рассмотрена

связь между энергией и информацией, передаваемой в динамических электромеханических преобразователях. Показано, что информационный и энергетический методы обработки одних и тех же экспериментальных данных приводят к одинаковым результатам — измерительная информация и мощность передаются по измерительно-информационному каналу одновременно. На основе проведенных исследований макета бесколлекторного электродвигателя и полученных ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова патентов на изобретения предложен четырехвинтовой роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Две пары винтов, вращающихся в противоположные стороны, образуют связанную систему. Анализ динамики показывает, что устойчивая работа РЦК управления и контроля при переходе из одного состояния в другое под влиянием внешних воздействий сохраняется при постоянном значении произведения момента на угловую скорость вращения. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой наземного сегмента цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ.

Ключевые слова: электроэнергия, информация, электромеханический преобразователь, бесколлекторный электродвигатель, роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения, маломерное промерное судно.

Для цитирования:

Терентьев В. Е. Оптоэлектронные средства передачи энергии и информации в электромеханических преобразователях роботизированного цифрового комплекса управления и контроля движения маломерного судна / В. Е. Терентьев, Л. Б. Очина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 165–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173.

Введение (Introduction)

Достижения в создании таких оптоэлектронных средств, как мощные лазеры с выводом энергии через волоконно-оптические элементы (ВОЭ) [1], а также фотоэлектронные преобразователи (ФЭП) [2], [3] открывают возможности практического использования новых альтернативных, в том числе лазерных, источников энергии. В 2020-е гг. предполагается доставлять солнечную энергию на Землю по лучу кислород-йодного лазера «Фойл», размещенного на стационарной космической орбите [4], [5]. Однако существуют факторы, сдерживающие практическое применение мощного оптического излучения на морском и речном флоте, к которым относятся: недостаточная изученность оптоэлектронных методов и средств доставки электрической энергии динамическим электромеханическим преобразователям (ДЭМП), а также связи между энергией и информацией, передаваемые в ДЭМП; отсутствие промышленного производства пар источников оптического излучения киловаттной мощности — ФЭП. Моделированию комплекса доставки электрической энергии по оптическому каналу посвящена работа [6], автоматизации и ультразвуковому управлению процессом доставки электроэнергии по интеллектуальному лазерному каналу — работа [7].

Цель настоящей работы состоит в исследовании связи энергии и информации, передаваемых в ДЭМП, а также анализе возможности создания на основе полученных ранее результатов роботизированного цифрового комплекса (РЦК) управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна (СЭПС). Рассмотрена возможность создания РЦК на базе бесколлекторного электродвигателя с доставкой электроэнергии по лучу лазера с использованием волоконно-оптических элементов (ВОЭ) и фотоэлектронных преобразователей (ФЭП), сокращенно — оптоэлектрической машины [8], а также устройства управления электроприводным транспортным средством [9], запатентованных ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой наземного сегмента цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ, что будет способствовать повышению безопасности судоходства, оптимизации гидрографических работ на ВВП и транзитного потенциала России.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Связь энергии и информации в сообщении. Во время электрических измерений объект функционирует как источник сообщений о своем состоянии, которое описывается множеством физических величин. Физическая величина регистрируется соответствующим измерительным преобразователем приемного устройства, с выхода которого электрический сигнал в аналоговой либо цифровой форме поступает в средства обработки и представления сообщений. Путь от источника сообщения до приемника и средств обработки называют *измерительно-информационным каналом* или *комплексом* (ИИК).

В состав ИИК, кроме исследуемого объекта, входит источник энергии, под воздействием которой объект генерирует сообщения. Роль источника энергии в оптоэлектронном ИИК могут выполнять генераторы как оптического излучения, так и электроэнергии. Далее по ходу сообщения идут среда передачи сообщений, приемное устройство и средства обработки и представления сообщений. В средствах обработки сигнал преобразуется в измерительную информацию, доступную для непосредственного восприятия наблюдателем в виде модели физической величины, описывающей состояние источника. Там же вырабатываются управляющие воздействия на структурные элементы ИИК либо измерительная информация передается другим техническим средствам для дальнейшего использования. Таким образом, в общем случае номинальное число структурных элементов, образующих ИИК ДЭМП, равно пяти: объект-генератор сообщений, источник энергии, среда передачи сообщений, приемное устройство, средства обработки и представления сообщений.

Матричный анализ показывает, что в зависимости от роста числа связанных структурных элементов можно выделить пять классов ИИК. При связывании структурных элементов проявляются интеллектуальные свойства саморегулирования — ИИК под влиянием внешней помехи переходит из одного устойчивого состояния в другое. Измерительная информация в сообщении образуется в результате обмена энергией между основными физическими системами, а именно: объектом, свойство которого определяется количественно; средством измерения с метрологически обеспеченными характеристиками; фоном, создающим шум или помеху измерениям. Сущность и условия обмена энергией оказывают влияние на результат измерения и его вероятностные свойства. Для оценки меры изменения энергии систем применяется понятие *энтропия* (от греч. *entropia* — превращение). Для дискретного источника сообщений, описываемых множеством величин x_1, x_2, \dots, x_n и вероятностей p_1, p_2, \dots, p_n появления этих величин в сообщении, информационная энтропия определяется, согласно К. Шеннону, величиной

$$H_u(X_i) = \sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (1)$$

Непрерывный источник сообщений характеризуется значением энтропии

$$H_n(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx, \quad (2)$$

где $p(x)$ — плотность распределения вероятности случайной величины X .

Единицы измерительной энтропии зависят от выбора основания логарифма. Из выражений (1) и (2) следует, что энтропия обращается в нуль, когда одно из состояний источника является достоверным (вероятность состояния равна единице), а остальные невозможными (их вероятности равны нулю). Действие случайной погрешности, фона, шума или помехи при передаче сигнала выражается энтропией шума. Количество измерительной информации I , передаваемой по ИИК при наличии шума, равно разности:

$$I = H(X) - H(\Delta), \quad (3)$$

где $H(X)$ — энтропия передаваемого сообщения (исходная, или априорная, энтропия измеряемой величины X , определяемая законом ее распределения); $H(\Delta)$ — энтропия шума (энтропия случайной погрешности измерения или условная энтропия).

Если имеется средство измерений со шкалой $0 \dots X_N$, то можно получить значения измеряемой величины только в этих пределах, вне указанного диапазона ее значение равно нулю. Если

плотность распределения вероятности измеряемой величины вдоль шкалы одинакова, то вероятность любого отсчета в интервале от 0 до X_N , т. е. до измерения, составит

$$p_0(X) = 1/X_N. \quad (4)$$

После измерения значения исследуемой величины находятся в более узком диапазоне:

$$2\Delta < X_N \text{ и } p_H(X) = 1/(2\Delta). \quad (5)$$

Поскольку полная вероятность отсчета в пределах $0-X_N$ составляет единицу, площадь зависимостей (4) и (5) равна единице, откуда следует, что значения исследуемой величины после измерения характеризуются большей плотностью вероятности. Результат измерения, с точки зрения теории информации, заключается в том, что после измерения область неопределенности сокращается и характеризуется большей плотностью вероятности, чем до измерения. Количество информации I в измерении определяется уменьшением энтропии от исходного значения (перед измерением) с вероятностью (4) до энтропии с вероятностью (5):

$$I = - \int_0^{X_N} (X_N)^{-1} \log (X_N)^{-1} dX - [- \int_{X_0}^{X_0} (2\Delta)^{-1} \log (2\Delta)^{-1} dX] = \log X_N - \log (2\Delta) = - \log [(2\Delta)/X_N]. \quad (6)$$

Из анализа выражения (6) видно, что в теории информации операция вычитания оставшейся после измерения неопределенности из исходной заменяет операцию деления абсолютной погрешности на диапазон изменения измеряемой величины при определении класса точности средства измерения энергетическим методом по приведенной погрешности. Обнаруженное совпадение результатов информационного и энергетического методов позволяет сделать вывод о том, что энергия и информация, заключенные в передаваемом сообщении, связаны между собой и передаются по ИИК ДЭМП одновременно. В соответствии с физической природой исследуемых объектов различают следующие виды энергии: механическую, электромагнитную, тепловую, оптического излучения и др. Оптоэлектронные средства способны передавать в электромеханических преобразователях различные виды энергии и соответствующей информации.

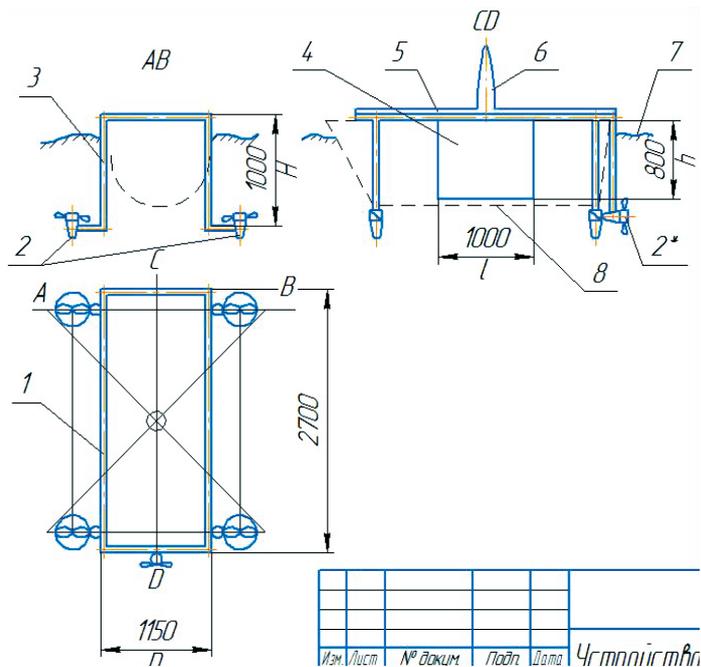
Бесконтактная передача электроэнергии и информации в оптоэлектрической машине.

Передача энергии и информации в электромеханических преобразователях с помощью лазеров и ВОЭ возможна как в видимом диапазоне спектра, так и при длинах волн $\lambda \geq 1,5 \dots 10,6$ мкм в спектральном диапазоне и при уровнях сигнала, безопасных для человека. Имеющийся обширный научно-технический потенциал может быть применен при создании оптических аналогов электрических ветвей в электрических цепях и системах. Введение в оптические ветви оптических модуляторов позволяет осуществить более точную регулировку электрического сопротивления цепи, чем с помощью электрических устройств. Важное преимущество ВОЭ заключается в возможности передачи большей плотности мощности, чем по металлическим проводам: максимальная плотность мощности для медного провода составляет не более 220 кВт/см², а для идеального оптоволокна критическая интенсивность вводимого излучения может превышать 140 МВт/см² [10]. Достоинством ВОЭ служит невосприимчивость к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам, а также высокий уровень пожарной безопасности. Кроме того, доставка электроэнергии по лазерному лучу электромеханическому преобразователю может осуществляться через океанскую толщу и границу раздела атмосфера – океан, что позволяет решать по-новому задачу взаимодействия с погруженным объектом.

Бесконтактная передача электроэнергии и информации в оптоэлектронной машине реализуется при замене электрических ветвей якоря с щеточно-коллекторными контактами на ветви с динамическими оптронами. В режиме двигателя лазерное излучение подводится по ВОЭ в плоскости геометрической нейтрали магнитных полюсов статора. ФЭП размещаются на роторе и подключаются по два элемента встречно-параллельно к концам каждой секции обмотки ротора с возможностью обеспечения согласованного положения с лазерным лучом. Доставка электроэнергии в обмотки якоря осуществляется бесконтактно через воздушный зазор между якорем и статором в моменты совпадения оптической оси ФЭП и лазерного луча.

Проведены лабораторные испытания макета оптоэлектрической машины, синтезированной в соответствии с патентом [8]. В макете был применен мощный непрерывный полупроводниковый лазер с волоконным выводом излучения с длиной волны $\lambda = 809$ нм, а также согласованные с ним по диапазону спектральной чувствительности фотоэлектронные преобразователи на основе AlGaAs-GaAs и GaInP-GaAs гетероструктур. В соответствии с предложенной математической моделью переходный процесс нарастания скорости вращения вала электродвигателя имел монотонный характер, длительность которого определялась величиной $L/R_{\text{я}}$ (L — индуктивность, $R_{\text{я}}$ — сопротивление секции обмотки якоря). При близких пусковых характеристиках (к исходному электродвигателю с щеточно-коллекторным коммутатором) оптоэлектрическая машина отличалась меньшим шумом и отсутствием искрения из-за устранения трения щеток о пластины коллектора [6].

Комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна (СЭПС) должен обеспечивать заданное направление во время мониторинга, стабилизацию в водном потоке при измерениях в фиксированной точке, а также возвращение судна на исходную базу. Для этой цели может быть применено устройство управления электроприводным транспортным средством [9], в котором в качестве движителей использованы четыре гребных винта. Функциональная схема устройства имеет два блока: управления и исполнения. В *блоке управления* размещены: тяговый аккумулятор и солнечная батарея; источник излучения оптического диапазона электромагнитного спектра (лазер); переключатели реверса каждой оптоэлектрической машины; ПИД-регуляторы каждой оптоэлектрической машины с силовыми ключами (драйверами), управляющими оптическими модуляторами; компьютерно-измерительная система (КИС) с функцией контроллера движения, входящая совместно с датчиком положения ротора (ДПР), ПИД-регуляторами, драйверами и оптическими модуляторами в контур цифрового управления и контроля движения СЭПС. В *исполнительный блок* входят: четыре оптоэлектрических машины, выполненных в соответствии с патентом [8], с гребными винтами; ВОЭ, распределяющие между оптоэлектрическими машинами энергию, поступающую из блока управления в исполнительный блок по коннекторам. Конструкция комплекса управления показана на следующей схеме:



Комплекс управления СЭПС: 1 — рама; 2 — оптоэлектрические машины с гребными винтами; 3 — выдвигная штанга; 4 — отсек для аппаратуры комплекса управления и контроля; 5 — крышка; 6 — солнечная батарея и приемо-передающие антенны; 7 — граница раздела вода – воздух; 8 — контур СЭПС

Конструктивной основой устройства служит рама 1 из профильного материала, на которой для жесткости установлена крышка 5. На раме по углам расположены выдвижные штанги 3, к концам которых, находящимся в воде, закреплены оптоэлектрические машины 2 с гребными винтами. На крышке размещены отсек 4 для бортовой аппаратуры, солнечная батарея и приемо-передающие антенны 6. Комплекс в сборе закрепляется на СЭПС 8 с применением средств герметизации. Размеры даны для судна серии «Бестер–280».

Управление движением надводного объекта мультивинтовым методом основано на изменении угловой скорости вращения винтов, так же, как и для воздушных моделей [11]. Для балансировки вращательных моментов одинаковые оптоэлектрические машины с винтами расположены симметрично на равных расстояниях относительно центра масс СЭПС на взаимно перпендикулярных направлениях X , Y ортогональной системы координат. Направление вращения любого винта противоположно направлению вращения двух ближайших винтов, а направления вращения симметричных относительно центра масс винтов совпадают.

Суммарный момент вращения винтов M , в отсутствие внешних моментов, направлен по оси Z . Применительно к надводному маломерному судну наиболее важными являются пять основных режимов управления движением в слое раздела сред *река – атмосфера* (плоскость XU): управление по углам крена, тангажа, рыскания; движение вперед-назад, вбок. Две пары винтов, вращающиеся в противоположные стороны, образуют связанную систему, динамика которой может быть описана системой двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{T_m} \left(\frac{2\pi J n}{C_m \Phi} + mn \right), \quad (7)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{T_n} \left[\frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_y + R_{y\delta})}{C_e C_m \Phi^2} m - mn \right], \quad (8)$$

где $m = M/M_{\max}$ — вектор относительного момента вращения, $n = \omega/\omega_{\max}$ — вектор относительной угловой скорости гребных винтов; J — тензор инерции вращающихся масс; C_m , C_e — постоянные коэффициенты электродвигателей в выражениях для момента вращения $M = C_m \Phi I_y$ и ЭДС якоря $E_y = C_e \Phi \omega$, соответственно; U , I_y , Φ^2 — напряжение, ток якоря, квадрат магнитного потока оптоэлектрической машины; R_y , $R_{y\delta}$ — электрическое сопротивление якоря с добавочным элементом, включенным последовательно с обмоткой якоря; T_m , T_n — характеристики нарастания тока и скорости вращения вала оптоэлектрической машины соответственно.

Согласно уравнениям (7) и (8), управление по углу крена осуществляется, когда скорость переднего винта увеличивается, а скорость заднего винта уменьшается в том же отношении (направление вращения переднего и заднего винтов одинаковое). При этом остаются неизменными момент вращения и тяга. Управление по углу тангажа осуществляется по тому же принципу, что и по углу крена: увеличивается скорость вращения одного бокового винта и одновременно в том же отношении уменьшается скорость вращения второго бокового винта. Сохраняются момент вращения и тяга. Управление по углу рыскания выполняется за счет нарушения баланса вращающихся моментов: для поворота направо уменьшается скорость вращения винтов по часовой стрелке и в том же отношении увеличивается скорость винтов, вращающихся против часовой стрелки. Тяга сохраняется неизменной, но нарушается баланс вращающихся моментов, и комплекс управления вместе с СЭПС поворачивается. Управление движением вперед требует отрицательного угла наклона комплекса управления к плоскости YZ для возникновения горизонтальной составляющей тяги. Аналогично происходит управление движением назад и вбок.

Таким образом, четырехвинтовой комплекс управления позволяет маломерному СЭПС двигаться в любом заданном направлении, в том числе поворачиваться на месте. Практический интерес представляет также стабилизация положения СЭПС в водном потоке для повышения точности промерных работ. В соответствии с динамической моделью (7) и (8), при выполнении условия сохранения произведения вращающего момента на угловую скорость вращения ($mn = \text{const}$) комплекс управления и контроля движения судна автоматически переходит из одного устойчивого

режима работы в другой в ответ на внешнее воздействие (например, изменение тормозного момента), т. е. осуществляется *саморегулирование*. Подобные интеллектуальные свойства, присущие многим сложным связанным системам и многомодовому лазеру с внутривибрационным управлением [7], способствуют повышению энергоэффективности процесса управления.

В аппаратно-программных средствах комплекса управления и контроля можно выделить следующие модули: цифрового контроля и управления в составе КИС – микроконтроллера движения с устройством связи ГЛОНАСС/GPS; датчиков крена, дифферента, рыскания, угловой скорости вращения гребных винтов; оптоэлектронных систем контроля и идентификации объектов, сканирующего лазерного дальномера; гидролокатора, эхолота; силовых устройств — тяговых аккумуляторов с контролем тока заряда, а также гребных винтов; солнечных батарей; средств связи — атмосферной оптической линии связи АОЛС с резервным радиоканалом для обмена информацией между базовыми автоматическими промерными постами (БАПП) и цифровым комплексом управления и контроля (ЦКУК), установленным на СЭПС, а также наземной волоконно-оптической линией связи для соединения с другими БАПП; программных средств на основе системы MATLAB с пакетами расширения Simulink, Simelectron [12].

