

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 11. № 5

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — Т. 11. — № 5. — 174 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.





**29 августа 2019 г. после продолжительной болезни скончался
профессор кафедры судостроения
Вячеслав Васильевич Веселков (29.11.1948 – 29.08.2019)**

Вячеслав Васильевич начал свою трудовую деятельность в 1966 г. на Балтийском судостроительном заводе по рабочей специальности «Плазовый разметчик», получив за три года работы 4-й разряд. Параллельно учился на вечернем факультете Ленинградского кораблестроительного института. В 1969 г. по путевке комсомола был направлен в ПТУ № 30 для организации подготовки плазовых разметчиков. С 1969 по 1972 год участвовал в разработке учебных программ по направлению подготовки плазовых разметчиков, выпустив две группы специалистов. По окончании института в 1972 г. вернулся на Балтийский завод, где работал в конструкторском бюро в должности конструктора 1-й категории.

В 1973 г. был приглашен на работу в ЦНИИ технологии судостроения на должность инженера в лабораторию автоматизации технологической подготовки производства. В 1974 г. поступил в заочную аспирантуру. Тема диссертации лишь частично была связана с направлением основной работы. Тем не менее в 1976 г. В. В. Веселков был назначен старшим научным сотрудником, а затем в 1978 г., еще до защиты диссертации, — начальником сектора. В ноябре 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию в Диссертационном совете при Ленинградском кораблестроительном институте и с 1980 г. был назначен начальником отраслевой лаборатории, возглавив работы по созданию отраслевой автоматизированной системы технологической подготовки производства — «АСТПП верфь». За вклад в создание этой отраслевой автоматизированной системы в 1985 г. Вячеславу Васильевичу Веселкову была присуждена Премия Совета Министров СССР.

С 1982 г. В. В. Веселков начал активную преподавательскую деятельность в Ленинградском кораблестроительном институте на кафедре вычислительной техники и в Институте повышения квалификации руководящих работников судостроения, читая курсы «Автоматизация подготовки производства в судостроении» и «Автоматизация судостроительного производства».

В 1987 г. поступил без отрыва от производства в докторантуру ЦНИИ технологии судостроения. Работу над диссертацией закончил в 1989 г., защитив ее в Диссертационном совете Ленинградского института водного транспорта. В 1991 г. решением Ученого совета Ленинградского кораблестроительного института В. В. Веселков был представлен к званию профессора и в 1992 г. решением Комитета по высшей школе Миннауки это звание ему было присвоено. В качестве доктора наук

с 1990 г. Вячеслав Васильевич являлся членом докторских диссертационных советов Ленинградского кораблестроительного института, Санкт-Петербургского университета водных коммуникаций и ЦНИИ технологии судостроения. Постоянно участвовал в качестве приглашенного лица в защите диссертаций в Николаевском кораблестроительном институте.

В 1998 г. был рекомендован для работы в Экспертный совет Высшей аттестационной комиссии РФ «по проблемам флота и кораблестроения» в качестве эксперта. В 1999 г. перешел на постоянную работу в Санкт-Петербургский университет водных коммуникаций, вначале на должность профессора, а затем был избран заведующим кафедрой судостроения, параллельно продолжая работать по совместительству в ЦНИИ технологии судостроения.

С 2000 г. В. В. Веселков был назначен на должность заместителя Диссертационного совета Санкт-Петербургского университета водных коммуникаций, в 2004–2009 гг. являлся его Председателем, а с 2010 г. был назначен на должность заместителя председателя Диссертационного совета. За время педагогической деятельности Вячеславом Васильевичем было подготовлено 11 кандидатов наук.

Вячеслав Васильевич Веселков являлся научным редактором научно-производственного сборника «Вестник технологии судостроения» и членом Редакционного совета научно-производственного журнала «Судостроение».