Обсуждение (Discussion)

На основе совпадения результатов информационного и энергетического подходов к анализу одних и тех же экспериментальных данных можно сделать вывод о связи энергии и информации в сообщении и их одновременной передаче по измерительно-информационному каналу. На базе оптоэлектрической машины — патент [8] и устройства — патент [9] (патентообладатель — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) может быть создан роботизированный цифровой четырехвинтовой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Действие комплекса управления и контроля движения надводного судна с помощью четырехвинтового устройства осуществляется аналогично подводному и воздушному аналогам. Роботизированные маломерные промерные суда во взаимодействии с базовыми автоматическими промерными постами могут явиться основой создания цифровой измерительно-информационной сети, которая будет способствовать оптимизации гидрографических работ на ВВП РФ.

Выводы (Conclusions)

1. Информационный и энергетический методы обработки одних и тех же экспериментальных данных приводят к одинаковым результатам. Можно полагать, что измерительная информация и энергия, содержащиеся в сообщении, одновременно передаются по измерительно-информационному каналу динамического электромеханического преобразователя. Предложенная оптоэлектронная (фотонная) коммутация в электрических машинах имеет ряд преимуществ по сравнению с коллекторно-щеточной: отсутствие гальванической связи ротора с внешней цепью, а также наводок, электрических и механических шумов, искрения. Оптоэлектрическая машина становится бесшумной, простой в управлении, пожаробезопасной и энергоэффективной. Эффективность оптоэлектронных средств передачи энергии и информации в динамических электромеханических преобразователях зависит от характеристик применяемых элементов. Так, волоконно-оптические элементы (ВОЭ) более чем на два порядка (140 МВт/см^2 по сравнению с 220 кВт/см^2) могут превосходить медный провод по максимальной пропущенной плотности мощности. Достоинством ВОЭ служит невосприимчивость к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам, а также высокий уровень пожарной безопасности. КПД фотоэлектронных преобразователей (ФЭП) из AlGaAs/GaAs может превышать 50 % (по лабораторным измерениям 70 %) при плотности фототока до $100 - 120 \text{ А/см}^2$, при фототоке свыше 40 А/см^2 ФЭП необходимо интенсивное охлаждение. Применение оптоэлектронных средств как альтернативных источников электроснабжения на водном транспорте в настоящее время сдерживает отсутствие производства фотоэлектронных преобразователей парных к изготавливаемым лазерным источникам киловаттной мощности.

2. На основе изобретений бесколлекторного электродвигателя с передачей электроэнергии по ВОЭ и динамическим оптронным коммутатором секций обмотки якоря [8] и устройства управления электроприводным транспортным средством [9] (правообладатель патентов — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) предложен четырехвинтовой роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Две пары винтов, вращающиеся в противоположные стороны, образуют связанную систему. Анализ динамики показывает, что устойчивая работа комплекса управления и контроля при переходе из одного состояния в другое под влиянием внешних воздействий сохраняется при постоянном значении произведения момента на угловую скорость вращения. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой для создания цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ, что будет способствовать повышению безопасности судоходства, оптимизации гидрографических работ на ВВП и транзитного потенциала России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gapontsev V. P.* Modern state and prospects of application high-power fiber lasers/ V.P. Gapontsev // 8th International Symposium on high-power lasers and their applications. — SPb., 2016.
2. *Tarasov I. S.* High-power semiconductor separate-confinement double heterostructure lasers / I. S. Tarasov // Quantum Electronics. — 2010. — Vol. 40. — Is. 8. — Pp. 661. DOI: 10.1070/QE2010v040n08ABEH014375.
3. *Emelyanov V. M.* Photovoltaic optical sensors for high-power conversion and information transmission / V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov, S.A. Kozhuhovskaya, M.Z. Shvarts // Optical Sensors 2017. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — Vol. 10231. — Pp. 102311B. DOI: 10.1117/12.2264083.
4. *Данилов О. Б.* Кислород-йодные лазеры с оптической (солнечной) накачкой / О. Б. Данилов, А. П. Жевлаков, М. С. Юрьев // Оптика и спектроскопия. — 2014. — Т. 117. — № 1. — С. 151. DOI: 10.7868/S0030403414070058.
5. Энергию Солнца доставят на Землю // Деловая Россия. — 2017. — № 3-4 (1). — С. 94.
6. *Terentiev V. E.* Modeling the complex delivery of electric energy by optical channel to dynamic electro-mechanical transformer / V. E. Terentiev, S. G. Artamokhin, N. A. Pikhtin, M. Z. Shvarts // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. — 2018. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 765–774.
7. *Терентьев В. Е.* Автоматизация и ультразвуковое управление процессом доставки электроэнергии по интеллектуальному лазерному каналу динамическому электромеханическому преобразователю / В. Е. Терентьев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2019. — № 3. — С. 94–98.
8. Пат. 2563974 Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Бесколлекторная электрическая машина / В. Е. Терентьев; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (RU). — № 2014129152/07; заявл. 15.07.2014; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27. — 7 с.
9. Пат. 166091 Российская Федерация, МПК B60L 11/18. Устройство управления движением электроприводных транспортных средств / В. Е. Терентьев, С. В. Сабуров; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» (RU). — № 2016101349/11; заявл. 18.01.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31. — 9 с.
10. *Biryukov A. S.* On the limiting light intensities in quartz optical fibers. VCR as the main thermal source of optical destruction / A. S. Biryukov, E. M. Dianov // Quantum Electronics. — 2000. — Vol. 30. — Is. 6. — Pp. 559–564.
11. *Luukkonen T.* Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics / T. Luukkonen. — Espoo: School of Science, 2011. — 26 p.
12. *Дьяконов В. П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 976 с.

REFERENCES

1. *Gapontsev, V. P.* “Modern state and prospects of application high-power fiber lasers.” *8th International Symposium on high-power lasers and their applications*. SPb., 2016.

2. Tarasov, Il'ya Sergeevich. "High-power semiconductor separate-confinement double heterostructure lasers." *Quantum Electronics* 40.8 (2010): 661. DOI: 10.1070/QE2010v040n08ABEH014375
3. Emelyanov, Viktor M., E.D. Filimonov, S.A. Kozhuhovskaya, and M.Z. Shvarts. "Photovoltaic optical sensors for high-power conversion and information transmission." *Optical Sensors 2017*. Vol. 10231. International Society for Optics and Photonics, 2017. DOI: 10.1117/12.2264083
4. Danilov, O.B., A.P. Zhevlakov, and M.S. Yur'Ev. "Optically (solar) pumped oxygen-iodine lasers." *Optics and Spectroscopy* 117.1 (2014): 145–151. DOI: 10.1134/S0030400X14070054
5. "Energiyu Solntsa dostavyat na Zemlyu." *Delovaya Rossiya* 3-4(1) (2017): 94.
6. Terentiev, V. E., S. G. Artamokhin, N. A. Pikhtin, and M. Z. Shvarts. "Modeling the complex delivery of electric energy by optical channel to dynamic electromechanical transformer." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 9.2 (2018): 765–774.
7. Terentiev, Vladislav Evgenievich. "Automation and ultrasonic control of the process of electric power delivery via the intelligent laser channel to the dynamic Electromechanical Converter." *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series «Natural and Technical Sciences»* 3 (2019): 94–98.
8. Terent'ev, V. E. Beskollektornaya elektricheskaya mashina. RU 2 563 974, IPC H02P9/14. Russian Federation assignee. Publ. 27 Sept. 2015.
9. Terent'ev, V. E., and S. V. Saburov. Ustroistvo upravleniya dvizheniem elektroprivodnykh transportnykh sredstv. RU 166 091, IPC B60L 11/18. Russian Federation assignee. Publ. 10 Nov. 2016.
10. Biryukov, A. S., and E. M. Dianov. "On the limiting light intensities in quartz optical fibers. VCR as the main thermal source of optical destruction." *Quantum Electronics* 30.6 (2000): 559–564.
11. Luukkonen, T. *Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics*. Espoo: School of Science, 2011.
12. D'yakonov, V. P. *MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov*. M.: DMK Press, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Терентьев Владислав Евгеньевич —
 кандидат технических наук,
 старший научный сотрудник
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: TerentievVE@gumrf.ru

Очина Людмила Борисовна —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Terentiev, Vladislav E. —
 PhD,
 Senior Researcher
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: TerentievVE@gumrf.ru

Ochina, Ludmila B. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.
 Received: October 29, 2019.

STRUCTURE OF THE SHIP'S ELECTROMOTIVE COMPLEX WITH DUAL DC BUSES

F. A. Gelver^{1,2}

¹ — Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A perspective structure of the ship's electromotive complex with dual DC buses, which allows you to increase the reliability and survivability of the electric power system, to improve the operational, energy and weight and size characteristics of the electric propulsion system, is presented in the paper. In addition, such a structure makes it possible to reduce pollutants emissions into the environment, as well as to realize fuel savings in the range of 10–15%, depending on the operating modes of the vessel, compared with the existing structures of electric propulsion systems. The proposed structure of the ship's electromotive complex allows braking the propellers without using the additional brake circuits with energy redistribution between the propulsion electric machines and the dissipation of braking energy in the working medium - water. Using the canonical polynomial of the seventh degree, an analytical description of the limiting reverse characteristic of the propeller is given. An algorithm for the braking and reverse of a rowing electric installation is proposed and a diagram with the power flows directions is shown. A mathematical description of the braking and reverse modes of the propulsion electric installation is given, and the control algorithms for the proposed propulsion electric installation with two propellers during braking and reverse are synthesized. Timing diagrams of changes in torque, speed and power on each of the propellers for the proposed algorithm for braking and reverse of the propeller motors are presented. The variants of the structure diagrams of the ship's electromotive complex with dual DC buses using multilevel voltage inverters, as well as with the possibility of power supply from a single power plant, both a propulsion electric installation, and consumers of their own needs, are presented.

Keywords: ship electromotive complex, electric propulsion system, DC bus, voltage inverter, energy efficiency, canonical polynomial, Wander-Mond matrix, braking, reverse, recovery, fuel economy.

For citation:

Gelver, Fedor A. "Structure of the ship's electromotive complex with dual DC buses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 174–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-174-188.

УДК 629.12:621.33

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА С ДВОЙНЫМИ ШИНАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ф. А. Гельвер^{1,2}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлена перспективная структура электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока, позволяющая повысить надежность и живучесть электроэнергетической системы, улучшить эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики электродвигательного комплекса. Кроме того, такая структура позволяет сократить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, а также способствует экономии топлива в пределах 10–15 % в зависимости от режимов работы судна по сравнению с существующими структурами систем электродвижения. Предложенная структура электродвигательного комплекса судна позволяет осуществлять торможение гребных винтов без использования дополнительных тормозных цепей с перераспределением энергии между гребными электрическими машинами и рассеянием энергии торможения в рабочей среде — воде. С использовани-

ем канонического полинома седьмой степени выполнено аналитическое описание предельной реверсивной характеристики гребного винта. Предложен алгоритм осуществления торможения и реверса гребной электрической установки и приведена диаграмма направлений потоков мощности. Приведено математическое описание режимов торможения и реверса гребной электрической установки и выполнен синтез алгоритмов управления предложенной гребной электрической установкой с двумя гребными винтами при торможении и реверсе. Представлены временные диаграммы изменения момента, частоты вращения и мощности на каждом из гребных винтов для данного алгоритма торможения и реверса гребных электродвигателей. Приведены варианты схем структуры электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока с использованием многоуровневых инверторов напряжения, а также с возможностью питания от единой электростанции как гребной электрической установки, так и потребителей собственных нужд.

Ключевые слова: электродвигательный комплекс судна, система электродвижения, шины постоянного тока, инвертор напряжения, энергетическая эффективность, канонический полином, матрица Вандермонда, торможение, реверс, рекуперация, экономия топлива.

Для цитирования:

Гельвер Ф. А. Структура электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 174–188. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-174-188.

Введение (Introduction)

В настоящее время в современном гражданском и военном судостроении наблюдается устойчивая тенденция строительства большого количества судов с системами как частичного, так и полного электродвижения. Данная тенденция связана с совершенствованием элементов силовой электроники и развитием преобразовательной техники, а также преимуществами систем электродвижения, лучшими эксплуатационными и энергетическими характеристиками по сравнению с классической механической передачей энергии от первичного теплового двигателя к валу винта. Кроме того, система электродвижения остается безальтернативной в двигательных комплексах судов и кораблей, для которых необходимо получить высокие динамические характеристики и наилучшие вибро-шумовые характеристики при работе двигательного комплекса.

Существует множество структур систем полного электродвижения, реализованных как на постоянном, так и переменном токе [1], [2]. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки и применима для конкретного типа и назначения судна. Как правило, такие двигательные комплексы строят с соблюдением последовательной структуры, при которой энергия от первичного теплового двигателя передается через электрический генератор, распределительные устройства, согласующие устройства и электрический преобразователь для питания гребного электродвигателя [3]. Данная структура является классической для большинства современных типов судов и кораблей с системами электродвижения. Существует множество разновидностей такой структуры и схем ее реализации. Большой популярностью за рубежом пользуются комбинированные энергетические установки типа **CODLAG (COmbined Diesel-eLectric And Gas turbine)** либо **CODLOG (COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine)**, преимущественно используемые на фрегатах и других специальных типах судов¹. В состав такой комбинированной энергетической установки обычно входят: электрическая установка, обеспечивающая малый передний и задний ход корабля, и форсажная установка на основе теплового двигателя — для работы на повышенных скоростях переднего хода совместно с электрическими установками (буква **A** используется в обозначении типа установки или независимо, буква **O** — в обозначении типа установки) [4].

Широкое применение находят также валогенераторные установки, причем как для кораблей военно-морского флота, так и для гражданских типов судов. Появляются принципиально новые структуры систем электродвижения для судов и кораблей с использованием анаэробных

¹ Q&A with BAE Systems on Type 26 Frigate Design Update at Euronaval 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.navyrecognition.com/index.php?option=com_content&view=article&id=828 (дата обращения: 26.11.2019).

источников питания на основе аккумуляторных батарей либо электрохимических генераторов. Однако, как правило, такие энергетические установки используются либо в подводном флоте, либо на судах, работающих в портовых водах вблизи от береговой линии. Использование систем электродвижения с анаэробным источником на кораблях военно-морского флота кроме основного преимущества — воздухонезависимости (для подводных лодок) и высоких динамических характеристик системы электродвижения — позволяет также улучшить вибро-шумовые характеристики, особенно необходимые при работе с буксируемой гидроакустической станцией либо при выполнении поисково-спасательных задач. Использование анаэробных источников с электроприводом движительного комплекса на гражданских типах судов, работающих недалеко от береговой линии, кроме ранее изложенного, позволит выполнить природоохранные требования для особых экологических зон. Большую популярность находят единые электроэнергетические установки с системой электродвижения, в которых используется единый источник электроэнергии для питания гребной электрической установки (ГЭУ) и иных судовых потребителей.

С ростом потребности в судах с системами электродвижения растет также единичная установленная мощность элементов системы электродвижения и электродвижительного комплекса в целом. Данная тенденция связана с потребностью в судах, обладающих качественно новыми эксплуатационными характеристиками, а также ростом объема грузоперевозок по всему миру. В связи с этим появляется множество проблем, связанных прежде всего с реализуемостью систем электродвижения на существующей элементной базе, обеспечением надежности, а также требуемых показателей качества электроэнергии, потребляемых от электрических генераторов так и для питания гребных электродвигателей, возможности размещения системы электродвижения на площадях заданных проектантом и т. д. При увеличении установленной мощности элементов электродвижительного комплекса особенно остро встают вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью нагрузок с питающей сетью, а также повышением энергетической эффективности при работе как отдельных элементов, так и системы электродвижения в целом. Повышение эффективности преобразования энергии является одним из основных средств увеличения автономности плавания, производительности, увеличения скорости передвижения и маневренности, повышения экологической чистоты и других показателей, что способствует повышению технико-экономических показателей современных судов и кораблей.

Достоинства и недостатки известных структур наиболее полно раскрыты в статьях [1], [5], [6] и учебниках [2], [7]. В данной статье предложена структура системы электродвижения судов, для которых необходимо обеспечить питание гребных электродвигателей с широким диапазоном регулирования частоты вращения гребного винта, позволяющая улучшить функциональные и повысить энергетические характеристики электродвижительной установки по сравнению с известными схемами электродвижительных комплексов кораблей и судов. Кроме того, рассматриваемая схема отличается простотой, унификацией используемого оборудования, а также высокой степенью надежности. Исследуемая в данной статье схема электродвижительного комплекса является продолжением и совершенствованием структуры, представленной в [8]. Идеей, рассмотренной в данной статье структуры, является возможность работы всех гребных винтов судна хотя бы от одного работающего генераторного агрегата либо любого другого источника электрической энергии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для предметного рассмотрения предложенной идеи рассмотрим наиболее распространенную структурную схему электродвижительного комплекса, состоящую из четырех генераторных агрегатов и двух гребных винтов (рис. 1). Структура электродвижительного комплекса судна (корабля), представленная на рис. 1, содержит генераторные агрегаты, собранные на основе первичного теплового двигателя D и электрического генератора переменного тока G , каждый из которых работает на свой выпрямитель напряжения B . Генераторные агрегаты сгруппированы по бортам, при этом выпрямители напряжения $B1$ и $B2$ ($B3$ и $B4$) одного борта своими выходными клемма-

ми, соединенные согласованно последовательно, организуют общую систему шин постоянного тока одного борта. К общей системе шин постоянного тока каждого из бортов электростанции подключены инверторы напряжения И1–И4, которые питают гребные электродвигатели М1–М4. Гребные электродвигатели М1, М3 и М2, М4 организуют приводы каждый своего гребного винта, причем гребные электродвигатели М1 и М3 (М2 и М4) работают согласованно, совместно создавая либо движительный, либо тормозной момент. При этом следует отметить, что при необходимости в долевых режимах работы судна может работать один из двух двигателей одного гребного винта, ротор второго будет вращаться вместе с валом гребного винта как «болванка». Питание гребных электродвигателей М1–М4 организовано таким образом, что каждый из гребных винтов может приводиться в движение энергией, полученной от электростанции любого борта и даже от любого одного из работающих генераторных агрегатов. Данная структура организует ГЭУ с двойными шинами постоянного тока. При этом электростанции и электрооборудование разных бортов имеют гальваническую развязку.

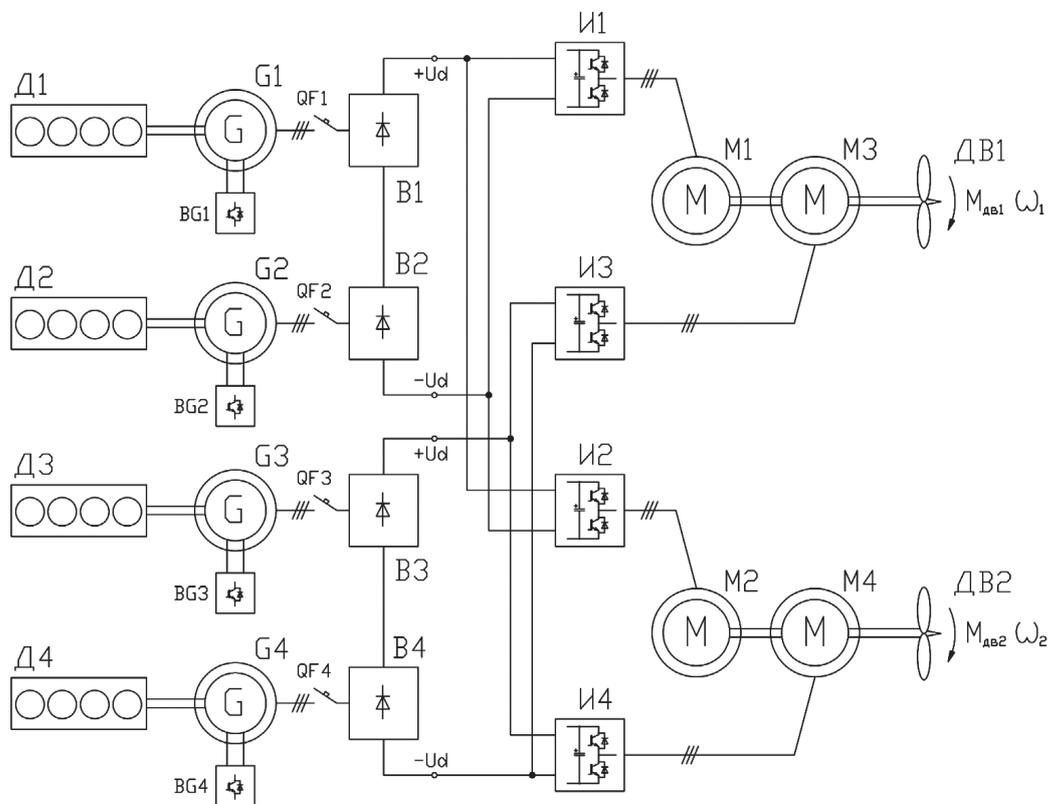


Рис. 1. Структурная схема электродвижительного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока

Выполним более подробное описание предложенной структуры и ее элементов, а также достоинств такой структуры по сравнению с известными структурами электродвижительных комплексов. Электрический генератор G может быть реализован на широко используемых синхронных генераторах с электромагнитной системой возбуждения. Представленный электрический генератор G содержит обмотку возбуждения со своей системой возбуждения BG , что позволяет оперативно регулировать уровень напряжения на его выходе. Такое решение дает возможность изменять уровень напряжения на общей системе шин постоянного тока соответствующего борта в стационарном режиме работы, а также обеспечивать плавный заряд накопительных конденсаторов инверторов $И$ без использования различных устройств мягкого пуска. В качестве первичного теплового двигателя генераторного агрегата в такой структуре могут быть использованы любые дизели, газотурбинные двигатели без ограничения частоты их вращения. При этом первичный

тепловой двигатель может работать на оптимальной для себя частоте вращения, обеспечивая высокую экономичность [9], [10].

Выпрямители напряжения $B1$ и $B2$ ($B3$ и $B4$) генераторов переменного тока $G1$ и $G2$ ($G3$ и $G4$) одного борта соединены согласованно, последовательно образуя общую систему шин постоянного тока одного борта. Такое соединение выпрямителей B позволяет удвоить напряжения шин постоянного тока одного борта при одинаковых напряжениях электрических генераторов G . Кроме того, такое схемное решение позволит использовать при работе электродвигательного комплекса один из двух генераторных агрегатов электростанции одного борта, при этом второй может быть выведен из работы. Гребные электродвигатели $M1, M3$ ($M2, M4$) одного гребного винта получают питание через инверторы напряжения $I1, I3$ ($I2, I4$), подключенные к разным бортовым системам шин постоянного тока (к электростанциям разных бортов).

Следует отметить, что шины постоянного тока двух бортов имеют гальваническую развязку, не имея абсолютно никакой электрической связи между собой, что позволяет обеспечить лучшую электромагнитную совместимость, высокую степень надежности ГЭУ, а, соответственно, и высокую степень живучести корабля. Предложенное схемное решение позволяет сохранить работоспособность ГЭУ хотя бы при одном работающем генераторном агрегате из четырех. Кроме того, данная структура, обладая высокой степенью экономичности, позволит обеспечить высокий ресурс работы первичных тепловых двигателей благодаря тому, что будут гаранти-

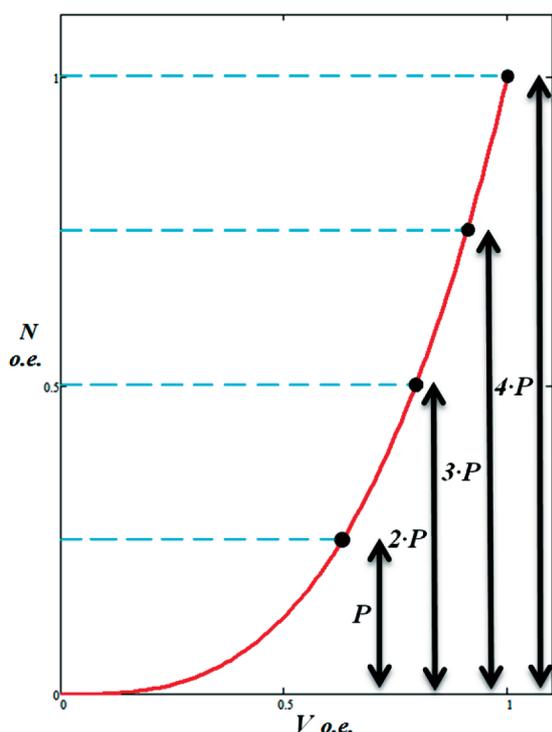


Рис. 2. Зависимость $N = f(V)$ для стационарного режима при движении судна в свободной воде

рованы оптимальный режим их работы и соответствующая скорости движения судна степень их загрузки. Предложенная структура исключает недогрузку генераторных агрегатов по мощности или их работу вхолостую. При этом отсутствует необходимость в точной синхронизации генераторных агрегатов, а также проблем с вводом и выводом их из работы.

С учетом того, что системы электродвижения применяют, как правило, на специальных типах судов, которым присущи ряд характерных режимов, отличных от движения судна на полном ходу, следовательно, электростанция судна должна быть спроектирована так, чтобы наиболее полно удовлетворять данным режимам работы, а также обеспечивать высокую экономичность работы первичных тепловых двигателей. Рассмотрим режимы работы электростанции и возможности структуры, представленной на рис. 1. Для стационарного режима движения судна, согласно вентиляторному характеру механической характеристики гребного винта, может быть построена зависимость $N = f(V)$, которая характеризует мощность (N) гребной электрической установки

в зависимости от скорости движения судна (V). На рис. 2 представлена зависимость $N = f(V)$, приведенная в относительных единицах для стационарного режима при движении судна на свободной воде.

Согласно представленному графику и рассматриваемой структуре рис. 1, может быть получена связь необходимого количества работающих генераторных агрегатов в зависимости от требуемой скорости движения судна. В таблице представлена такая зависимость для ГЭУ, состоящей из четырех однотипных генераторных агрегатов, установленная мощность каждого из которых равна P .

Зависимость требуемого количества работающих генераторных агрегатов от текущей скорости движения судна

Количество работающих генераторных агрегатов	Максимальная мощность электростанции, о.е.	Движение судна со скоростью V , о.е.
1	0,25	0...0,63
2	0,5	0,63...0,79
3	0,75	0,79...0,9
4	1	0,9...1

Из приведенного на рис. 2 графика и табличных данных видно, что для долевых режимов работы ГЭУ могут быть задействованы несколько либо один из общего количества генераторных агрегатов, которые будут обеспечивать требуемую мощность и скорость движения судна. При этом для равномерного использования генераторных агрегатов по времени работы они могут меняться и комбинироваться в любом сочетании.

Кроме того, предложенная структура движительного комплекса отличается универсальностью, позволяющей использовать в качестве электромеханического преобразователя любой тип электрической машины переменного тока. При этом в источнике [11] показано и доказано, что наиболее подходящей электрической машиной в качестве привода гребных винтов по наиболее важным показателям является реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Предложенная структура позволяет осуществлять торможение и реверс гребных электродвигателей без использования тормозных цепей в составе инверторов напряжения. Режим торможения и реверса ГЭУ аналогичен рассмотренному ранее [12], отличие заключается в том, что энергия торможения одного гребного винта передается на другой гребной винт по двум гальванически изолированным электрическим каналам либо по одному из них в зависимости от режима работы ГЭУ. Более подробно рассмотрим режимы торможения и реверса согласно структуре электродвигательного комплекса, приведенной на рис. 1. При необходимости торможения судна и реверса гребных электродвигателей торможение и реверс последних будет осуществляться перераспределением энергии между гребными электродвигателями $M1-M2$ и $M3-M4$. На рис. 3 показаны направления потоков энергии при торможении и реверсе гребного электропривода, представленного на рис. 1.

Управление частотой вращения вала гребного винта осуществляется посредством управления суммарным электромагнитным моментом гребных электродвигателей, расположенных на одном валу. Эта связь непосредственно следует из основного уравнения движения, представленного в операторной форме и записанного в относительных единицах:

$$T_{\text{мех}} p\omega^* = M_{\text{дв}}^* - M_{\text{с}}^*,$$

где $T_{\text{мех}} = J\omega_0/M_0$ — механическая постоянная времени; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования; J — момент инерции механизма, ω_0 — базовое значение скорости; M_0 — базовое значение момента; $M_{\text{дв}}^*$ — суммарный момент развиваемый гребными электродвигателями, расположенными на одном валу; $M_{\text{с}}^*$ — момент сопротивления гребного винта.

Выполним математическое описание процесса торможения и реверса гребной электрической установки представленной на рис. 1 по предложенному на рис. 4 алгоритму. Математическое описание и математическое моделирование процессов торможения и реверса будем выполнять в относительных единицах (о. е). Все вычисления и построение графиков выполнено в математическом пакете Maple. Физические процессы, происходящие при торможении и реверсе гребного винта и гребного электродвигателя, более подробно описаны в статье [13]. Как отмечалось ранее в ряде источников ([2], [13], [14]), по мере накопления опытного материала относительно поведения гребного винта в режиме реверсирования выяснилось, что обобщенной реверсивной характеристики не существует. Особенно это относится к участку, характеризующему режим работы гидротурбиной.

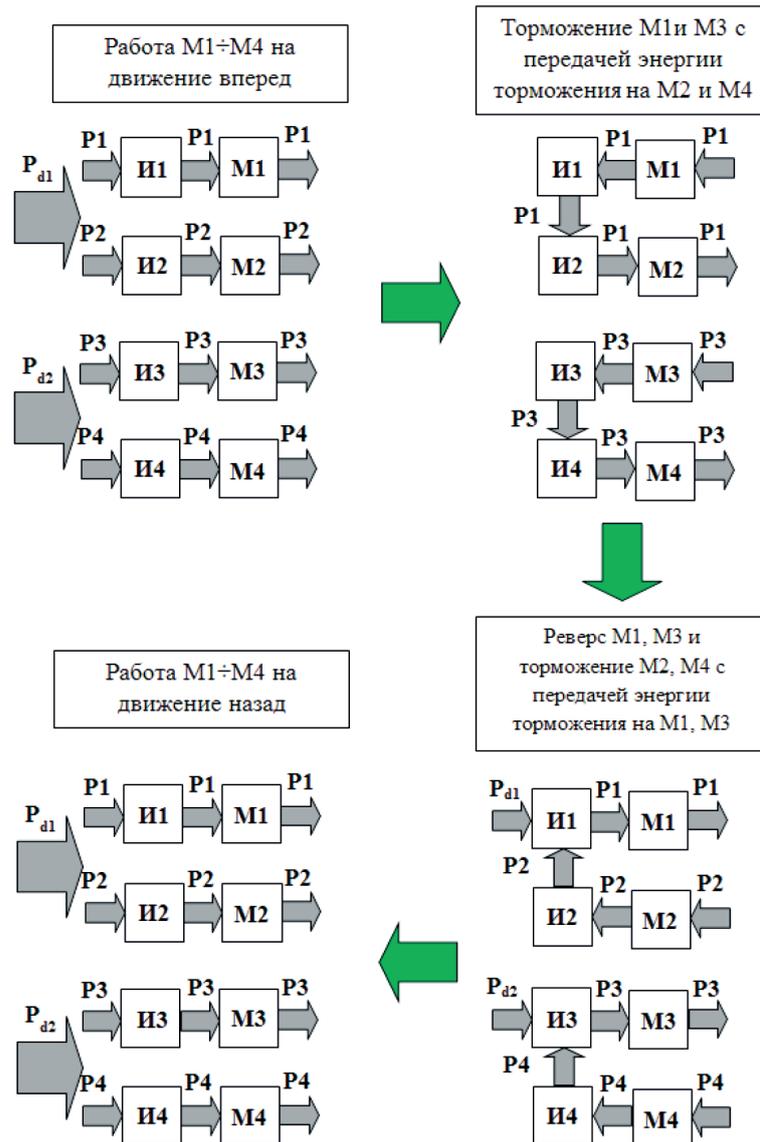


Рис. 3. Направление потоков мощности при торможении гребной электрической установки

Представим математическое описание предельной реверсивной характеристики, построенной в относительных единицах, описанной с помощью одной функции, определенной с помощью канонического полинома седьмой степени по восьми характерным точкам — узлам интерполяционного полинома (см. рис. 4).

Запишем матрицу, определяющую характерные точки — узлы интерполяционного полинома предельной реверсивной характеристики:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,8 & 0,35 & 0 & -0,2 & -0,3 & -0,4 & -0,5 \\ 1 & 0 & -1 & -0,4 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1,3 \end{pmatrix}^T.$$

Введем обозначение вектора-столбца входных данных (частоты вращения гребного винта) $rx = R^{(0)}$ и вектора-столбца выходных данных (момента на валу гребного винта) $ry = R^{(1)}$. Определим коэффициенты канонического полинома, записав матрицу Вандермонда [15]–[17] в виде:

$$V_{j,i} = (rx_j)^i, \quad V_{j,0} = 1;$$

где $j = 0 \dots 7, i = 0 \dots 7$.

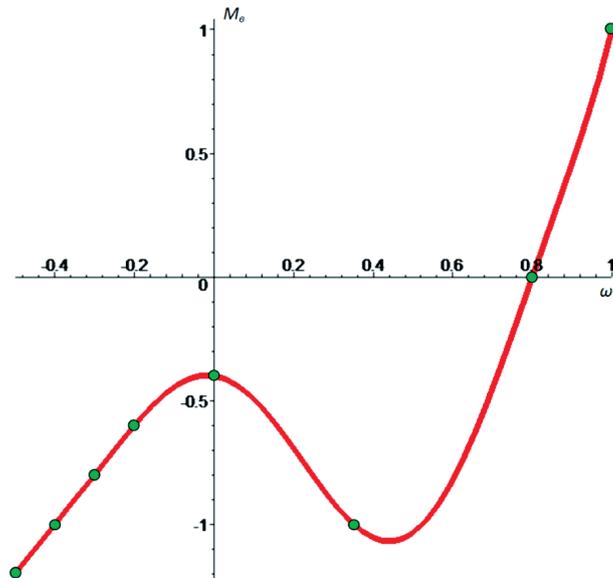


Рис. 4. Предельная реверсивная механическая характеристика гребного винта $M_B = f(\omega_B)$

Тогда в числовом выражении матрица Вандермонда имеет вид

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0,8 & 0,64 & 0,512 & 0,41 & 0,328 & 0,262 & 0,21 \\ 1 & 0,35 & 0,122 & 0,043 & 0,015 & 5,252 \cdot 10^{-3} & 1,838 \cdot 10^{-3} & 6,434 \cdot 10^{-4} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -0,2 & 0,04 & -8 \cdot 10^{-3} & 1,6 \cdot 10^{-3} & -3,2 \cdot 10^{-4} & 6,4 \cdot 10^{-5} & -1,28 \cdot 10^{-5} \\ 1 & -0,3 & 0,09 & -0,027 & 8,1 \cdot 10^{-3} & -2,43 \cdot 10^{-3} & 7,29 \cdot 10^{-4} & -2,187 \cdot 10^{-4} \\ 1 & -0,4 & 0,16 & -0,064 & 0,026 & -0,01 & 4,096 \cdot 10^{-3} & -1,638 \cdot 10^{-3} \\ 1 & -0,5 & 0,25 & -0,125 & 0,063 & -0,031 & 0,016 & -7,813 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Определим коэффициенты полинома [15], [16], [17]:

$$a = V^{-1}ry.$$

В числовом выражении матрица коэффициентов полинома имеет вид

$$a^T = (-0,4 \quad -0,256 \quad -7,194 \quad 0,544 \quad 27,497 \quad -0,021 \quad -43,968 \quad 24,798).$$

Тогда функция, описывающая предельную реверсивную механическую характеристику гребного винта в относительных единицах, имеет вид

$$M_c(\omega) = -0,4 - 0,256\omega - 7,194\omega^2 + 0,544\omega^3 + 27,497\omega^4 - 0,021\omega^5 - 43,968\omega^6 + 24,798\omega^7. \quad (1)$$

График функции, описывающей предельную реверсивную механическую характеристику гребного винта в относительных единицах, приведен на рис. 4. Данная аппроксимация наиболее точно описывает предельную реверсивную механическую характеристику, полученную эмпирическим путем [13]. С учетом того, что среднестатистическая постоянная времени электродвигателей составляет порядка 0,25 с, примем суммарную постоянную времени системы, состоящей из гребного винта и двух расположенных на одном валу гребных электродвигателей равной 1 с ($T_{мех} = 1$ с). При этом при моделировании все графики временной области будут отражены в секундах.

Выполним аналитическое описание процесса торможения и реверса гребного винта согласно предложенному алгоритму в ГЭУ, представленной на рис. 1.

Примем суммарный движительный момент на валу первого гребного винта равным

$$M_{дв1} = M_{M1} + M_{M2},$$

а суммарный движительный момент на валу второго гребного винта —

$$M_{дв2} = M_{M3} + M_{M4}.$$

Запишем уравнения движения для первого и второго гребного винта:

$$M_{и1} = M_{дв1} - M_{с1} = T_{мех1} \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (2)$$

$$M_{и2} = M_{дв2} - M_{с2} = T_{мех2} \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (3)$$

Введем ограничения на максимально возможное значение движительного момента, развиваемого на валах гребных винтов, равное величине $\max|M_{дв1}| = \max|M_{дв2}| = 1,2$.

Используя начальные условия $\omega_1(0) = 1$, $M_{дв1} = -1,2$ и подставляя (1) в (2), получим график функции $\omega_1(t)$ — рис. 5. Мощность на первом гребном винте при этом составляет $P_{дв1}(t) = M_{дв1}\omega_1(t)$. График функции $P_{дв1}(t)$ приведен на рис. 5. При этом отрицательная величина $P_{дв1}(t)$ характеризует генераторный режим работы гребных электродвигателей $M1$ и $M3$ и режим работы гидротурбины гребного винта, а положительная величина $P_{дв1}(t)$ — двигательный режим работы гребных электродвигателей $M1$ и $M3$, при котором гребной винт создает упор при реверсе ГЭД1.