Коллектив Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова выражают искренние соболезнования родным и близким Вячеслава Васильевича.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ	803
<i>Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Боревич А. З.</i> Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров	803
<i>Изотов О. А.</i> Организация погрузо-разгрузочных работ новых единиц укрупнения сборных грузов.....	813
<i>Пелевин А. Е.</i> Гарантированная оценка зоны допустимого сближения судов в море.....	823
<i>Искандеров Ю. М., Гаскаров В. Д., Дорошенко В. И.</i> Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном.....	831
<i>Ивакин Я. А., Потапычев С. Н., Ивакин Р. Я.</i> Модель поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления.....	842
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	856
<i>Андреева Е. В., Исаулова К. Я., Тезиков А. Л.</i> Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути	856
<i>Холощев А. В., Подпорин С. А.</i> Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период.....	867
<i>Фирсов Ю. Г.</i> Проблемы отображения рельефа дна в российских батиметрических картах Северного Ледовитого океана.....	880
СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ	893
<i>Черныш А. А., Яковлев С. Н.</i> Экспериментальное определение температуры нагрева полиуретанового амортизатора при динамическом нагружении	893
<i>Кузнецов Р. В., Ольховик Е. О.</i> Исследование физических процессов формирования адгезионной прочности биметаллического подшипника для судового машиностроения.....	902
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА	910
<i>Леонов В. Е.</i> Исследования по определению области минимизации операционного коэффициента энергетической эффективности судна	910
<i>Попов С. А., Нечесов В. Е., Попова С. В.</i> Разработка конструктивно–интегрированного электропривода домкрата для грузовых операций на береговых объектах.....	920
<i>Попов И. П.</i> Дифференцированное определение сопротивлений рассеяния трансформатора.....	932
<i>Пивоварова Н. А., Дорохов А. Ф., Велес Парра Р.</i> Технология магнитной обработки топлив для дизелей рыбопромысловых и транспортных судов	941

Том 11. № 5

2019

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырклов

д.т.н., проф.

NyrklovAP@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

заместитель руководителя 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.
В. В. Веселков, 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.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....951

Григорьев А. В., Малышев С. М., Зайнуллин Р. Р. Судовые
комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав,
классификация.....951

Ширяев Э. В., Улиский Н. А. Повышение точности и быстродействия
контура тока путем увеличения коэффициента передачи разомкнутого
контура959

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 803

Kuznetsov A. L., Semenov A. D., Borevich A. Z. Analysis of optimization container stacking strategies 803

Izotov O. A. Organization of loading and unloading operations of new consolidated cargo units 813

Pelevin A. E. Guaranteed estimation of ships' domains 823

Iskanderov Y. M., Gaskarov V. D., Doroshenko V. I. Multi-agent model of the integrated ship control system 831

Ivakin Y. A., Potapychev S. N., Ivakin R. Y. A model for supporting the scheduling of geospatial processes of the water transport based on the situational management 842

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 856

Andreeva E. V., Esaulova K. Y., Tezikov A. L. Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area 856

Kholoptsev A. V., Podporin S. A. Prospects for unescorted navigation of Arc7 ice-class vessels in the region of the New Siberian Islands during the winter period 867

Firsov Yu. G. Seabed relief mapping problems on the Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean 880

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 893

Chernych A. A., Yakovlev S. N. Experimental determination of the heating temperature of the polyurethane shock absorber under dynamic loading 893

Kuznetsov R. V., Olkhovik E. O. Studying the physical processes of forming the adhesive strength of bimetallic bearing for marine engineering 902

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 910

Leonov V. Ye. Research to determine the minimization area of the operational coefficient of the energy efficiency of the ship 910

Popov S. A., Nechesov V. E., Popova S. V. Development of a structurally integrated electric drive of jack for cargo operations at onshore facilities 920

Popov I. P. Differentiated determination of scattering resistance of transformer 932

Pivovarova N. A., Dorokhov A. F., Velez Parra R. Technology of fuels magnetic processing for diesel engines of fishing and transport vessels 941

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
Deputy 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. Vatın,
doctor of technical Sciences
V. V. Veselkov,
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. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 951

Grigoryev A. V., Malyshev S. M., Zaynullin R. R. Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification..... 951
Shiryaev E. V., Ulisskiy N. A. Improving the accuracy and performance of the current loop by increasing the open loop transfer coefficient..... 959