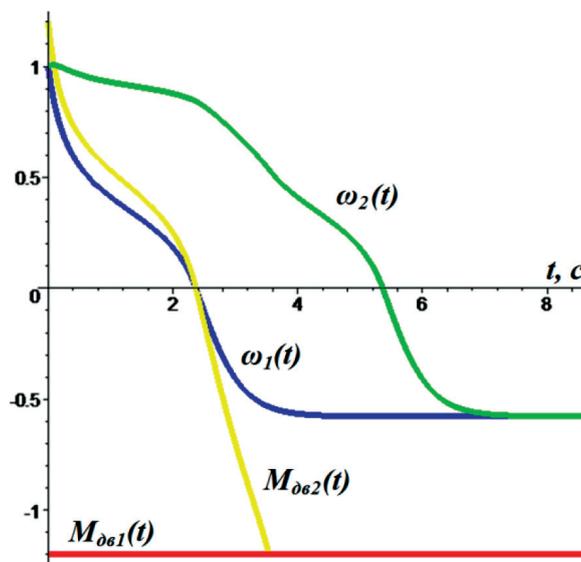


Рис. 5. Зависимости $\omega_1(t)$, $M_{дв1}(t)$, $\omega_2(t)$, $M_{дв2}(t)$ при торможении и реверсе гребного электропривода

Используя условие равенства мощностей $P_{дв1}(t) = P_{дв2}(t)$, величину момента на втором гребном валу можно записать в следующем виде:

$$M_{дв2}(t) = \frac{M_{дв1}\omega_1(t)}{\omega_2(t)}. \quad (4)$$

Данное равенство справедливо в случае, если потери в электромеханических и электрических преобразователях гребной электрической установки отсутствуют. Используя начальные условия $\omega_2(0) = 1$ и решение (3) относительно электромагнитного момента (4), получим зависимость $\omega_2(t)$ график, которой приведен на рис. 5. Подставив результаты решения (3) относительно $\omega_2(t)$ в равенство (4), получим описание того, как должно изменяться значение момента на втором гребном винте, график $M_{дв2}(t)$ функции которой показан на рис. 5.

Мощности на валах двигателей — первом и втором гребных винтах — определяются в виде:

$$P_{дв1}(t) = M_{дв1}(t)\omega_1(t);$$

$$P_{дв2}(t) = M_{дв2}(t)\omega_2(t).$$

На рис. 6 приведены графики временных зависимостей мощностей на валах первого и второго гребных винтов, откуда видно, что до определенного момента времени (до момента вхождения $M_{дв2} = -1,2$ в режим ограничения, при котором $M_{дв1} = -1,2$) сумма мощностей на валах первого и второго гребных винтов равна нулю. Следовательно, при этом нет необходимости сброса энергии торможения на тормозной модуль. После достижения $M_{дв2} = -1,2$ происходит отбор мощности от генераторных агрегатов для работы первого и второго гребных винтов с гребными электродвигателями *М1–М4* на реверс. Рассмотренные процессы описывают исключительно процессы, происходящие в гребном винте, но не отражая при этом процессы остановки и реверса судна, несмотря на их влияние.

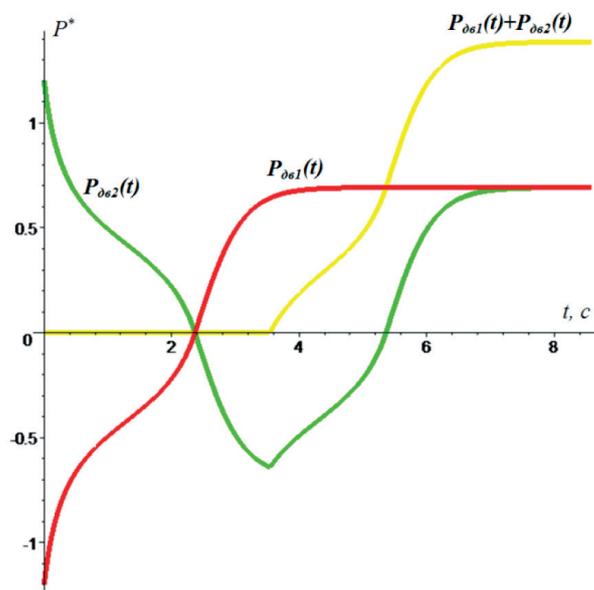


Рис. 6. Зависимость $P_{дв1}(t)$, $P_{дв2}(t)$, $P_{дв1}(t)+P_{дв2}(t)$ при торможении и реверсе гребного винта

Если к системе шин постоянного тока одного борта подключить накопитель с согласующим электрическим преобразователем, то появится возможность накапливать энергию при торможении гребных электродвигателей с последующим расходом этой энергии на разгон гребных электродвигателей, при этом существенно повысится энергетическая эффективность и экономичность энергетической установки судна. Кроме того, данное схемное решение позволит максимально приблизить суммарную установленную мощность гребных электродвигателей и электрических генераторов, а также первичных тепловых двигателей. Динамика в такой системе будет покрываться исключительно накопителем электрической энергии.

В предложенной структуре для повышения качества синтезируемого напряжения и уменьшения величины дисперсии токов, потребляемых гребными электродвигателями, а, следовательно, снижения пульсации электромагнитного момента могут быть использованы трехуровневые инверторы напряжения, построенные на основе схемы с нулевой точкой (рис. 7, а) либо на основе *T*-образной схемы инвертора напряжения (рис. 7, б). При использовании трехуровневых инверторов напряжения их нулевая точка должна быть соединена с общей точкой выпрямителей, образующих систему шин постоянного тока одного борта (см. рис. 7). При использовании трехуровневых инверторов напряжения сохраняется возможность работы гребных электродвигателей всего лишь

от одного генераторного агрегата. При этом трехуровневый инвертор напряжения будет работать в режиме двухуровневого.

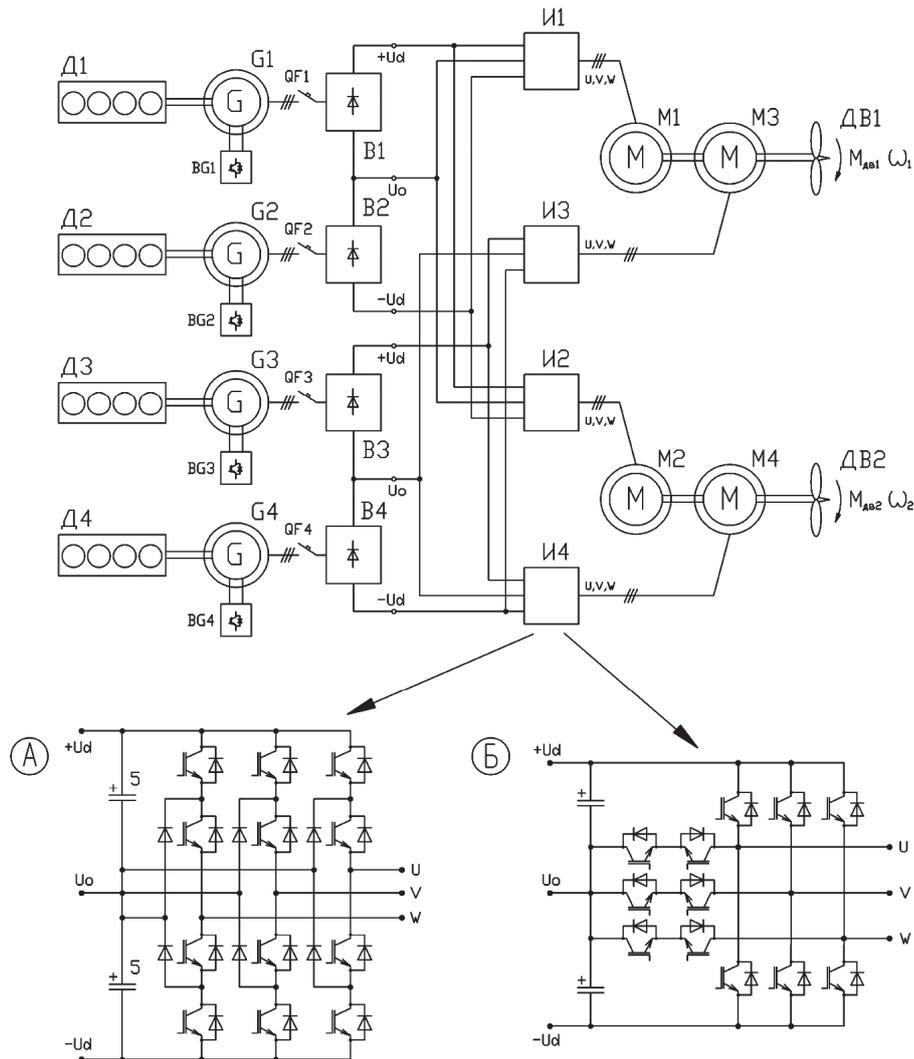


Рис. 7. Структурная схема электродвигательного комплекса судна с двойными шинами постоянного тока на основе трехуровневых инверторов: а — с нулевой точкой; б — на T-образной схеме

Использование двух гальванически изолированных электростанций и электрооборудования в такой ГЭУ с двойными шинами постоянного тока позволяет исключить возникновение аварийной ситуации, при которой выход любого из элементов приведет к выходу всего электродвигательного комплекса, обеспечивая при этом высокую степень надежности и электромагнитной совместимости при работе электростанции разных бортов.

С учетом того, что в судостроении наблюдается рост мощности гребного электропривода, а при этом мощность собственных нужд, которая тратится на освещение, навигацию и прочие потребители жизнеобеспечения судна, постоянно снижается, с внедрением новых энергосберегающих технологий смысл в единой электроэнергетической системе как таковой отпадает. При значительных различиях в мощностях ГЭУ и потребителей собственных нужд проблематично обеспечивать требуемое качество электроэнергии, а также электромагнитную совместимость мощных нагрузок с питающей сетью. В настоящее время при значительных различиях (более чем на порядок) мощностей ГЭУ и установленной мощности потребителей собственных нужд применение схемы единых электроэнергетических систем является некой данью моде и не более того.

При существенном различии мощностей ГЭУ и потребителей собственных нужд рациональнее разделить электростанции для питания соответствующих групп потребителей. Однако при необходимости питания вспомогательных потребителей, а также потребителей собственных нужд от общей электростанции ГЭУ, схема которой представлена на рис. 8, такая структура может содержать дополнительный инвертор напряжения, двухобмоточный согласующий трансформатор, коммутационные аппараты, распределительный щит и вспомогательный дизель-генератор. Такая структура системы электродвижения позволит реализовать единую электроэнергетическую установку судна с возможностью как одновременного, так и раздельного питания ГЭУ, вспомогательных потребителей и потребителей собственных нужд.

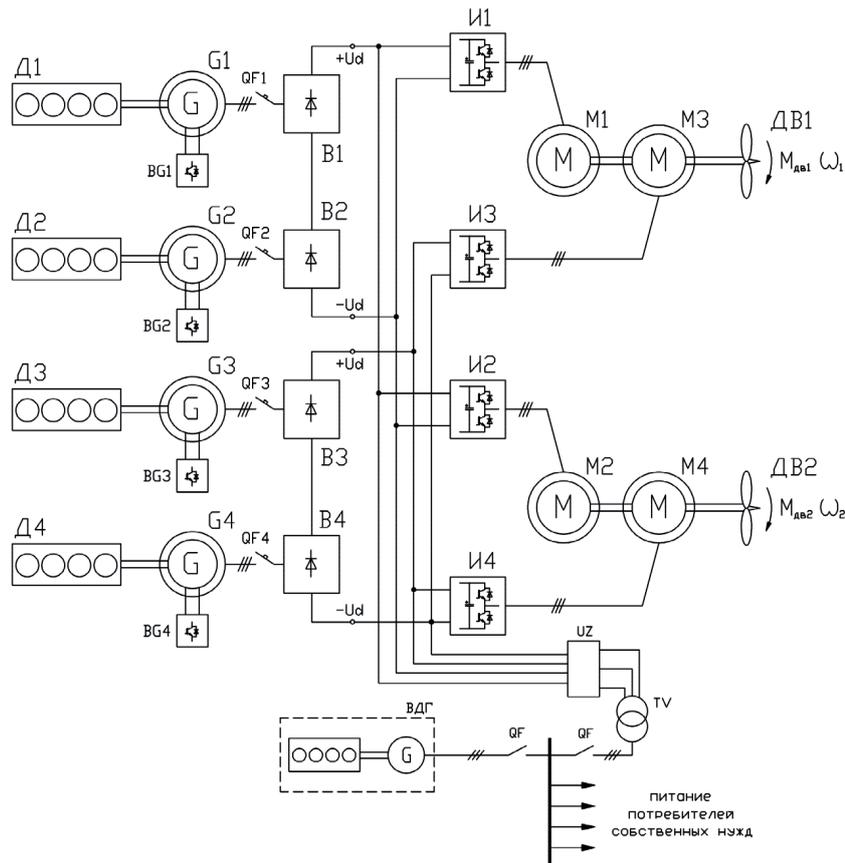


Рис. 8. Структурная схема единой электроэнергетической системы с системой электродвижения судна с двойными шинами постоянного тока

Согласно номенклатуре, наиболее распространенных силовых полупроводниковых элементов, выпускаемых в настоящее время при номинальном напряжении гребных электродвигателей до 1000 В, возможна реализация структуры, представленной на рис. 1, установленной мощностью до 10 МВт. При необходимости увеличения значения установленной мощности предложенной структуры она может быть реализована с использованием многоуровневых инверторов напряжения [18], а также при большем количестве гребных винтов. Предложенная структура универсальна и может быть реализована с использованием источников постоянного тока либо электрохимических генераторов. При реализации ГЭУ значительно большей мощности может быть рекомендована ГЭУ с каскадным преобразователем частоты [19].

Выводы (Summary)

1. Предложенная структура единой электроэнергетической системы отличается простотой и позволяет повысить надежность и живучесть электродвигательного комплекса судна,

реализовать различные алгоритмы управления, которые дают возможность повысить энергетическую эффективность, исключив из состава оборудования электроэнергетической системы тормозные цепи, а также значительно упростить структуру движительного комплекса, построенного с помощью использования простых и надежных элементов.

2. Рассмотренная структура может быть реализована с различным числом генераторных агрегатов и гребных электродвигателей исходя из требуемых характеристик и мощности электродвигательного комплекса.

3. Предлагаемая структура единой электроэнергетической системы позволяет сократить число преобразований электрической энергии, а также упростить узлы и элементы распределения энергии на судне, повысить показатель энергетической эффективности и осуществить распределение энергии между электродвигателями при необходимости торможения судна. К ее достоинствам следует отнести возможность обеспечения питанием потребителей собственных нужд.

4. Электрическая установка судна может быть построена с использованием высокооборотных безредукторных главных генераторных установок с выходным напряжением повышенной частоты, а инверторы напряжения гребных электродвигателей построены на основе трехуровневых инверторов напряжения, которые позволяют получать высокое качество синтезируемого напряжения для питания гребных электродвигателей.

5. Предложенная структура движительного комплекса отличается универсальностью, позволяя использовать в качестве электромеханического преобразователя любой тип электрической машины переменного тока. Также немаловажным фактором является высокая энергетическая эффективность предложенной структуры, и как следствие, большая экологичность и меньшее количество загрязняющих выбросов в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаревский Н. А. Структурные схемы гребных установок, анализ и перспективы развития / Н. А. Лазаревский, В. А. Хомяк, Ф. А. Гельвер, В. Ф. Самосейко // Судостроение. — 2012. — № 3 (802). — С. 44–47.
2. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки: учеб. пособие / А. Б. Дарьенков [и др.]. — Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Р.Е. Алексеева, 2014. — 219 с.
3. Токарев Л. Н. Мультилинейная структура электроэнергетической системы судов с электродвижением / Л. Н. Токарев, Д. А. Хайров // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 77 (361). — С. 43–51.
4. Шинкоренко Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран / Д. Шинкоренко // Зарубежное военное обозрение. — 2007. — № 1. — С. 54–61.
5. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.
6. Вершинин В. И. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В. И. Вершинин [и др.] // Труды Крыловского госуниверситета науч. центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.
7. Михайлов В. А. Электродвижение судов и электропривод судовых механизмов / В. А. Михайлов, С. Б. Рукавишников, И. Р. Фрейдзон. — Л.: Судостроение, 1965. — 608 с.
8. Гельвер Ф. А. Гребная электроэнергетическая установка с общими шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Судостроение. — 2018. — № 2. — С. 22–27.
9. Алешков О. А. Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: дис. ... канд. техн. наук; специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели (Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение)» / О. А. Алешков. — Челябинск, 2009. — 170 с.
10. Матиевский Г. Д. Снижение расхода топлива и вредных выбросов дизеля на режимах постоянной мощности: дис. ... канд. техн. наук; специальность 05.04.02 / Г. Д. Матиевский. — Барнаул, 2013. — 180 с.

11. Самосейко В. Ф. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления. / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. — 174 с.
12. Гельвер Ф. А. Способ торможения и реверса многодвигательной гребной электрической установки с тремя гребными винтами / Ф. А. Гельвер // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 2. — С. 20–27.
13. Росин Е. И. Автоматизированные гребные электрические установки. Движение судна и его главная установка: текст лекции ЛЭТИ / Е. И. Росин. — Л., 1986. — 48 с.
14. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев. — СПб.: Элмор 2004. — 319 с.
15. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. — 6-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 636 с.
16. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков. — М.: Физматлит, 1962. — 620 с.
17. Форсайт Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Мальком, К. Моулер. — М.: Изд-во «Мир», 1980. — 280 с.
18. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT. Перспективные решения / В. Филатов // Силовая электроника. — 2012. — Т. 4. — № 37. — С. 38–41.
19. Пронин М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов. — СПб.: Электросила, 2003. — 172 с.
20. Gelver F.A. Electro-Mobile Installation of the Vessel with Cascade Electric Converter/ F. A. Gelver, I. V. Li, A. V. Saushev, D. S. Semenov // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 459–465. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_44.

REFERENCES

1. Lazarevsky, N. A., V. A. Khomyak, F.A. Gelver, and V.F. Samoseyko. “Block diagrams of propulsion plants, analysis and prospects.” *Sudostroenie* 3(802) (2012): 44–47.
2. Dar’entov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki. Uchebnoe posobie*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.
3. Tokarev, L. N., and J. A. Khairov. “Multi-linear power systems of electric ships.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 77(361) (2013): 43–51.
4. Shinkorenko, D. “Perspektivy razvitiya energeticheskikh ustanovok nadvodnykh korabli VMS zarubezhnykh stran.” *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* 1 (2007): 54–61.
5. Grigor’ev, A.V., and R. R. Zajnullin. “Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
6. Vershinin, Viktor I., Sergey V. Makhonin, Vladimir A. Parshikov, and Valentin A. Khomyak. “Development of electric propulsion systems for ships of various types.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(387) (2019): 107–122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122
7. Mihajlov, V. A., S. B. Rukavishnikov, and I. R. Frejdzon. *Elektrodvizhenie sudov i elektroprivod sudovykh mekhanizmov*. L.: Sudostroenie, 1965.
8. Gelver, F. A. “Shipboard electric propulsion plants with common DC buses.” *Sudostroenie* 2 (2018): 22–27.
9. Aleshkov, O. A. Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti pervichnogo dizelya v sostave mnogofunktional’nogo ener-gotekhnologicheskogo kompleksa optimizatsiej skorostnogo rezhima. PhD diss. Chelyabinsk, 2009.
10. Matievsky, G. D. Snizhenie raskhoda topliva i vrednykh vybrosov dizelya na rezhimakh postoyannoj moshhnosti. PhD diss. Barnaul, 2013.
11. Samoseyko, V. F., F. A. Gel’ver, V. A. Homyak, and D. A. Hajrov. *Sinhronnye mashiny s anizotropnoj magnitnoj provodimost’yu rotora. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. SPb.: FGUP “Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr”, 2016.
12. Gelver, Fedor. “Method of braking and reverse of the multi-engine rowing electrical unit with three rowing screws.” *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* 2 (2017): 20–27.
13. Rosin, E. I. *Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki. Dvizhenie sudna i ego glavnaya ustanovka*. L., 1986.