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812

ANALYSIS OF OPTIMIZATION CONTAINER STACKING STRATEGIES

A. L. Kuznetsov¹, A. D. Semenov², A. Z. Borevich³

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

³ — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

One of the main tasks of operational management of modern container terminal is effective utilization of existing technological resources. The search of possible variants of terminal's activity optimization requires constant analysis of transport process technology and development of technical and technological approaches to increase the effectiveness of resources utilization. One of the possible solutions which are provided by terminals' operational systems is application of different strategies of container stack organization and container selectivity. At the same time the complicated character of input and output container flow makes the effectiveness of these strategies doubtful. It is noted in the paper that the way of container service is different from traditional ones – FIFO and FILO. As far as output container flow is randomly distributed the way of container service can be considered as First In/Random Out. The different strategies which are applied in practice are also considered in the paper and their influence on the productivity of handling equipment is analyzed. The results of these strategies simulation modelling are represented. The results prove that no strategy can provide productivity with theoretical selectivity; any strategy provides slower intensity of operations. At the same time, it is proved that the only optimization strategy which increases the productivity of handling equipment is the way of terminal activity organization where containers can be selected from the stack not on requirement sequence, but in order of its position in a stack.

Keywords: container stack, stacking strategies, container selectivity, handling equipment, simulation modelling, stack organization, optimization, seaport, dry port, operation productivity.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

УДК 656.615

АНАЛИЗ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ СКЛАДИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ

А. Л. Кузнецов¹, А. Д. Семенов², А. З. Борович³

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

³ — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследован один из ключевых вопросов эксплуатации современных контейнерных терминалов, таковой как эффективность использования имеющихся технологических ресурсов. Отмечается, что поиск возможных вариантов оптимизации работы терминала требует постоянного анализа применяемой технологии транспортного процесса и выработки технических и технологических решений, позволяющих увеличить эффективность использования ресурсов. Одним из таких решений, предоставляемых современными терминальными операционными системами, является применение оптимизирующих стратегий

организации штабеля и выборки контейнеров из него. В то же время сложный характер поступления и убытия контейнеров с терминала ставит под сомнение эффективность предлагаемых стратегий, поскольку дисциплина обслуживания контейнерного грузопотока не соответствует общепринятым в логистике *First In/First Out* и *First In/Last Out*: последовательность убытия контейнеров носит случайный характер, в связи с чем дисциплина обработки контейнеров на терминале может быть описана как *First In/Random Out*. В работе также рассмотрены оптимизирующие работу терминала стратегии, анализируется их влияние на количество движений подъемно-транспортного оборудования и производительность операций. Приводятся данные об эффективности стратегий, полученные с помощью имитационного моделирования работы перегрузочного оборудования в штабеле. На основании полученных в исследовании данных доказано, что ни одна из возможных стратегий не может обеспечить уровень производительности операций с теоретической селективностью. Вместе с тем приводятся доказательства того, что единственной оптимизирующей стратегией является такая организация работы терминала, при которой выборка контейнеров осуществляется не в порядке поступления заявок на вывоз, а по трудоемкости выборки их из штабеля.

Ключевые слова: контейнерный штабель, стратегии складирования, селективность контейнеров, перегрузочное оборудование, имитационное моделирование, организация штабеля, оптимизация, морской порт, сухой порт, производительность операций.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Борович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

Введение (Introduction)

Понятие очередей и стеков широко распространено в различных областях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, используемых для изучения процессов обработки данных, событий, грузов и др. [1]–[3]. Если произвольно выделенный объект абстрактной природы получает «заявку» на выполнение некоторой свойственной ему операции, но не в состоянии выполнить ее немедленно, то эта заявка откладывается до появления возможности ее выполнения. Следующая заявка, поступившая объекту, ставится в очередь за предыдущей и т. д. При появлении возможности выполнения операции обслуживается заявка, поступившая раньше всех, т. е. пришедшая первой. Совокупность ожидающих обслуживания заявок, организованная по принципу «первым пришел — первым ушел», называется *очередью*. Такой принцип, или «дисциплина» обслуживания заявок в очереди, носит название FIFO (от англ. First In/First Out) [4]. Классическим примером очереди являются автомобили, заезжающие по выделенным полосам через ворота терминала и «физически» обслуживаемые по принципу «первым пришел — первым ушел».

Другим возможным принципом обслуживания заявок, которые не могут быть выполнены немедленно, является дисциплина FILO (от англ. First In/Last Out). В данном случае вновь прибывшая заявка становится как бы «верхней в стопке», и при появлении возможности выполняется первая. Совокупность ожидающих обслуживания заявок, организованная по принципу «первым пришел — последним ушел», называется *стеком*. Складирование контейнеров на площадке хранения терминала один над другим является примером стека: первым может быть выбран контейнер, который прибыл последним.

Основными функциями контейнерного терминала как логистического объекта являются: прием контейнеров, хранение их в течение определенного времени и выдача на смежный транспорт. Немедленное выполнение заявки на прием контейнера и его выдачу, т. е. известный и желаемый «прямой вариант» обработки заявки на операцию, в подавляющем большинстве случаев, оказывается невозможным, поскольку контейнеры, представляющие собой единичные «материальные» заявки на выполнение операций терминала, образуют совокупность ожидающих обслуживания заявок, или контейнерный штабель.

Два рассмотренных ранее фундаментальных способа организации выбора ожидающих обслуживания заявок: FIFO и FILO, являются универсальными для многих научных областей. В при-

кладных сферах к ним могут добавляться более специальные способы организации, например, известный в логистике *принцип FEFO*, когда товары с минимальным остаточным сроком годности отгружаются в первую очередь (First Expire, First Out).

На контейнерном терминале, в большинстве случаев, действует еще один специальный принцип, так называемый *FIRO* (First In / Random Out), когда поступившие на терминал контейнеры выбираются для вывоза в случайном для терминала порядке. В то же время в большинстве случаев «физическая» организация любой специальной дисциплины обслуживания сводится к базовым схемам FIFO и FILO: это либо классическая очередь со входом для прибывающих и выходом для убывающих заявок, либо классический стек, в котором вновь прибывшая заявка «проталкивает» вниз все предыдущие, занимая место на входе для выбора при появлении возможности обработки. Выборка из середины очереди или стека произвольной заявки возможна лишь за счет повторения нескольких классических операций по схеме FIFO или FILO, выполняемых до тех пор, пока на выходе не появится нужная. При этом заявки, высвобождаемые в ходе выборки заданной, не считаются выполненными и должны помещаться в ту же группу ожидающих обслуживания заявок. В случае стека для этого требуется наличие как минимум еще одного стека, в случае очереди необходимо организовать еще одну очередь или «заикнуть» ее, помещая выходные задачи на вход.

Поскольку терминал, на который контейнеры поступают в случайном порядке, неизвестном и неконтролируемом оператором терминала, выбираются к исполнению также случайно, процедура их обработки требует детального изучения дисциплины обслуживания *FIRO*, а также методов, применяемых на терминалах для снижения влияния данной «дисциплины».

Методы и материалы (Methods and Materials)

Контейнеры прибывают на терминал в виде некоторой случайной последовательности: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$. Поскольку вывоз по прямому варианту через терминал не выполняется, поступающие контейнеры образуют совокупность ожидающих вывоза заявок. Покидают терминал контейнеры в виде другой случайной последовательности: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$, которая не совпадет ни с входной: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$, ни с обратной последовательностью: $\alpha_i, \alpha_{i-1}, \dots, \alpha_1$. Как следствие, к операциям обработки терминала не могут быть в чистом виде применены ни дисциплина FIFO, ни дисциплина FILO.

Вывоз с терминала очередного контейнера β_j требует его выборки из совокупности ожидающих вывоза заявок. Для экономии места на терминале контейнеры складывают один над другим, образуя классический стек: последний помещенный в него контейнер выбирается первым [5]. Если контейнеры складываются в один ярус, то стек имеет «глубину», равную единице — помещенный в него контейнер выбирается за одну операцию, называемую «движением». Если контейнеры складываются один над другим в штабель с высотой H ярусов, то «глубина стека» составляет H . Если из такого стека необходимо выбрать верхний контейнер, то потребуется одно движение, если нужный контейнер второй сверху — два движения. Нижний контейнер требует для выборки из стека H движений. Отсюда в среднем при полностью случайном характере выборки контейнеров трудоемкость выборки контейнера из стека, измеренная в количестве движений, составляет величину $N = \frac{H+1}{2}$ [6].