14. Bykov, A. S., and V. V. Bashaev. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnyh ledokolov*. SPb.: «Elmor», 2004.
15. Bahvalov, N. S., N. P. Zhidkov, and G. M. Kobel'kov. *CHislennye metody*. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008.
16. Berezin, I. S., and N. P. Zhidkov. *Metody vychislenij*. M.: Izd. FizMatLit, 1962.
17. Forsajt, Dzh., M. Mal'kom, and K. Moulder. *Mashinnye metody matematicheskikh vychislenij*. M.: Izd-vo «Mir», 1980.
18. Filatov, V. “Dvuh- i trekhurovnevye inventory na IGBT. Perspektivnye resheniya.” *Silovaya elektronika* 4.37 (2012): 38–41.
19. Pronin, M.V., and A. G. Voroncov. *Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli*. SPb.: Elektrosila, 2003.
20. Gelver, F. A., I. V. Li, A. V. Saushev, and D.S. Semenov. “Electro-Mobile Installation of the Vessel with Cascade Electric Converter.” *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Springer, Cham, 2018. 459–465. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гельвер Фёдор Андреевич —
кандидат технических наук
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gelver@bk.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gelver, Fedor A. —
PhD
Krylov State Research Center
44 Moscow highway,
St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gelver@bk.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.
Received: November 27, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201

MODELING ACTIONS AND REACTIONS OF ERGATIC SYSTEM WITH ELECTROMECHANICAL CONTROL OBJECT

V. O. Tyrva

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A method for constructing a model of actions and reactions of the ergatic human-machine system is proposed. Coordinate and parametric uncertainties are taken into account when joint controlling an electromechanical object. It is used to provide information support for the interaction of a human operator and an automaton while joint managing a technical object at the planning and execution levels. As the initial basis, many incomplete representations of elementary motions in the form of normal systems of ordinary differential equations are used. They allow us to describe the dynamics of the ergatic system state by the image point movement along a trajectory in the state space. Actions in the model are expressed through the movements of the human-machine interface controls. Therefore, "naturalness" of the interaction between management partners is achieved, which contributes to the cognitive process of improving and optimizing the management of an object, taking into account the unformalized conditions of the so-called "human factor". The possibilities of applying clear and interval mappings to clear and interval arguments of the mathematical model of actions and responses in the presence of coordinate and parametric uncertainties are considered. The examples and methods of mathematical and computational transformation of intervals of coordinate and parametric uncertainties into a terminal multidimensional rectangular parallelepiped of uncertainty in the space of phase coordinates are given in the paper. Methods for converting uncertainties include integrating the differential equations of a human-machine system model. Integration is performed for each vertex of a multidimensional rectangular parallelepiped of uncertainty with initial values of phase variables equal to the values of the coordinates of its vertices obtained for the time moment of the end of the previous elementary motion. Illustrative examples of the transformation of uncertainty intervals in a three-dimensional state space are given, and uncertainty rectangles are constructed in the form of projections onto a two-dimensional phase space. The proposed models are technically feasible in the human-machine interface and allow the use of mathematical and computational optimization methods to improve joint management in the ergatic human-machine system.

Keywords: modeling, ergatic system, a human operator, joint control, uncertainty interval.

For citation:

Tyrva, Vladimir O. "Modeling actions and reactions of ergatic system with electromechanical control object." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.

УДК 62-50

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ И ОТВЕТНЫХ РЕАКЦИЙ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ УПРАВЛЕНИЯ

В. О. Тырва

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложен способ построения модели действий и ответных реакций эргатической системы «человек-машина» с учетом координатной и параметрической неопределенностей при совместном управлении электромеханическим объектом. Модель предназначена для информационного обеспечения взаимодействия человека-оператора и автомата при совместном управлении объектом на уровнях планирования и исполнения. В качестве исходного базиса модели использовано множество неполных представлений элементарных движений объекта в форме нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющих описать динамику состояния эргатической системы движением изображающей точки по траектории

в пространстве состояний. Действия в модели выражены через перемещения органов управления человеко-машинного интерфейса. Этим достигается «естественность» взаимодействия партнеров по управлению, способствующая когнитивному процессу совершенствования и оптимизации управления электро-механическим объектом с учетом неформализуемых условий так называемого «человеческого фактора». Рассмотрены возможности применения четких и интервальных отображений к четким и интервальным аргументам математической модели действий и ответных реакций в условиях существования координатной и параметрической неопределенностей. Приведены примеры и способы математического и вычислительного преобразования интервалов координатной и параметрической неопределенностей в терминальный многомерный прямоугольный параллелепипед неопределенности в пространстве фазовых координат. Способы преобразования неопределенностей предусматривают выполнение интегрирования дифференциальных уравнений модели системы «человек-машина» для каждой вершины многомерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности с начальными значениями фазовых переменных, равными значениям координат его вершин, полученным для момента времени окончания предшествующего элементарного движения. Приведены наглядные примеры преобразования интервалов неопределенностей в трехмерном пространстве состояний и построены прямоугольники неопределенностей в виде проекций на двумерное фазовое пространство. Предложенные модели технически реализуемы в человеко-машинном интерфейсе, допускают применение математических и вычислительных методов оптимизации для совершенствования совместного управления в эргатической системе «человек-машина».

Ключевые слова: моделирование, эргатическая система, человек-оператор, совместное управление, интервал неопределенности.

Для цитирования:

Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.

Введение (Introduction)

Автоматизация управления сложными электромеханическими объектами как процесс перехода от ручного управления к автоматическому и по современным представлениям — к автоматическому управлению с искусственным интеллектом, можно представить с позиций придания управляющему автомату (УА) эргатической системы «человек-машина» (СЧМ) с объектом управления способностей к рассуждениям, планированию и принятию решений. Например, применительно к робототехнической интеллектуальной системе А.С. Ющенко сформулировал основную задачу создания такой системы, которая «состоит в организации взаимодействия и согласования возможностей технической и биологической частей системы с тем, чтобы обеспечить наибольшую эффективность системы в целом» [1, с. 5].

«Проектирование взаимодействия» как научное направление в настоящее время получило интенсивное развитие благодаря работам А. Купера [2] и других зарубежных и отечественных ученых. Для стадий исследования и моделирования взаимодействия технической и биологической частей СЧМ выделены три уровня управления объектом системы: целеуказание, планирование и исполнение. Например, систему «человек-робот» следует рассматривать как «способную взаимодействовать с человеком на всех уровнях, включая уровень постановки целей» [3]. Конечная (стратегическая) цель такой системы — *эргамата* — задается человеком-оператором (ЧО). Эргамат можно представить как систему кооперативной деятельности ЧО и ассистента — УА, т. е. устройства, самостоятельно выполняющего целенаправленные действия [4]. Одной из форм взаимодействия в эргамате является совместное управление (СУ), при котором действия УА связываются с органами управления человеко-машинного интерфейса СЧМ [5]. При такой форме взаимодействия эргамат приобретает свойство «естественности» (с точки зрения человека), т. е. способности обеспечить антропоморфизм технической части системы на когнитивном уровне [3]. Исследования в этом направлении находятся на начальной стадии.

В настоящей работе исследованы возможности использования антропоморфизма УА СЧМ для организации взаимодействия ЧО и УА на уровнях задач планирования и исполнения совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в условиях

неопределенности с целью получения технически реализуемых решений с помощью человеко-машинного интерфейса. Исследование проведено с применением методов интервальной математики в моделировании поведения СЧМ в пространстве состояний при дифференциальных связях фазовых координат СЧМ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Математическое моделирование действий и ответных реакций, выполненное для совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в СЧМ, имеет результатом построение множества неполных представлений движения изображающей точки по траектории в пространстве состояний системы [5]. С помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений — элементов этого множества — представлены результаты мыслительной деятельности человека-оператора, воплощенные в воздействиях на органы управления человеко-машинного интерфейса и ответные реакции машины на эти действия [6]. Исходным условием требуемого обеспечения антропоморфизма технической части СЧМ является установление соответствия между элементами множества неполных представлений движения и целями, побуждающими к действию ЧО. Возможность установления такого соответствия подтвердил, в частности, анализ результатов натуральных экспериментов по реализации управляемого движения судов в условиях повышенной опасности [6], [7]. Каждому из выделенных девяти неполных представлений элементарных движений судна, рассмотренных в работе [5], относится одна или несколько элементарных целей, связанных как с перемещением органа ручного управления упором движителя, так и с ожидаемым при этом движением судна. Причем в решении каждой терминальной задачи перемещения органа управления и самого судна содержалась реализация последовательности элементарных целей и соответствующих им представлений элементарных движений. Например, выполнению команды «малый ход» соответствует терминальная задача перемещения в определенное положение рукоятки управления упором винта судна из некоторого исходного положения. От исходного положения рукоятки управления гребным двигателем и терминальной цели зависит последовательность элементарных целенаправленных действий и моделирующих их неполных представлений движения из указанного множества, состоящего из девяти элементов.

На этапах планирования и исполнения совместного управления электромеханическим объектом СЧМ приходится решать задачи терминального управления, имея в виду смысл, вложенный Б. Н. Петровым и его коллегами в понятие «терминальность» применительно к бортовым системам летательных аппаратов [8]. В частности, обращается внимание на связь цели и параметров движения: «изменение цели полета космического объекта приводит к изменению параметров уравнений объекта». Отметим также следующую особенность: «программу невозмущенного движения приходится пересчитывать заново при каждой смене цели управления. В этом смысле значительно более удобной оказывается система управления с апостериорно формируемой программой: организация процесса расчета на борту значений параметров оптимального закона управления остается неизменной» [8, с. 15]. Идея построения многорежимной (при различных критериях качества и ограничениях на управления) системы управления основана на создании бортовой библиотеки алгоритмов терминального управления, размещенной в памяти бортовой ЦВМ и перепрограммирования ЦВМ в полете. Каждый из «терминальных» алгоритмов получается в результате синтеза системы, оптимальной в одном данном режиме работы системы.

Для анализа содержания этапов планирования и исполнения «управляемой деятельности» [3] СЧМ СУ воспользуемся предложенным подходом: «в общем случае прогнозирование будущего движения может выполняться путем численного интегрирования уравнений объекта, а процесс управления строиться итеративным путем. При этом, естественно, должна быть решена задача оценки координат состояния системы на основе метода фильтрации результатов наблюдений» [8, с. 15].

С учетом особенностей СУ [6], [9] элементарные операции в модели действий и ответных реакций СЧМ характеризуются множеством \mathbb{Z} неполных представлений элементарных движений

изображающей точки по траектории в едином для всех элементарных операций (движений) пространстве состояний $\{t \times X\}$:

$$\mathbb{Z} = \left\{ \frac{dX}{dt} = F^r(X), r = 1, 2, \dots, R \right\}, \quad (1)$$

где t — время; X — вектор-столбец $[N \times 1]$ фазовых координат x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) СЧМ в модели (1), учитывающей действия ЧО и УА через органы управления человеко-машинного интерфейса.

Все неполные представления элементарных движений, выражаемые обыкновенными дифференциальными уравнениями

$$\frac{dX}{dt} = F^r(X), r \in \overline{1, R}, \quad (2)$$

имеют попарно различные по параметрам вектор-функции правых частей и

$$F^r(X) = \begin{bmatrix} f_1^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^r(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} f_1^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ f_2^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \vdots \\ f_N^k(x_1, x_2, \dots, x_N) \end{bmatrix} = F^k(X) \quad (3)$$

при $k \neq r$. Структурные различия между $F^r(X)$ и $F^k(X)$ обусловлены моделями конкретных органов управления и действиями человека-оператора и, возможно, внешними и внутренними возмущениями. На стадии исполнения управления переход от $F^r(X)$ к $F^k(X)$ с помощью органа управления осуществляется по дискретному сигналу управления на основе определенной (элементарной) цели. Такой переход можно рассматривать как антропоморфное управление, моделируемое скачкообразным изменением параметров правой части уравнения (2) при изменении цели [8], которое приводит к выполнению новой операции в управляемой деятельности согласно источнику [3], т. е. к выполнению нового элементарного движения и появлению угловой точки на непрерывной траектории движения в пространстве состояний СЧМ при условии (3). В реальной СЧМ подобное управление часто реализуется путем коммутации электрических цепей электромеханической части системы с помощью аппаратов контактной и бесконтактной коммутации, а также кинематических цепей путем подключения-отключения тормозных устройств, механических передач и т. п. При этом изменяются каналы передачи энергии (и информации) в СЧМ, что интерпретируется как изменение структуры технической части СЧМ и связанное с этим управление представляется как структурное управление [9], [10].

Если рассматривать управляемую деятельность СЧМ в прошлом как исполненное движение изображающей точки в пространстве состояний $\{t \times X\}$, то каждой k -й угловой точке траектории соответствует смена одной цели управления на другую цель, в результате достижения предшествующей цели при определенных значениях $t = t_k, x_1 = x_1(t_k), x_2 = x_2(t_k), \dots, x_N = x_N(t_k)$. Если при выборе пространства состояний учесть, в достаточной мере, в представлениях (2) воздействия на объект со стороны органов управления и со стороны внешней среды на СЧМ, то множество (1) можно использовать для описания многоцелевого поведения СЧМ на продолжительном интервале этапа эксплуатации жизненного цикла и, следовательно, отражать эксплуатацию СЧМ с помощью траектории в пространстве состояний.

Экстраполяция траектории как составная часть планирования программного изменения состояния СЧМ может осуществляться на основе предшествующего опыта, отраженного в траектории исполненного движения, и базы знаний с априорными сведениями об адекватности представлений множества (1). В связи с этим следует учесть особенности вычисления функций для четких, интервальных и нечетких данных, основываясь на классификации, приведенной в [11]. Варианты применения вычислительных процедур в зависимости от типа функции f и аргумента x показаны на рис. 1.

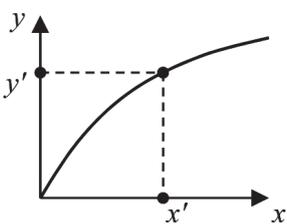
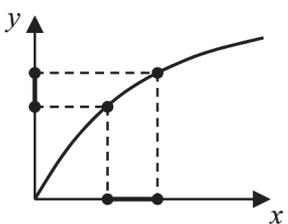
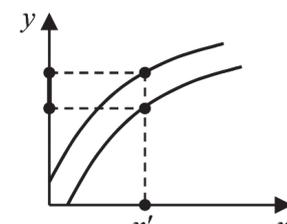
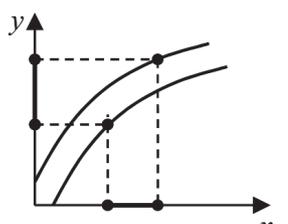
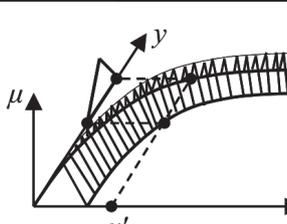
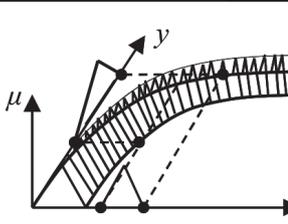
Типы функций	Четкий аргумент	Интервальный или нечеткий аргумент
Четкая функция		
Интервальная функция		
Нечеткая функция		

Рис. 1. Вычисление значений четких интервальных и нечетких функций для четких, интервальных и нечетких аргументов с функцией принадлежности μ

Функция f может быть задана в виде отношения на декартовом произведении $X \times Y$ с аргументом $x \in X$ и значением $y \in Y$. Вычисление функции для заданного значения входной переменной выполняется за три шага вне зависимости от типа функции и данных (четких, интервальных, нечетких):

- задание значения входной переменной x в пространстве $X \rightarrow Y$ (вертикальные пунктирные линии на рис. 1);
- нахождение пересечения с отношением;
- проекция этого пересечения на Y (горизонтальная пунктирная линия).

На основе применения приема трехшагового вычисления функции предусмотрим оценку точности прогнозирования (экстраполяции) траектории изменения состояния СЧМ по исходной модели (1) с учетом:

- параметрической неопределенности вектор-функции $F^r(X)$ ($r \in \overline{1, R}$);
- координатной неопределенности вектора фазовых координат X .

Результаты (Results)

Рассмотрим возможности оценки точности прогнозирования состояния технической части СЧМ для элементарной операции на основе интервальных методов. Математические модели построим на примере объекта, электрическая схема которого показана на рис. 2, а.

Источник электрической энергии создает электродвижущую силу E . По электрической цепи с индуктивностью L и активным сопротивлением R протекает электрический ток i при замыкании контакта S в некоторый момент времени $t = t_{r-1}$. На рассматриваемом интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$ параметры L , R и E не изменяют свои значения. Замыкание контакта отождествляется с дискретным сигналом управления в СЧМ совместного управления.

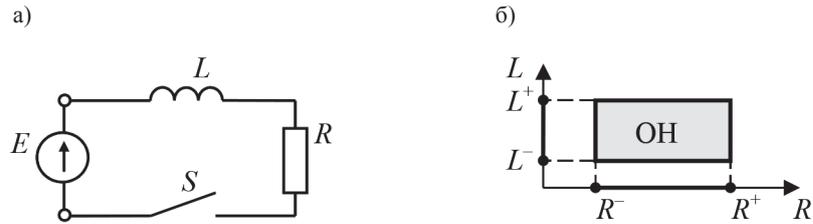


Рис. 2. Электрическая схема объекта СЧМ (а) и область неопределенности ОН значений параметров (б)

Неполное представление (2) в явном виде при $X = i$ получаем, используя для расчета схемы (рис. 2, а) законы электротехники. Имеем:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}E. \quad (4)$$

Разные причины появления координатной интервальной неопределенности (КИН):

$$[i(t)] = \{i(t) : i^-(t) \leq i(t) \leq i^+(t)\} \quad (5)$$

при $t \in [t_{r-1}, t_r]$ представлены на рис. 3 на основе интегрирования дифференциального уравнения (4).

В первом сегменте рис. 3 с помощью графика показано, что при наличии параметрической интервальной неопределенности (ПИН) $[L] = \{L : L^- \leq L \leq L^+\}$ (рис. 2, б) параметра (индуктивности) L величина $\delta i(t) = |i^+(t) - i^-(t)|$ КИН (5) координаты $i(t)$ сначала увеличивается, а затем уменьшается, стремясь к нулю при $t_r \rightarrow \infty$. На больших интервалах времени $[t_{r-1}, t_r]$ ПИН $[L]$ оказывает незначительное влияние на результат элементарной операции, что оправдывает применение уравнения (4) по варианту «четкий аргумент – четкая функция» (см. рис. 1). В этом случае, если $t_r \gg t_{r-1}$, то

$$i(t_{r-1}) \rightarrow i(t_r) \cong \frac{1}{R}E$$

при любом значении параметра $L \in [L^-, L^+]$.

1		Интервальная неопределенность по варианту «четкий аргумент – интервальная функция», обусловленная параметрической неопределенностью L
2		Интервальная неопределенность по варианту «четкий аргумент – интервальная функция», обусловленная параметрической неопределенностью R
3		Интервальная неопределенность по варианту «интервальный аргумент – четкая функция», обусловленная координатной неопределенностью $u(t_{r-1})$

Рис. 3. Интервальные неопределенности элементарной операции

Во втором сегменте рис. 3 график показывает, что при наличии ПИН $[R] = \{R : R^- \leq R \leq R^+\}$ (см рис. 2, б) величина $\delta i(t)$ монотонно увеличивается при $t_r \rightarrow \infty$ до некоторого постоянного значе-

ния, отличного от нуля. В этом случае для большого интервала времени $[t_{r-1}, t_r]$ ПИН $[R]$ оказывает влияние на прогнозируемый результат элементарной операции, что означает оправданность применения уравнения (4) по варианту «четкий аргумент – интервальная функция» согласно рис. 1:

$$i(t_{r-1}) \rightarrow [i(t_r)] = \left\{ i(t_r) : \frac{1}{R^+} E \leq i(t_r) \leq \frac{1}{R^-} E \right\},$$

если $t_r \gg t_{r-1}$ и $R \in [R^-, R^+]$.

В третьем сегменте рис. 3 график показывает, что величина $\delta i(t)$ координатной интервальной неопределенности (КИН) $[i(t_{r-1})]$ начального состояния координаты $i = i(t_{r-1})$ при $t > t_{r-1}$ монотонно убывает до нуля, когда $t_r \rightarrow \infty$. На больших интервалах времени $[t_{r-1}, t_r]$ координатная неопределенность $[i(t_{r-1})]$ оказывает незначительное влияние на прогнозируемый результат элементарной (терминальной) операции, что означает оправданность применения уравнения (4) по варианту «интервальный аргумент – четкая функция»:

$$[i(t_{r-1})] = \left\{ i(t_{r-1}) : i^-(t_{r-1}) \leq i(t_{r-1}) \leq i^+(t_{r-1}) \right\} \rightarrow i(t_r) \cong \frac{1}{R} E$$

при $t_r \gg t_{r-1}$.

В работе [12] Н. В. Скибицким и Н. В. Севальевым на примере линейной модели системы второго порядка с кусочно-постоянной функцией управления (модель может быть сведена к множеству типа (1) в линейной форме) показано, что если система имеет произвольный порядок N и линейна, а область начальных состояний описывается N -мерным прямоугольным параллелепипедом, то область прогноза состояний на множестве возможных начальных состояний представляет собой N -мерный параллелепипед и не существует единственного управления, гарантирующего точный перевод системы при любых возможных начальных состояниях из заданной области в точно заданное конечное состояние. При этом для построения указанной области прогноза достаточно определить значения состояний системы как функцию только начальных состояний, расположенных в вершинах N -мерного прямоугольного параллелепипеда, задающего множество возможных начальных состояний системы.

Резюмируя ранее изложенное, будем полагать, что элементарной операции поставлено в соответствие неполное представление движения (2), в котором выделено множество A^r параметров $a_1^r, a_2^r, \dots, a_{M(r)}^r$, ПИН $[a_1^r], [a_2^r], \dots, [a_{M(r)}^r]$ которых учитывается при прогнозе терминального состояния, характеризуемого координатной неопределенностью вектора X :

$$[X(t_r)] = \begin{bmatrix} [x_1(t_r)] \\ [x_2(t_r)] \\ \vdots \\ [x_N(t_r)] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $M(r)$ — количество параметров с интервальными неопределенностями в r -м неполном представлении из множества (1).

Будем также считать, что используются такие представления элементарных движений (2), у которых:

- вектор-функция $F^r(X)$ в уравнении (2) дифференцируема по X при любом $r \in \overline{1, R}$;
- вектор $X(t_r)$ дифференцируем по параметрам множества A^r ;
- интервал неопределенности каждого параметра a_j^r ($j \in \overline{1, M(r)}$) множества A^r определяется абсолютной погрешностью Δa_j^r (является метрологической характеристикой), поэтому

$$[a_j^r] = \{ a_j^r : \bar{a}_j^r - \Delta a_j^r \leq a_j^r \leq \bar{a}_j^r + \Delta a_j^r \}, \quad (7)$$

где \bar{a}_j^r — номинальное (например, измеренное) значение параметра a_j^r , используемого в вектор-функции $F^r(X)$ (детерминированной модели) для прогноза номинального состояния системы $X(t_r)$ в момент t_r . Такой прогноз осуществляется в соответствии с «гипотезой полной определенности»

по Н. Н. Моисееву [13] путем интегрирования уравнения (2) при номинальных значениях параметров и фазовых координат. Оценка точности прогноза производится по величине ИН $[x_i(t_r)]$ каждой фазовой координаты $x_i(t_r)$ ($i \in \overline{1, N}$) в момент t_r окончания r -й элементарной операции. Эти ИН координат представляются как ребра N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности, определяющего область неопределенности (ОН) $V_X(t_r)$ прогнозирования состояния СЧМ на момент t_r .

Таким образом, если учитываются интервальные неопределенности значений параметров и фазовых координат, то в процесс прогнозирования изменения состояния СЧМ в каждой элементарной операции вводятся две составляющие, требующие выполнения вычислений по варианту «четкий аргумент – четкая функция» (см. рис. 1), возлагаемых на УА, а именно:

- интегрирование уравнения (2) на соответствующем интервале $[t_{r-1}, t_r]$ при номинальных значениях параметров $a_1^r, a_2^r, \dots, a_{M(r)}^r$ и начальных значениях координат вектора $X(t_{r-1})$, полученных на правом конце интервала времени предыдущей элементарной операции; результатом является построение программной траектории в пространстве состояний $\{t \times X\}$ на интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$ и получение четкого (программного) значения $X(t_r)$ на ее правом конце $t = t_r$ в элементарной операции;

- интегрирование уравнений (2) в количестве $2^{N+M(r)}$ на интервале $[t_{r-1}, t_r]$ при различных комбинациях граничных значений параметров (7), соответствующих вершинам области неопределенности (ОН) этих параметров, выполняемое для каждого начального значения $X(t_{r-1})$ на множестве начальных значений, соответствующих вершинам N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности вектора $X(t_{r-1})$, построенного для момента времени $t \rightarrow t_{r-1}$ окончания предыдущей элементарной операции; результатом является множество множеств ИН фазовых координат, объединение которых по осям фазовых координат по правилам интервальной математики:

$$[x_i] = [a_i] \cup [b_i] = \left[x_i : x_i^- = \min(a_i^-, b_i^-) \leq x_i \leq x_i^+ = \max(a_i^+, b_i^+) \right], i \in \overline{1, N},$$

приводит к интервалам, определяющим ребра N -мерного прямоугольного параллелепипеда неопределенности вектора $X(t_r)$.

Примеры выделенных составляющих процесса расчета прогнозируемого результата выполнения элементарной операции приводятся на рис. 4 в трехмерном пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2\}$ при $N = 2$.

Фрагмент программы на рис. 4 отображен программной траекторией $X(t)$ на интервале времени $[t_{r-1}, t_r]$, а также отрезками траектории слева (при $t < t_{r-1}$) и справа (при $t > t_r$) от этого интервала. Угловые точки программной траектории показаны для концов интервала, длина которого τ_r характеризует глубину прогноза элементарной операции по представлению (2). Через $V_X(t_{r-1})$ и $V_X(t_r)$ обозначены области начальной и конечной неопределенности фазовых координат, которые в рассматриваемом случае имеют форму прямоугольника (тоновые участки на рис. 4). Показаны также проекции программной траектории (так называемый *фазовый портрет*) и проекции областей неопределенности и концов траекторий на плоскость с осями координат $0x_1x_2$. Стрелками на пунктирных линиях показаны направления, по которым выполнено построение интервалов и областей неопределенности. Большой пунктирной стрелкой на рис. 4, в заменено множество траекторий от $V_X(t_{r-1})$ к $V_X(t_r)$ ($4 \cdot 2 = 8$ траекторий), получаемых при интегрировании уравнения (2) с начальными условиями в вершинах $V_X(t_{r-1})$ и значениями a_r^- и a_r^+ некоторого параметра a_r с интервальной неопределенностью $[a_r]$, оказывающей влияние на область $V_X(t_r)$ в соответствии с рис. 4, а. Из каждой вершины области $V_X(t_{r-1})$ на рис. 4, в исходят две траектории: одна при $a_r = a_r^-$, другая при $a_r = a_r^+$. Построение области неопределенности $V_X(t_r)$ на рис. 4, б выполнено при условии $M(r) = 0$.

Области неопределенности $V_X(t_r)$ на рис. 4, а–в построены по краевым точкам интервалов на осях $0x_1$ и $0x_2$, полученным в результате объединения интервалов ПИН и КИН в виде проекций на соответствующие оси. В этом примере прогнозирование состояния СЧМ в конце элементарной операции, учитывающее ПИН и КИН, основано на интегрировании $1 + 8 = 9$ уравнений вида (2). Результатом является получение информации о программном (номинальном) состоянии СЧМ $\{x_1(t_r) = \bar{x}_1(t_r), x_2(t_r) = \bar{x}_2(t_r)\}$ в конце элементарной операции и точности прогнозирования этого состояния в форме интервальных значений фазовых координат $[x_1(t_r)], [x_2(t_r)]$.

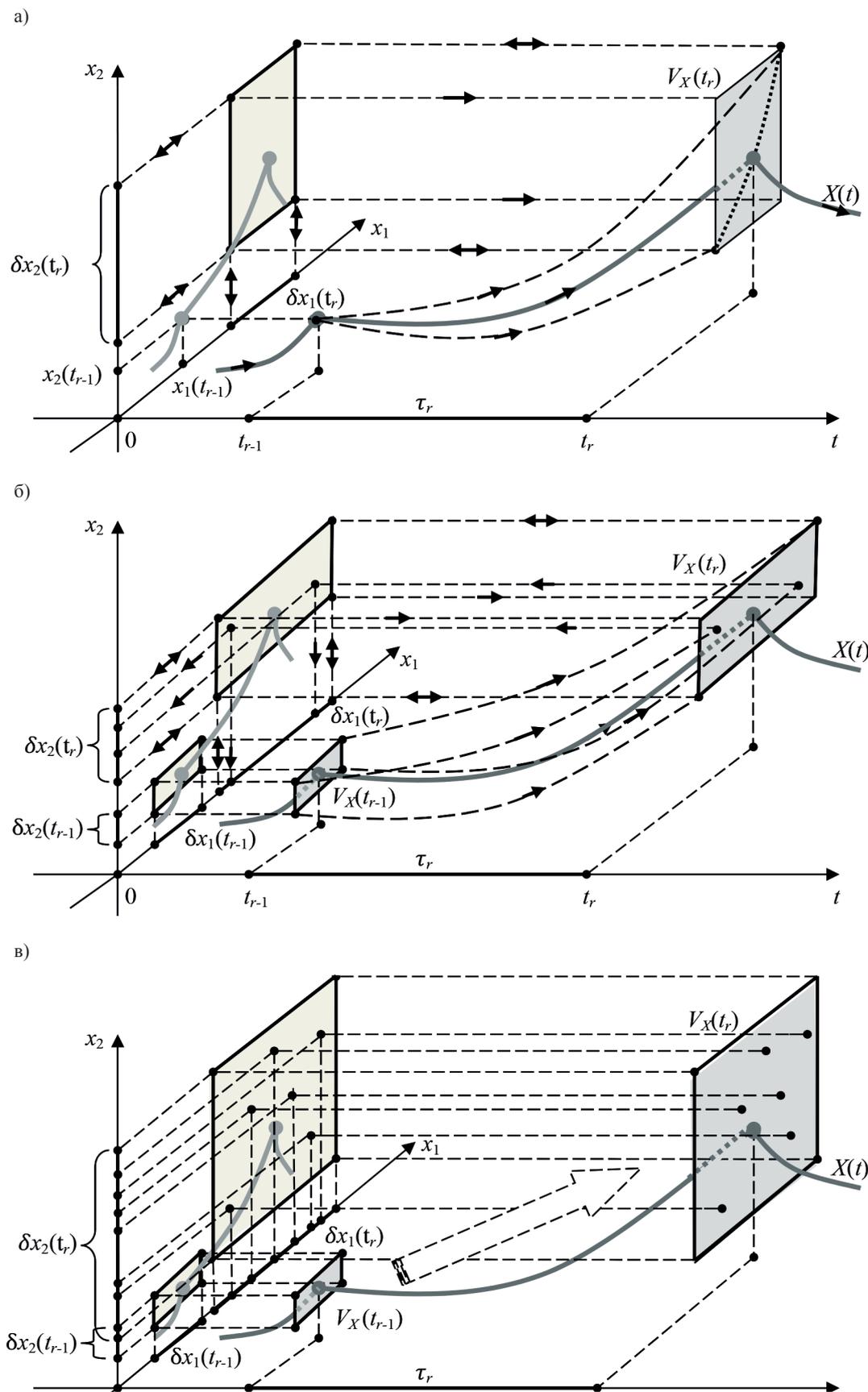


Рис. 4. Примеры расчетов результата выполнения элементарной операции в условиях:
 а — параметрической интервальной неопределенности при $M(r) = 1$;
 б — координатной интервальной неопределенности при $M(r) = 0$;
 в — параметрической и координатной неопределенностей при $M(r) = 1$

Полное количество $P(r)$ интегрируемых на интервале $[t_{r-1}, t_r]$ дифференциальных уравнений вида (2) при произвольных значениях N и $M(r)$ составляет

$$P(r) = 1 + 2^{N+M(r)}. \quad (8)$$

Обсуждение (Discussion)

А. С. Ющенко в статье [1] подробно описал способы организации взаимодействия ЧО и робота через человеко-машинный интерфейс при реализации ситуационного управления [14]. Поэтому не повторяя сделанных в работе выводов и предложений, отметим значимую особенность подхода к конструированию управления в СЧМ по множеству (1) на всех уровнях управления, подкрепив его заключением из статьи [1, с. 8]: «робототехнические и мехатронные системы, в которых используются естественные представления человека о внешнем мире и естественные для оператора описания выполняемых в нем действий, могли бы найти широкое применение». В этой связи диалог ЧО с УА, основанный на принципе СУ, моделируемого множеством (1), в максимальной степени адаптирован для ЧО, так как УА предлагает действия, выражаемые через органы управления, за перемещения которых стоят «естественные» для ЧО цели управления. Эта особенность отличает постановку и решение задач планирования и исполнения совместного управления от классических задач программного управления и синтеза управления [13]. Она заключается в том, что вариационная задача расчета оптимального программного управления, решение которой (если удастся его получить для нелинейной модели) непосредственно трудно технически реализуемо, заменяется на более простую задачу параметрической оптимизации моментов времени смены элементарных операций, за которыми стоят ясные цели антропоморфного управления в форме дискретных технически реализуемых сигналов управления.

Давно известны трактовки задач оптимального управления, которые позволяют рассматривать их как задачи параметрической оптимизации моментов смены элементарных движений в определенной сообразно «здоровому смыслу» последовательности. Например, оптимальное управление скоростью движения тепловоза по перегону выражается последовательностью из пяти элементарных движений: разгон с ограничением ускорения, движение с ускорением на максимальной мощности двигателя, движение с заданной скоростью, свободный выбег, торможение механическим тормозом [15]. В примере с «оптимальным решением таксиста» [16] движение автомобиля между перекрестками с остановкой у светофора представлено последовательностью из трех составляющих: разгон с максимальным ускорением, движение с ограниченной скоростью, торможение. Похожая задача терминального управления движением судна рассмотрена в [5].

В экспериментах ускоренного ввода судна в камеру шлюза была испытана реализация последовательности из четырех элементарных движений [5]. Однако попытка управляемого ввода судна в камеру шлюза и остановки в заданном месте по последовательности из четырех элементарных движений в экспериментах не увенчалась успехом из-за «человеческого фактора». Эксперименты и проведенные исследования показали, что при программировании и реализации управления в СЧМ «человеческий фактор» необходимо учесть в последовательности неполных представлений элементарных движений по множеству (1), в ограничениях, накладываемых на элементарные движения, в оценках точности выполнения программных движений. Построение временной последовательности таких операций является результатом диалога ЧО с УА. В ходе диалога с УА оператор корректирует расчетные значения моментов времени подачи дискретных сигналов управления, например, на основе решения уравнений чувствительности. Для такой процедуры получены необходимые условия оптимальности моментов действия дискретных сигналов управления и предложены математические модели для коррекции дискретных сигналов управления [17], которые используются для пошагового продвижения к оптимуму в расчетах, как это предложено в работе [8] «итеративным путем» с применением градиентного метода вычислений, например, в соответствии с [18].

Программное управление не предусматривает использования информации об измененных значениях фазовых координат (по определению). Рассчитанная УА программа изменения состояния СЧМ может быть точно реализована в редких случаях, когда отмеченные ранее неопределенности настолько малы, что ими можно пренебречь. В условиях существенных неопределенностей программное управление должно быть построено с учетом неопределенностей так, чтобы повысить реалистичность программы. Таким образом, при конструировании программного управления в СЧМ с учетом параметрической и координатной неопределенностей требуется расширение множества (1) неполных представлений элементарных операций без структурного изменения каждого представления (2). Параметрическая неопределенность по $M(r)$ параметрам будет раскрыта при прогнозировании терминального состояния СЧМ, если помимо уравнения (2) с номинальными значениями параметров используются для интегрирования еще $P_A(r) = 2^{M(r)}$ дифференциальных уравнений, записанных для различных комбинаций граничных значений интервалов неопределенностей, выраженных в соответствии с (7).

Информация о неопределенности прогнозируемого изменения состояния СЧМ для каждой угловой точки траектории может быть использована и ЧО и УА для коррекции программы до ее исполнения. К тому же в случае недопустимого возрастания неопределенности программной траектории на стадии исполнения могут быть определены моменты или интервалы времени для проведения апостериорного формирования программы в соответствии с предложением, изложенным в [8]. Для этого имеются две возможности: 1) сдвигаются моменты времени подачи дискретных сигналов управления относительно рассчитанных ранее значений с сохранением априорной последовательности действий ЧО или / и УА; 2) производится изменение спланированной последовательности действий, а значит, последовательности неполных представлений (2) и элементарных движений, и выполняются расчеты значений моментов времени подачи дискретных сигналов управления на исполнительную часть СЧМ для реализации апостериорной программы.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование показывает, что повышению качества совместного управления электромеханическим объектом с сосредоточенными параметрами в СЧМ на уровнях планирования и исполнения способствует получение и использование информации о параметрической и координатной неопределенностях описания элементарных движений объекта, представленной моделью в форме (1) и (2). Обмен информацией между ЧО и УА с учетом неопределенностей приобретает свойство «естественности» благодаря антропоморфизму совместного управления, при котором цели управления отдельными элементарными движениями объекта СЧМ связываются с перемещениями органов управления человеко-машинного интерфейса системы.

Предложены и проиллюстрированы в графическом виде способы представления и построения координатной неопределенности в форме многомерного прямоугольного параллелепипеда как терминального неопределенного состояния СЧМ в пространстве фазовых координат. Построение осуществлено с привлечением методов интервальной математики, что позволило учесть помимо координатной неопределенности также параметрическую неопределенность неполного представления управляемого движения сложного электромеханического объекта и органов управления СЧМ.