Разместить все контейнеры, находящиеся на терминале в ожидании вывоза, в единый стек невозможно ввиду технических и операционных ограничений: верхние контейнеры будут оказывать разрушающую нагрузку на нижние, выборка контейнеров будет требовать слишком много дополнительных движений. Поэтому контейнеры хранят в виде множества ограниченных по высоте отдельных стеков, образующих штабели склада открытого хранения. Если в штабелях будет выполнено условие монотонного убывания индексов последовательности вывоза хранимых контейнеров с высотой яруса, т. е. контейнер β_l с меньшим индексом будет находиться над контейнерами с большим индексом: β_k ($l < k$), то выборка каждого контейнера будет выполняться за одно движение. Если эти соотношения не выполняются, и в стеке наблюдается инверсия

индексов последовательности вывоза, то возникает необходимость обеспечения доступа к нужному контейнеру. В этом случае из стека последовательно выбираются все контейнеры, находящиеся выше него. Эти «выбранные, но невыполненные» заявки из стека, как отмечалось ранее, должны быть помещены в другие стеки. Желательно, чтобы при этих перемещениях сохранялось условие монотонности индексов вывоза, но обеспечить это практически невозможно: как отмечалось ранее, последовательность $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ является случайной, ее будущая часть формируется после момента принятия данного решения. Как следствие, наиболее рациональным решением является перемещение блокирующих доступ контейнеров в стеки с минимальным заполнением.

С учетом ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что в указанных условиях никакой оптимизации, имеющей целью уменьшение числа движений, необходимых для обработки проходящего через терминал грузопотока, предложить невозможно. Трудоемкость выборки контейнера определяется размером единичного стека, размещение в котором не позволяет определить последовательность вывоза контейнеров с терминала. Оптимизационные методы и алгоритмы, используемые в практике работы контейнерных терминалов, безусловно, существуют, но они направлены не на уменьшение трудоемкости выборки контейнеров, а на эффективность обработки транспортных средств. В свою очередь, дополнительные движения повышают требования к количеству подъемно-транспортного оборудования. Как правило, при организации структуры штабеля контейнерного терминала и управления операциями в нем используются те или иные методики, в большинстве случаев имеющие характер *эвристик*. Они предписываются к выполнению оперативным управленческим персоналом, а иногда даже встраиваются в программное обеспечение терминальной операционной системы (ТОС), приобретая тем самым черты не подлежащей обсуждению оптимизационной стратегии [7]–[9].

В то же время ТОС — это совокупность программных средств, реализующих придуманные человеком методы и стратегии укладки ящиков в прямоугольный штабель. Рассмотрим наиболее часто используемые решения, которые обычно относят к средствам оптимизации: престакинг, постстакинг, распределение секций по видам транспорта, распределение по клиентам.

Престакинг. Престакингом называется предварительное размещение контейнеров, составляющих отгружаемую партию в отдельном штабеле (стеке), обычно находящемся поблизости от места обработки транспортного средства. Теоретически точное знание плана погрузки дает возможность сформировать в стеке структуру штабеля, позволяющую погружать каждый контейнер из него на транспортное средство за одно движение. Таким образом, процедура погрузки транспортного средства является в этом случае оптимальной, при которой каждое движение является производительным, что и обеспечивает обработку транспортного средства в течение минимального времени.

С учетом введенных терминов и обозначений престакинг предполагает, что в том или ином виде формируется часть выходной последовательности: $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$, которая соответствует плану погрузки их на транспортное средство вместимостью $K > 0$: судно, баржа, контейнерный поезд, секция поезда, автопоезд. Очевидно, что формирование очереди в прямом порядке: $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$ или стека в инверсном порядке: $\beta_{k+K}, \dots, \beta_{k+1}, \beta_k$ позволит выполнить погрузку транспортного средства без дополнительных операций: каждый контейнер будет требовать только одного перемещения, которое в данном случае будет являться производительным.

В то же время формирование последовательности выдачи на транспортное средство $\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_{k+K}$ или $\beta_{k+K}, \dots, \beta_{k+1}, \beta_k$ остается таким же случайным процессом, поэтому для него справедливы все рассуждения, приведенные ранее. Иными словами, формирование предварительного множества контейнеров, ожидающих погрузки на транспортное средство, в среднем потребует того же количества движений, что и прямая погрузка на него. При этом перемещение контейнеров из предварительного множества (очереди или стека) потребует еще K дополнительных движений, откуда следует, что технологически престакинг не снижает, а, наоборот, увеличивает количество движений, необходимых для вывоза контейнерного потока с терминала. В этом случае оптимизируется не общее количество движений по перемещению контейнера на терминале, а время погрузки транспортного средства. В течение этого времени должно быть выполнено лишь K произво-

дительных движений, которые были охарактеризованы ранее как дополнительные, а остальные могут выполняться в более удобное с операционной точки зрения время работы. Действительно, технология престакинга является эффективным средством минимизации времени погрузки транспортных средств на терминале, но является крайне чувствительной к изменениям планов погрузки, поскольку дополнительные непроизводительные движения в промежуточном стеке могут увеличить общее их число до пределов, которые сделают эффективность незначительной.

Постстакинг. Симметричным решением является постстакинг, когда контейнеры выгружаются с транспортного средства в расположенный поблизости промежуточный стек и позже развозятся в адресные позиции основного штабеля. При этом в основном снижаются требования к количеству средств горизонтальной транспортировки и синхронизации операций выгрузки, поскольку непосредственно размещение контейнеров в штабель постстакинга не требует селективности. Дальнейшая выборка контейнеров из этого вновь сформированного промежуточного штабеля требует как минимум одного дополнительного движения на каждый контейнер.

Распределение секций по видам транспорта. Данная стратегия может рассматриваться как «слабый вариант престакинга». Она предполагает, что часть контейнеров из вновь прибывшей партии сразу помещается в отдельный штабель, расположенный поблизости к путям, обслуживающим тот вид транспорта, на котором контейнер покинет терминал. Считается, что эта стратегия наиболее эффективна тогда, когда интервалы поступления морских судов близки к интервалам прибытия железнодорожных составов. Однако и в этом случае макет поезда (функциональный аналог каргоплана судна) обычно становится известен после формирования штабеля, исключая необходимость перемещения контейнеров. При этом место проведения дополнительной работы по перестановке контейнеров (в произвольном стеке или в специально выделенном) с точки зрения трудоемкости непринципиально.

Распределение по клиентам. Если состав клиентов однороден, то никакой разницы в том, организованы ли штабели по клиентам или нет, для операционного планирования терминала нет. Возможно, хранение контейнеров одних цветов выглядит более привлекательным с эстетической точки зрения и удобным для управления контейнерами со стороны самих клиентов, имеющих обзоримый и компактный сегменты штабеля. В общем случае это не дает никакой операционной выгоды оператору контейнерного терминала, вызывая при этом потенциальную неэффективность использования складского пространства и рост общего транспортного расстояния.

Наиболее эффективным средством частичной (локальной) оптимизации является предельный случай, когда выдача контейнеров, входящих в суточное задание, осуществляется не в порядке поступления за ними транспортных средств клиента, а в порядке, определяемом минимальной трудоемкостью самой выборки. Иными словами, первым из штабеля на прибывшее транспортное средство выдается контейнер суточного задания, который находится ближе всего к поверхности штабеля, т. е. обладает максимальной селективностью. Его выборка в общем случае может изменить структуру штабеля, заблокировав ранее доступные контейнеры суточного задания. Поиск следующего «кандидата на выдачу» должен осуществляться каждый раз после обслуживания очередного транспортного средства. Очевидно, что такой гипотетический и идеализированный порядок выборки контейнеров является оптимальным с точки зрения структуры штабеля, т. е. «терминального оператора». Любая иная стратегия будет лишь приближаться к этому идеализированному варианту, который тем самым может являться оценкой «сверху» реальных операционных стратегий, претендующих на оптимизационные свойства.

Рассмотрим вновь единичную выборку контейнеров из штабеля. Пусть имеется E контейнеров, которые хранятся на площади в w слотов, образуя штабель высотой $H = \frac{E}{w}$ ярусов. Если произвольный контейнер находится в верхнем ярусе, то его выборка требует одного движения, если во втором верхнем ярусе — два движения (перемещение блокирующего и выборка целевого), контейнер в нижнем ярусе выбирается за H движений. Если вероятность нахождения целевого контейнера в каждой ячейке штабеля одинакова, то вероятность любого числа движений при вы-

борке тоже одинакова и составляет величину $p = \frac{1}{H}$. Математическое ожидание числа движений в этом случае составит $M[N] = 1p + 2p + \dots + Hp = \frac{1}{H}(1 + 2 + \dots + H) = \frac{1}{H} \frac{(H+1)H}{2} = \frac{H+1}{2}$.