Показано, что в зависимости от конкретного вида неполного представления элементарного движения (2) координатная неопределенность, по мере увеличения времени прогнозирования состояния СЧМ, может увеличиваться неограниченно, может стремиться к некоторому постоянно (интервальному) значению, а также может стремиться к нулю. В любом случае для повышения точности прогнозирования состояния СЧМ в результате уменьшения неопределенности на конечном интервале времени важно располагать и использовать решение задачи оценки координат состояния системы в соответствии с [8].

Взаимодействие ЧО и УА и совместное управление электромеханическим объектом СЧМ на основе предложенных моделей технически реализуемо и допускает применение математических и вычислительных методов оптимизации для совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко А. С. Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
2. Купер А. Алан Купер об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин; Пер. с англ. — СПб.: СимволПлюс, 2009. — 688 с.
3. Ющенко А.С. Ситуационное управление и робототехника // Материалы III Пospelovskikh чтений «Искусственный интеллект сегодня. Проблемы и перспективы». — М., 2007. [Электронный ресурс] / А. С. Ющенко. — Режим доступа: <http://www.posp.raai.org/?arch> (дата обращения: 28.10.2019).
4. Saushev A. Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems / A. Saushev, V. Tyuva, L. Kovtun // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. — Vol. 135. — Pp. 01006. DOI: 10.1051/e3s-conf/201913501006/.
5. Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
6. Tyuva V.O. Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System “Man-Machine” / V.O. Tyuva, A.V. Saushev, O.V. Shergina // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501665.
7. Тырва В.О. Оптимизация управления движением судна в технологическом процессе шлюзования / В. О. Тырва // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития транспортной инфраструктуры северных территорий». — Котлас: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 22–29.
8. Петров Б. Н. Проблемы гибкости и надежности управления в теории бортовых терминальных систем / Б. Н. Петров, А. Я. Андриенко, В. П. Иванов, Ю.П. Портнов-Соколов // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 2. — С. 15–24.
9. Воробьев А. В. Концепция построения эргатического интерфейса многофункционального авиационного комплекса с интегрированной модульной авионикой / А. В. Воробьев, М. М. Сильвестров, Ю. И. Бегичев, Л. О. Котицын, Д. Н. Левин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2019. — Т. 20. — № 1. — С. 59–64. DOI: 10.17587/mau.20.59-64.
10. Саушев А. В. Параметрический синтез электромеханических систем / А.В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2013. — 315 с.
11. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 284 с.
12. Скибицкий Н. В. Интервальные модели в задачах оптимального управления с дифференциальными связями / Н. В. Скибицкий, Н. В. Севальнев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 66–72.
13. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры), 1975. — 527 с.
14. Терехин Д. Э. Системы ситуационного управления на основе технологий SemanticWeb / Д. Э. Терехин, А. Ф. Тузовский // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2015): Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Российская АН, Сиб. отд.; Ин-т математики им. С. Л. Соболева. — Новосибирск: ООО «Технотрейд», 2015. — Т. 2. — С. 151–155.
15. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.
16. Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растринин. — М.: Сов. радио, 1980. — 232 с.
17. Тырва В. О. Применение математических моделей для коррекции дискретных сигналов управления объектом эргатической системы / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 171–178.
18. Allen-Zhu Z. The lingering of gradients: how to reuse gradients over time / Z. Allen-Zhu, D. Simchi-Levi, X. Wang // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2018. — Pp. 1244–1253.

REFERENCES

1. Yuschenko, A.S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.

2. Cooper, Alan, Robert Reimann, and Dave Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. Wiley, 2007. 648 p.
3. Yushchenko, A. S. "Situatsionnoe upravleniieirobototekhnika." *Materialy III Pospelovskikhchenii «Iskusstvennyiintellektsegodnya. Problemyiperspektivy»*. M., 2007. Web. 28 Oct. 2019 <<http://www.posp.raai.org/?arch>>.
4. Saushev, Alexandr, Vladimir Tyrva, and Lev Kovtun. "Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems." *E3S Web of Conferences*. Vol. 135. EDP Sciences, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501006/
5. Tyrva, Vladimir O. "Joint control by object in ergatic system: models and realizations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
6. Tyrva, Vladimir O., Aleksander V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System "Man-Machine"." *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501665
7. Tyrva, V. O. "Optimizatsiya upravleniya dvizheniem sudna v tekhnologicheskome protsesse shlyuzovaniya." *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy razvitiya transportnoi infrastruktury severnykh territorii»*. Kotlas: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2014. 22–29.
8. Petrov, B. N., A. Ya. Andrienko, V. P. Ivanov, and Yu. P. Portnov-Sokolov. "Problemy gibkosti i nadezhnosti upravleniya v teorii bortovykh terminal'nykh sistem." *Avtomatika i telemekhanika* 2 (1981): 15–24.
9. Vorobyov, A. V., M. M. Silvestrov, Y. I. Begichev, L. O. Kotitsyn, and D. N. Levin. "Concept of Construction of Ergatical Interface of Multifunctional Aviation Complex with Integrated Modular Avionics." *Mechatronics, automation, control* 20.1 (2019): 59–64. DOI: 10.17587/mau.20.59-64
10. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektromekhanicheskikh sistem*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.
11. Borisov, V. V., V. V. Kruglov, and A.S. Fedulov. *Nechetkie modeli i seti*. M.: Goryachyaliniya-Telekom, 2007.
12. Skibitskiy, N. V., and N.V. Sevalnev. "Interval models in optimal control problems." *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials* 81.11 (2015): 66–72.
13. Moiseev, N. N. *Elementy teorii optimal'nykh sistem*. M.: «Nauka» Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1975.
14. Terekhin, D. E., and A. F. Tuzovskii. "Sistemy situatsionnogo upravleniya na osnove tekhnologii Semantic Web." *Znaniya - Ontologii - Teorii (ZONT-2015): Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Rossiiskay aakademiya nauk, Sibirskoe otdelenie; Institut matematiki im. S. L. Soboleva*. Vol. 2. Novosibirsk: OOO «Tekhnoreid», 2015. 151–155.
15. Baranov, L. A., E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, and L. M. Chin'. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov*. M.: MIIT, 2011.
16. Rastrigin, L. A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob'ektami*. M.: Sov.radio, 1980.
17. Tyrva, V. O. "Application of mathematical models for correction of discrete signals of management by object of ergatic system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 171–178.
18. Allen-Zhu, Zeyuan, David Simchi-Levi, and Xinshang Wang. "The lingering of gradients: how to reuse gradients over time." *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2018. 1244-1253.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тырва Владимир Оскарович —
 кандидат технических наук, доцент,
 старший научный сотрудник
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: v.tyrva@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tyrva, Vladimir O. —
 PhD, associate professor,
 Senior Researcher
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
v.tyrva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2019 г.
 Received: December 16, 2019.

PERSPECTIVES OF USING THE STATIC ELECTRIC POWER SOURCES ON SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION PLANTS

A. V. Grigoryev^{1,2}, R. R. Zaynullin³, S. M. Malyshev^{2,3}

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation,

² — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

³ — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

It is noted that to date the electric power sources based on heat engines and rotating electrical machines, first of all diesel-generators, have received the most wide spread in the marine fleet. Tightening the environmental requirements and increasing the fuel prices in the recent years condition the necessity and expediency of searching for alternative kinds of electric power sources that can be used as the main ones including on ships with electric propulsion plants. The feasibility of using the static electric power sources for above mentioned purpose is researched in the paper. The types are considered, the principle of operation is described, the advantages, disadvantages and scope are listed for the following types of static electric power sources: accumulator batteries based on a new element base, supercapacitors, solar batteries, fuel cells, direct heat conversion generators. The choice of a source type is determined by the operation modes for which it is intended, and by the power of the supplied electrical consumers. Electric power sources of new generation can be used in buffer mode or in autonomous mode as the main electric power source. The use of static electric power sources in the buffer operation mode can significantly reduce the fuel consumption of electric propulsion plants in the dynamic modes, including on icebreakers and ice-going vessels during moving in ice or on waving. In this case saving is achieved by absorbing the excess energy during braking of an electric propulsion motor and its subsequent release during acceleration. Application in the second operation mode is especially relevant in connection with the tightening the environmental requirements for marine vessels. Switching the main generators off and transition to supplying from static electric power sources can reduce harmful emissions to the atmosphere and the overall level of underwater noise emitted by the vessel, which is important in biological and geophysical researches. The composition and structure of a typical circuit design solution for a ship electric power system built using the static electric power sources of new generation are given in the paper. It is concluded that the introduction of static electric power sources of new generation lets to optimize operating modes and increase the structural flexibility of the electric power installation, reduce the consumption of fuels and lubricants, increase the reliability and service life of drive engines of generating sets, reduce harmful emissions into the atmosphere, and also increase propulsive power in full speed modes.

Keywords: static electric power source, accumulator battery, charge, li-ion accumulator battery, supercapacitor, solar battery, direct heat conversion generator, fuel cell, ship electric power system, electric propulsion plant.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

УДК 629.123:621.31

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СУДАХ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

А. В. Григорьев^{1,2}, Р. Р. Зайнуллин³, С. М. Малышев^{2,3}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что к настоящему времени наибольшее распространение на морском флоте получили источники электроэнергии на базе тепловых двигателей и вращающихся электрических машин, в первую очередь, дизель-генераторы. Ужесточение экологических норм и рост цен на топливо в последние годы обуславливают необходимость и целесообразность поиска альтернативных видов источников электроэнергии, которые можно использовать в качестве основных, в том числе на судах с системами электродвижения. В статье исследована целесообразность применения для указанной цели статических источников. Рассмотрены типы, описан принцип действия, преимущества, недостатки и область применения статических источников электроэнергии нового поколения, таких как аккумуляторные батареи на новой элементной базе, суперконденсаторы, солнечные батареи, топливные элементы, генераторы прямого преобразования теплоты. Выбор типа источника определяется режимами работы, для которых он предназначен, и мощностью питаемых приемников электроэнергии. Статические источники электроэнергии нового поколения могут использоваться в автономном режиме эксплуатации в качестве основного источника электроэнергии или в буферном режиме. Применение статических источников электроэнергии в буферном режиме позволяет существенно снизить расход топлива в динамических режимах работы системы электродвижения, в том числе на ледоколах и судах ледового плавания при ходе во льдах или на волнении. При этом экономия обеспечивается за счет поглощения избытка энергии в процессе торможения гребного электродвигателя и последующего ее выделения в процессе разгона. Применение в автономном режиме особенно актуально в связи с ужесточением экологических требований к морским судам. Отключение главных дизель-генераторов и переход на питание от статических источников электроэнергии позволяет снизить выбросы в атмосферу и снизить общий уровень подводного шума, излучаемого судном, что важно при проведении биологических и геофизических исследований. В статье приведены состав и структура типового схемотехнического решения судовой электроэнергетической системы, построенной с применением статических источников электроэнергии нового поколения. Сделан вывод о том, что внедрение статических источников электроэнергии нового поколения позволит оптимизировать режимы работы и повысить структурную гибкость электроэнергетической установки, снизить расход горюче-смазочных материалов, повысить надежность работы и ресурс приводных двигателей генераторных агрегатов, снизить вредные выбросы в атмосферу, а также повысить пропульсивную мощность в режимах полного хода.

Ключевые слова: статический источник электроэнергии, аккумуляторная батарея, заряд, литий-ионный аккумулятор, суперконденсатор, солнечная батарея, топливный элемент, генератор прямого преобразования теплоты, судовая электроэнергетическая система, система электродвижения.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

Введение (Introduction)

В настоящее время на морском флоте в качестве основных источников электроэнергии наибольшее распространение получили дизель-генераторы (ДГ). Помимо ДГ на транспортных судах большого водоизмещения с системами электродвижения (СЭД), в частности танкерах-газовозах, находят применение газотурбогенераторы (ГТГ) [1]. На судах с ядерными энергетическими установками основными источниками электроэнергии являются паротурбогенераторы (ПТГ) [2].

Помимо источников на базе вращающихся электрических машин на судах устанавливаются также статические источники электроэнергии (СИЭ), в первую очередь, щелочные и кислотные аккумуляторные батареи (АБ). Относительно низкие технико-эксплуатационные характеристики АБ традиционных типов, такие как низкая удельная емкость, низкий ток заряда-разряда, а также ограниченное количество циклов заряда-разряда, ограничивают область их применения аварийным электроснабжением судна и электростартерным запуском тепловых двигателей. Вместе с тем ужесточение экологических норм и рост цен на топливо обуславливают необходимость и целесообразность поиска для судов и морских объектов других видов источников электроэнергии, которые можно использовать в качестве основных, в том числе для питания систем электродвижения (СЭД) [3] и гребных электроприводов в составе комбинированных пропульсивных установок (КПУ) [4]–[6].

Благодаря достижениям силовой преобразовательной техники и появлению новых и перспективных электротехнических материалов с высокими удельными показателями, в последние годы активное развитие и распространение как в промышленности, так и на морском транспорте получают СИЭ нового поколения. Для определения перспектив применения СИЭ нового поколения необходимо выполнить анализ их технических характеристик и разработать основные схемотехнические решения судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) на их базе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

К СИЭ нового поколения относятся:

- аккумуляторные батареи на новой элементной базе;
- суперконденсаторы;
- солнечные батареи;
- топливные элементы;
- генераторы прямого преобразования теплоты.

Среди перспективных аккумуляторных батарей (АБ) на новой элементной базе следует выделить:

- литиевые (Li);
- серебряно-цинковые (Ag-Zn);
- никель-металлгидридный (Ni-MH);
- свинцово-кислотные батареи.

АБ литиевого типа (Li) включают большую группу химических источников в зависимости от применяемых материалов, в том числе литий-ионные (Li-Ion), литий-кобальтовые (Li-Co), литий-полимерные (Li-pol), литий-марганцевые (Li-Mn), литий-железно-фосфатные (LFP, LiFeP), литий-титанатные (Li-Ti), литий-хлорные (Li-Cl), литий-серные (Li-S). Электролит в АБ литиевого типа находится в загущенном или твердом состоянии.

АБ серебряно-цинкового типа (Ag-Zn) позволяют получать большие токи при кратковременных режимах разряда, постоянное до конца разряда напряжение и малую скорость саморазряда. Конструктивно такие батареи представляют собой герметичную емкость с жидким электролитом.

Никель-металлгидридные АБ (Ni-MH) не содержат жидкого электролита.

Свинцово-кислотные батареи представлены двумя типами технологий, позволяющими работать в тяговом режиме: AGM батареи, гелевые (GEL) батареи. Электролит в таких батареях, как правило, находится в загущенном или абсорбированном состоянии. Сравнительные технические характеристики рассматриваемых АБ по конструктивным показателям представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительные технические характеристики АБ
на новой элементной базе по конструктивным показателям**

Тип	Удельная запасаемая энергия, Вт·ч / кг	Плотность запасаемой энергии, Вт·ч / дм ³	Рабочая температура окружающей среды, °С
Li-Ion	До 280	До 350	-20...+40
Ag-Zn	До 150	До 650	-40...+50
Ni-MH	До 70	До 150	-60...+55
Pb	До 60	До 75	-40...+40

Из табл. 1 видно, что наибольшую удельную запасаемую энергию (на единицу массы) имеют АБ литий-ионного типа [7]. Данный тип аккумуляторов позволяет создавать источники электроэнергии с наименьшей массой при равной емкости. Серебряно-цинковые АБ имеют наибольшую плотность запасаемой энергии (на единицу объема), что позволяет создавать источники энергии с наименьшим занимаемым объемом при равной емкости. Никель-металлгидридные и свинцово-кислотные АБ уступают двум ранее указанным типам АБ по всем показателям. Сравнительные технические характеристики литий-ионных и серебряно-цинковых АБ по эксплуатационным показателям приведены в табл. 2.

Характеристики литий-ионных и серебряно-цинковых аккумуляторов по эксплуатационным показателям

Показатель	Тип АБ	
	Li-Ion	Ag-Zn
Ресурс по циклу заряд / разряд	1000 – 7000	100 – 300
Срок службы, лет	5 – 20	3 – 5
Ток заряда, в долях от номинального	0,7 – 1	0,05 – 0,1
Время полного заряда, ч	1 – 2	10 – 20
Ток разряда, в долях от номинального	До 50	До 50
Саморазряд, %, за месяц	1 – 2	5 – 15

Основным недостатком серебряно-цинковых АБ является большое время полного заряда и низкий ресурс по циклам заряда-разряда. Данные АБ в основном применяются в авиационной, ракетно-космической и военной технике, где требуется минимизация занимаемого объема.

Для судов наиболее подходящим типом АБ являются батареи литий-ионного типа (Li-Ion), выпускаемые в виде отдельных элементов, для достижения требуемых показателей по уровню напряжения и электрической емкости собираемые в аккумуляторные группы с последовательно-параллельным соединением. АБ литий-ионного типа допускается устанавливать в любом положении. Пример расположения аккумуляторной группы в шкафу АБ литий-ионного типа для источников бесперебойного питания серии Galaxy фирмы Schneider Electric показан на рис. 1¹.



Рис. 1. Шкаф с АБ литий-ионного типа для источников бесперебойного питания серии Galaxy фирмы Schneider Electric

Суперконденсатор (СК) представляет элемент с двумя электродами, между которыми располагается электролит. Электроды выполнены в виде пластин различной формы, изготовленных из специального материала. Для улучшения электрических параметров, пластины могут дополнительно покрываться пористым материалом. В качестве электролита могут применяться неорганические или органические вещества. СК отличаются от АБ большим сроком службы и существенно более высокими скоростями заряда и разряда, т. е. СК способны поглощать и выделять большое

¹ Сайт фирмы «Schneider Electric» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.se.com/ww/en/product-range/63732-galaxy-vx/> (дата обращения: 24.12.2019).

количество электроэнергии за короткий промежуток времени, поэтому их целесообразно использовать в буферном режиме. Диапазон рабочих температур СК существенно шире, чем аналогичный показатель у АБ.

СК, в отличие от АБ, не могут применяться в качестве основного источника электроэнергии на судне в связи с тем, что они имеют значительно худшие показатели по удельной запасаемой энергии. Для увеличения мощности суперконденсаторные элементы объединяют в модули, модули — в системы [8]. Технические характеристики суперконденсаторных модулей фирмы Skeleton Technologies¹ приведены в табл. 3, суперконденсаторных систем — в табл. 4, внешний вид шкафа с суперконденсаторной системой — на рис. 2.

Таблица 3

**Технические характеристики суперконденсаторных модулей типа SMA102V88F
серии SkelMod фирмы Skeleton Technologies**

Наименование параметра	Значение
Напряжение рабочее, В	102
Напряжение максимальное, В	108
Мощность номинальная, кВт	464,5
Практическая удельная мощность, кВт / кг	16,1
Практическая плотность мощности, кВт / дм ³	15,7
Запасаемая энергия, Вт·ч	127,1
Удельная запасаемая энергия, Вт·ч / кг	4,4
Плотность запасаемой энергии, Вт·ч / дм ³	4,3
Масса, кг	28,8
Объем, дм ³	29,6
Рабочая температура окружающей среды, °С	-40...+65
Расчетный срок службы, циклов	1 000 000
Тип элементов	SCA3200
Количество элементов, шт.	36

Таблица 4

**Технические характеристики суперконденсаторных систем
серии SkelGrid фирмы Skeleton Technologies**

Модель	SkelGrid 1500	SkelGrid 1200	SkelGrid 1050	SkelGrid 520
Мощность максимальная, кВт	1500	1200	1050	520
Ток максимальный, А	5000	2500	1700	1400
Мощность номинальная, кВт	380	220	150	75
Ток номинальный, А	1250	750	500	250
Напряжение номинальное, В	612	612	612	612
КПД при максимальной мощности, %	74,3	81,7	90,6	92,4
КПД при номинальной мощности, %	93,1	95,9	97,2	98,6
Количество модулей в ряду, шт.	6	6	6	6
Общее количество модулей, шт.	6	6	6	6
Количество элементов в ряду, шт.	216	216	216	216
Емкость, Ф	14,8	14,8	14,8	14,8

На основе использования принципа преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию построен другой тип СИЭ нового поколения — солнечные батареи (СБ). СБ выпу-

¹ Сайт фирмы «Skeleton Technologies» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.skeletontech.com/skelgrid-ultracapacitor-system> (дата обращения: 24.12.2019).