Данная зависимость была ранее получена проще, с помощью рассуждений о том, что верхний контейнер выбирается за одно движение, нижний — за H движений, откуда в среднем (при равной вероятности) было получено $\frac{H+1}{2}$ движений. Тем не менее указанный подход необходим для пояснения решения следующей задачи — оценки эффективности множественной выборки контейнеров из штабеля. Пусть, по-прежнему, имеется E контейнеров, хранимых на площади в w слотов, образующих штабель высотой $H = \frac{E}{w}$ ярусов. Пусть имеется $K < w$ контейнеров, из которых следует выбрать любой, располагающийся выше остальных в штабеле. Выборка будет осуществляться за одно движение тогда, когда в верхнем ярусе будет находиться хотя бы один целевой контейнер из списка K . Два движения потребуются тогда, когда в верхнем ярусе не будет ни одного контейнера из списка K , а во втором — хотя бы один контейнер из списка K . Три движения потребуются тогда, когда в верхнем и следующем ярусе не останется ни одного контейнера из списка K , а в третьем останется хотя бы один контейнер из списка K . Максимальное количество движений H потребуются в случае, когда все K контейнеров будут располагаться в нижнем ярусе. Необходимо определить значение математического ожидания числа движений и распределения числа движений по выборке контейнеров. Данную задачу можно решить с помощью методов классической теории вероятности. Для этого рассмотрим штабель размером $E = wH$ (рис. 1).

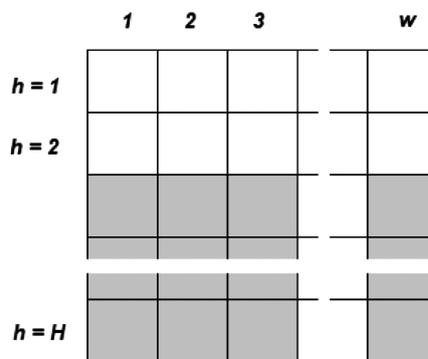


Рис. 1. Параметры штабеля контейнеров

Найдем вероятность события A_h , состоящего в том, что в верхних h ярусах штабеля шириной w не содержится ни одного контейнера из целевого списка размером K . Осуществиться это событие может C_{E-K}^{wh} различными способами. Всего существует C_E^{wh} способов заполнить верхний сегмент, откуда вероятность отсутствия в верхних h ярусах штабеля целевых контейнеров составляет $P(A_h) = \frac{C_{E-K}^{wh}}{C_E^{wh}}$ [10]. Вероятность противоположного события $\overline{A_h}$, т. е. наличия в верхних h ярусах штабеля хотя бы одного целевого контейнера, составляет $P_h = P(\overline{A_h}) = 1 - P(A_h) = 1 - \frac{C_{E-K}^{wh}}{C_E^{wh}}$.

Тогда вероятность P_1 имеется вероятность нахождения в верхнем ярусе $h = 1$ хотя бы одного целевого контейнера $p_1 = P_1$, вероятность P_2 — вероятность нахождения в ярусах $h = 1$ и $h = 2$ хотя бы одного целевого контейнера, откуда вероятность нахождения во втором сверху ярусе $h = 2$ хотя бы одного целевого контейнера составляет $p_2 = P_2 - P_1$.

Результаты (Results)

В общем случае вероятность нахождения в ярусе h целевого контейнера определяется рекурсивным выражением $p_h = P_h - P_{h-1}$. Совокупность событий $p_h, h = 1, H$ составляет искомую вероятность найти первый верхний контейнер из списка K в отсчитываемом сверху ярусе h . В таблице представлен пример расчета вероятностей p_h для штабеля размером $E = 150$ и шириной w при различных величинах целевого списка K .

Вероятность нахождения целевого контейнера в ярусе h

Ярус h	Количество целевых контейнеров K				
	1	2	3	4	5
1	0,17	0,31	0,42	0,52	0,60
2	0,17	0,25	0,28	0,28	0,27
3	0,17	0,19	0,17	0,13	0,10
4	0,17	0,14	0,09	0,05	0,03
5	0,17	0,08	0,03	0,01	0,00
6	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00
$M[N]$	3,5	2,52	2,03	1,75	1,56

Математическое ожидание числа движений для каждого варианта значения K , определяемое выражением $M[N] = 1p + 2p + \dots + Hp$, приведено в нижней строчке таблицы. На рис. 2 те же данные представлены в виде семейства графиков.