скаются виде отдельных солнечных элементов, соединенных в солнечные модули¹. Внешний вид солнечного модуля показан на рис. 3, технические характеристики даны в табл. 5.



Рис. 2. Шкаф с суперконденсаторной системой SkelGrid фирмы Skeleton Technologies



Рис. 3. Солнечный модуль типа FSM фирмы Sunways

Таблица 5

Технические характеристики солнечных модулей фирмы Sunways

Модель	FSM 240M	FSM 330M TP	FSM 400M TP
Мощность номинальная, Вт	240	330	400
Напряжение номинальное, В	24	24	24
Напряжение при пиковой мощности $V_{max P}$, В	26,1	38,13	41,6
Ток при пиковой мощности ($I_{max P}$), А	9,2	9,67	9,62
Напряжение холостого хода (V_0), В	32,1	40,84	49,1
Размеры (Д × Ш × Г), мм	1324 × 992 × 35	1689 × 992 × 35	2015 × 1002 × 40
Рабочая температура окружающей среды, °С	-40...+85	-40...+85	-40...+85
Масса, кг	15	18,7	23
Количество элементов, шт.	72	72	144
КПД солнечного модуля, %	15,7	19	19
КПД солнечного элемента, %	18,1	20,7	20,7

Японская компания Eco Marine Power разработала так называемый *солнечный парус* (EnergySail), использующий энергию солнца и ветра², который конструктивно состоит из СБ и жесткого паруса. Применение *солнечного паруса* позволяет одновременно повысить пропульсивную мощ-

¹ Сайт фирмы «Sunways» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://s-ways.ru/products/solnechnye-moduli-sunways-serii-fsm/?PAGEN_3=2 (дата обращения: 24.12.2019).

² Сайт фирмы Eco Marine Power [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ecomarinepower.com/en/energysail> (дата обращения: 24.12.2019).

ность судна и вырабатывать электроэнергию для питания общесудовых потребителей [9]. Модель транспортного судна, оснащенного *солнечным парусом*, представлена на рис. 4.

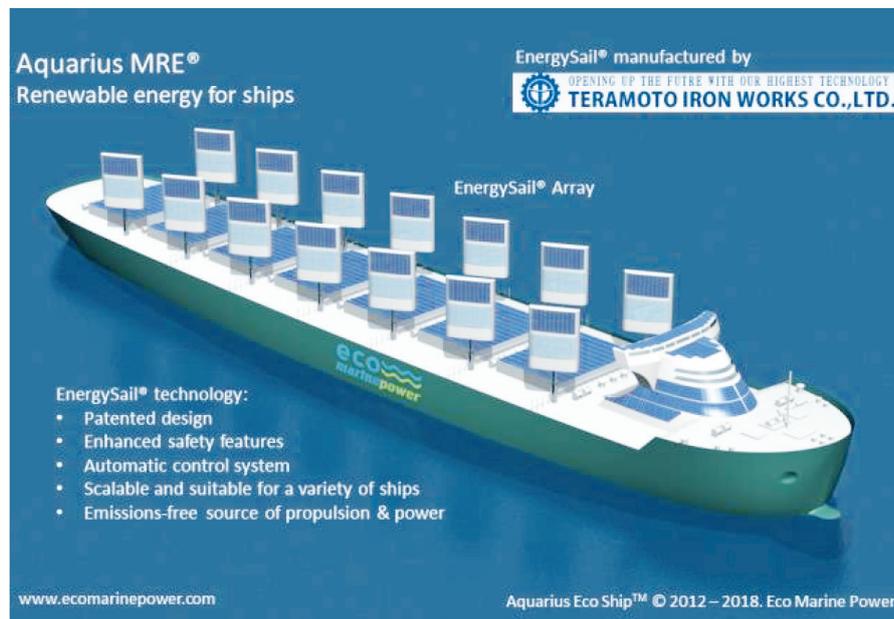


Рис. 4. Модель транспортного судна, оснащенного *солнечным парусом* фирмы Eco Marine Power

К преимуществам моделей, оснащенных системой *солнечного паруса* на морских судах, можно отнести:

- отсутствие вредных выбросов;
- высокую маневренность;
- высокую надежность;
- экономичность (сокращение затрат на топливо);
- простоту обслуживания;
- низкие эксплуатационные затраты.

Недостатком СБ является большая занимаемая площадь и зависимость процесса выработки электроэнергии от факторов окружающей среды.

Принцип действия топливных элементов (ТЭ) основан на преобразовании химической энергии жидкого или газообразного топлива (водород, органические вещества и др.) в электрическую энергию в ходе химической реакции с окислителем [10]. Благодаря этому при работе ТЭ не выделяется большого количества газов, таких как двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4) и окиси азота (NO_x), как в случае сжигания органического топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) или газовых турбинах. Выбросы из топливных элементов представляют собой воду в форме пара и двуокись углерода (при использовании органического топлива).

Принципиальная схема простейшего ТЭ водородно-кислородного типа представлена на рис. 5. ТЭ состоит из корпуса, анода (отрицательного электрода) 1, катода (положительного электрода) 2, протонообменной мембраны 3. ТЭ функционирует следующим образом. Подаваемый внутрь водород под действием катализатора разлагается на положительно заряженные ионы (протоны) водорода H^+ и электроны. Специальная мембрана в силу своих свойств пропускает через себя протоны, но задерживает электроны. Таким образом, скопившиеся на аноде электроны создают избыточный отрицательный заряд, а ионы водорода — положительный заряд на катоде. При соединении анода и катода через проводник потечет постоянный электрический ток, который завершит процесс окисления водорода кислородом. Для увеличения номинальной мощности ТЭ объединяют между собой в модули.

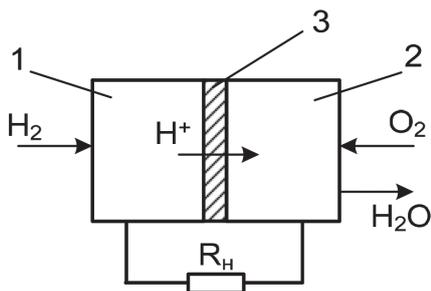


Рис. 5. Принципиальная схема простейшего ТЭ

водородно-кислородного типа:

1 — анод; 2 — катод;

3 — протонообменная мембрана;

R_n — сопротивление нагрузки

ТЭ отличаются от АБ тем, что для выработки электроэнергии в них требуется постоянная подача топлива и окислителя для поддержания химической реакции. Топливные элементы имеют следующие преимущества по сравнению с тепловыми двигателями:

- высокий КПД;
- низкий уровень шума;
- отсутствие вредных выбросов;
- отсутствие подвижных частей;
- возможность выработки тепловой энергии;
- простота технического обслуживания.

Количество вырабатываемой электроэнергии определяется только имеющимися запасами топлива и окислителя и может значительно превышать аналогичный параметр у АБ. Техническое обслуживание топливных элементов является простым и не требует больших затрат.

В последние десятилетия ведется разработка генераторов прямого преобразования тепловой энергии (ГППТ) в электрическую, не имеющих вращающихся частей [11]. Среди них необходимо выделить:

- термоэлектрические (ТЭГ);
- термоэмиссионные (ТЭМГ);
- магнитогидродинамические (МГДГ).

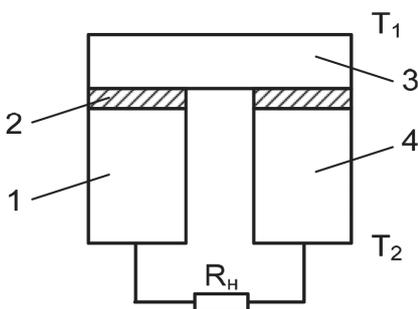


Рис. 6. Принципиальная схема термоэлектрического генератора:

1, 4 — термоэлектроды с электронной и дырочной проводимостью;

2 — коммутационный подслой;

3 — коммутационное соединение;

R_n — сопротивление нагрузки;

T_1 и T_2 — температура

Принцип действия ТЭГ основан на термоэлектрическом эффекте, который заключается в возникновении разности потенциалов (термоЭДС) на концах термоэлектродов, имеющих разную температуру (T_1 и T_2). При замыкании термоэлемента на внешнюю цепь в ней под действием термоЭДС возникает постоянный ток. Принципиальная схема ТЭГ приведена на рис. 6. Значение термоЭДС одного термоэлемента составляет менее 1 В, поэтому для практического использования их соединяют в системы последовательно-параллельно.

Принцип действия ТЭМГ основан на использовании явления термоэлектронной эмиссии твердых тел, возникающей при их нагреве до высокой температуры.

МГДГ представляют собой устройства, в которых для получения электроэнергии электропроводящее рабочее тело (жидкий металл, плазма и т. д.), перемещается поперечно магнитному полю.

Наиболее широкое практическое применение среди ранее указанных СИЭ нового поколения на современных судах получили АБ на новой элементной базе и СК. Переход на новую элементную базу в АБ позволяет существенно расширить область их применения. АБ на новой элементной базе могут использоваться в двух режимах эксплуатации:

- *буферном*, в котором статический источник работает параллельно с основными, поглощая избыток электроэнергии (при торможении системы электродвижения) и восполняя недостаток электроэнергии (при перегрузке системы электродвижения);
- *автономном*, в котором статический источник функционирует в качестве основного, вырабатывая электроэнергию (при отключенных дизель-генераторах или совместно с ними).

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Применение СИЭ в буферном режиме позволяет существенно снизить расход топлива в динамических режимах эксплуатации СЭД, например, на ледоколах и судах ледового плавания при ходе во льдах или на волнении. Применение СИЭ в автономном режиме особенно актуально в связи с ужесточением экологических требований к морским судам. В частности, в ряде акваторий полностью запрещены как сбросы веществ в воду, так и выбросы в атмосферу, т. е. полностью запрещено применение тепловых двигателей. Единственным возможным вариантом обеспечения хода судна в таких условиях является применение СИЭ. Кроме того, отключение главных дизель-генераторов и переход на питание от СИЭ позволяют снизить общий уровень излучаемого судном подводного шума, что необходимо для обеспечения точности измерений при проведении морских геофизических и биологических исследований с помощью погружных измерительных приборов.

В настоящее время аккумуляторными батареями, работающими в качестве основного источника электроэнергии, в том числе для питания СЭД, оснащаются рабочие катера проекта WB23MT-H, строящиеся на АО «Онежский судостроительно-судоремонтный завод». Планируются к строительству пассажирские суда малого и среднего водоизмещения с основными источниками электроэнергии с АБ на новой элементной базе для эксплуатации в Черном море и акватории Финского залива. Типовое схмотехническое решение судовой единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) на базе СИЭ с системой электродвижения (СЭД) с распределением электроэнергии на постоянном токе приведено на рис. 7.

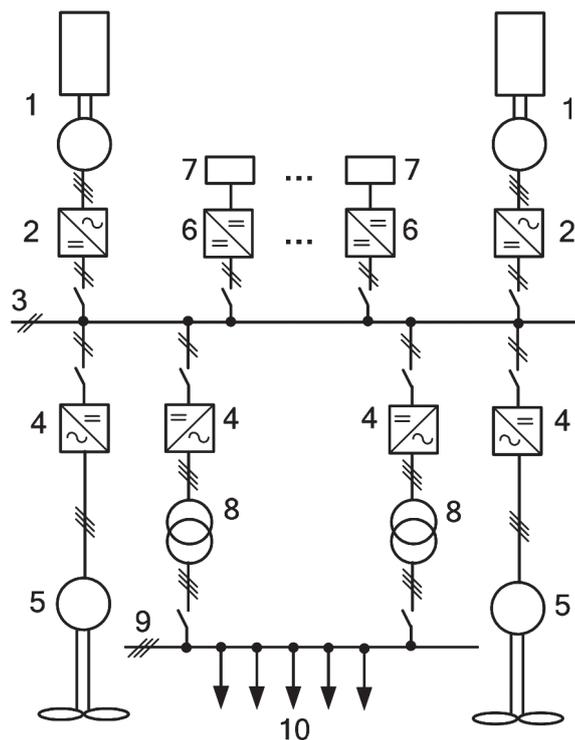


Рис. 7. Типовая структура ЕЭЭС с распределением на постоянном токе на базе статических источников электроэнергии и системы электродвижения:
1 — дизель-генератор; 2 — АВ; 3 — ГРЩ постоянного тока; 4 — АИ; 5 — ГЭД;
6 — регулятор постоянного напряжения; 7 — СИЭ; 8 — трансформатор;
9 — ГРЩ переменного тока; 10 — общесудовые потребители

В качестве основных источников электроэнергии применяются дизель-генераторы (ДГ), подключаемые к главному распределительному щиту (ГРЩ) постоянного тока через полупроводниковые устройства. В качестве таких устройств наиболее целесообразным является применение

активных выпрямителей (АВ). Помимо ДГ в составе судовой электростанции могут применяться различные СИЭ. В целях согласования уровней напряжения, контроля, защиты обеспечения специфических режимов эксплуатации и других функций подключение к ГРЩ постоянного тока осуществляется через соответствующие полупроводниковые регуляторы постоянного напряжения. Для управления, контроля и защиты гребных электродвигателей (ГЭД) предусматриваются автономные инверторы (АИ). Для питания общесудовых потребителей используются АИ, работающие в режиме стабилизации выходного напряжения и частоты. В целях согласования уровня напряжения и обеспечения гальванической развязки между АИ и ГРЩ переменного тока устанавливаются согласующие трансформаторы. Распределение на постоянном токе позволяет реализовать режимы параллельной работы СИЭ различных типов между собой и с ДГ.

Необходимо отметить, что действующие Правила Российского морского регистра судоходства (РС)¹ не в полной мере отражают требования к СИЭ нового поколения. В связи с этим целесообразно выполнить корректировку Правил РС в части требований к СИЭ с учетом современного состояния науки и техники, в том числе к следующим характеристикам и процессам:

- конструктивному исполнению;
- стойкости к климатическим воздействиям;
- размещению на судне;
- режимам заряда и разряда;
- надежности и контролепригодности [12];
- безопасности;
- испытаниям и предъявлениям.

Выводы (Summary)

1. Применение статических источников электроэнергии нового поколения на судах с электродвижением позволяет существенно повысить технико-эксплуатационные характеристики судовых электроэнергетических установок за счет уменьшения количества и номинальной мощности генераторных агрегатов и снижения расхода горюче-смазочных материалов. Дополнительно снижаются выбросы в атмосферу и улучшаются вибро-шумовые характеристики судна.

2. Наиболее перспективными среди статических источников электроэнергии нового поколения являются аккумуляторные батареи на новой элементной базе и суперконденсаторы, что обусловлено их высокими удельными энергетическими показателями, высокой надежностью и удобством эксплуатации.

3. В настоящее время в «Правилах РС» отсутствуют требования к освоенным в производстве типам статических источников электроэнергии нового поколения, обеспечивающим возможность питания СЭД и общесудовых приемников в ходовых режимах эксплуатации судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Электроэнергетические установки танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Судостроение. — 2010. — № 3 (790). — С. 39–42.
2. Кудинович И. В. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения / И. В. Кудинович, А. Ж. Сутеева, В. Г. Хорошев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 4 (386). — С. 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.
3. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10 — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.

¹ Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019.

5. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // *Energy Procedia*. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
6. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma [и др.] // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
7. Груздев А. И. Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой ёмкости // *Электрохимическая энергетика*. — 2011. — Т. 11. — № 3. — С. 128–135.
8. Силютин Д. Е. Варианты конструктивных исполнений суперконденсаторов / Д. Е. Силютин, [и др.] // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2012. — Т. 8. — № 7-2. — С. 96–100.
9. Кононенко С. В. Применение солнечных батарей на объектах морской инфраструктуры / С. В. Кононенко [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 3. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106.
10. Беляев П. В. Исследования характеристик топливного элемента с протонообменной мембраной при изменении концентрации водорода / П. В. Беляев, Д. А. Подберезкин, Р. А. Эм // *Омский научный вестник*. — 2017. — № 6 (156). — С. 58–61.
11. Баранов А. П. Судовые системы электродвижения с генераторами прямого преобразования теплоты (режимы работы и их моделирование) / А. П. Баранов. — Л.: Судостроение, 1991. — 232 с.
12. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 584 с.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Electric generating plants of gas carriers.” *Sudostroenie* 3(790) (2010): 39–42.
2. Kudinovich, Igor V., Adelina Zh. Suteeva, and Vitaly G. Khoroshev. “Nuclear power plants for advanced civil marine technology.” *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106
3. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov and Arsenii M. Makarov. “Prospects for the development of electromotive systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 35 (2013): 337–340.
5. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. “Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats.” *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
6. Geertsma, R. D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. “Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments.” *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
7. Gruzdev, A. I. “Opyt sozdaniya batarei na baze litii-ionnykh akkumulyatorov bol’shoi emkosti.” *Elektrokhimicheskaya energetika* 11.3 (2011): 128–135.
8. Silyutin, D. E., M. Yu. Chayka, V.S. Gorshkov, and A. I. Dunaev. “Options design supercapacitors.” *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 8.7-2 (2012): 96–100.
9. Kononenko, S. V, S. V. Golovko, M.A. Nadeev, and V.A. Pavlenko. “Use of solar panels on facilities of marine infrastructure.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2018): 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-101-106.
10. Belyaev, P. V., D. A. Podberезкин, and R. A. Em. “Studies of the impact of changes in hydrogen concentration on the output characteristics of the fuel cell proton exchange membrane.” *Omskii nauchnyi vestnik* 6(156) (2017): 58–61.
11. Baranov, A. P. *Sudovye sistemy ehlektrovizheniya s generatorami pryamogo preobrazovaniya teploty (rezhimy raboty i ikh modelirovanie)*. L.: Sudostroenie, 1991.
12. Kuznetsov, S. E. *Osnovy tekhnicheskoi ehkspluatatsii sudovogo ehlektrooborudovaniya i sredstv avtomatizatsii*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Зайнуллин Руслан Ринатович —
начальник отдела
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Малышев Сергей Михайлович — ассистент,
начальник отдела
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178
e-mail: malyshevsergey@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev, Andrey V. —
PhD, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Zaynullin, Ruslan R. —
Head of Department
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Ferskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Malyshev, Sergei M. — Assistant,
Head of Department
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Ferskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: malyshevsergey@list.ru

*Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.
Received: January 9, 2020.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 12. № 1

2020 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.02.20. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26,75. Тираж 500 экз. Заказ № 100/20

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7