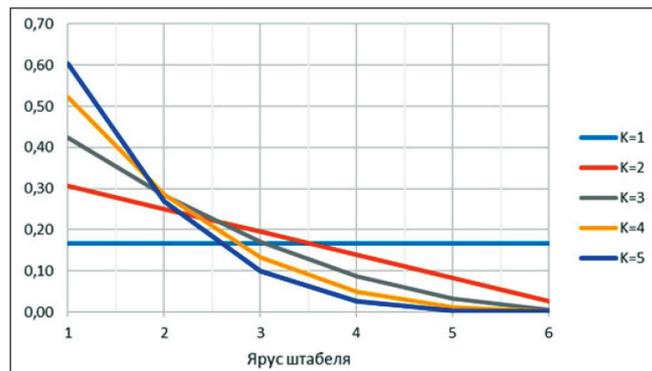


Рис. 2. Вероятность нахождения целевого контейнера в ярусе h

При $K = 1$ выполняется единичная выборка, совпадающая с полученными ранее результатами. С ростом числа целевых контейнеров требуемое число движений значительно уменьшается, что показано на рис. 3.

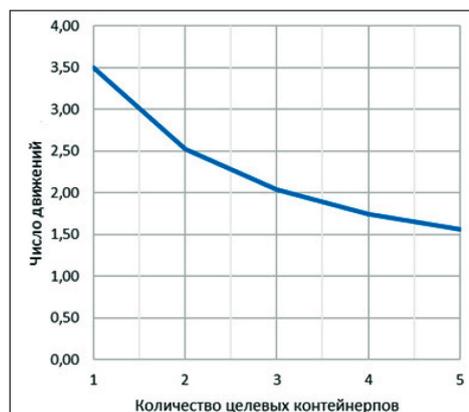


Рис. 3. Снижение числа движений с размером целевого списка

Полученные результаты показывают, что множественная выборка действительно является единственной эффективной операционной стратегией для организации работы в штабеле контейнерного терминала: если с клиентом удастся договориться о подобной практике, имеющей название «множественные визиты», то трудоемкость выборки из штабеля может быть значительно уменьшена. Как правило, подобная возможность имеется при работе с терминалами-сателлитами морского порта, крупными сетевыми компаниями, производителями автомобилей и др.

Обсуждение (Discussion)

Более полную картину позволило получить имитационное моделирование работы терминала по описанным ранее стратегиям. На рис. 4 представлены результаты моделирования двух крайних стратегий выборки: с оптимизацией (выборка самых доступных контейнеров суточного задания) и без оптимизации (выборка контейнеров по требованию). В значения селективности внесено одно движение для каждого контейнера, связанное с его постановкой в штабель.

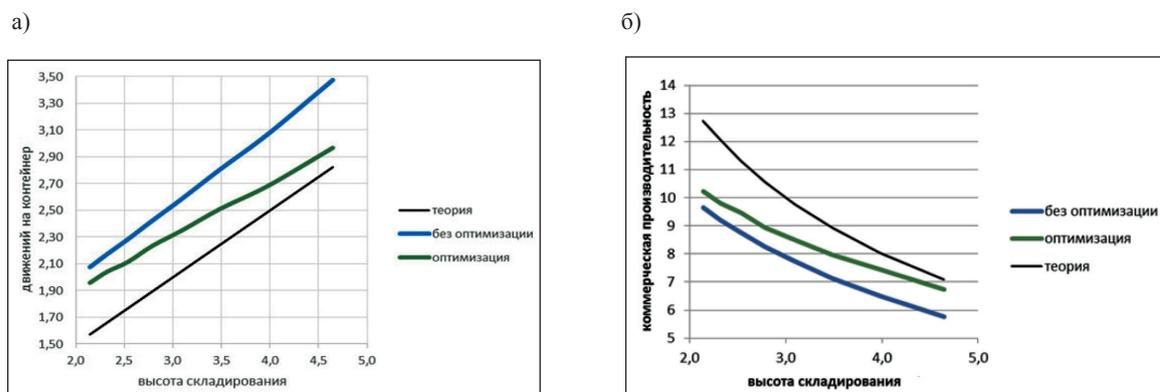


Рис. 4. Сравнение количества движений (а) и коммерческой производительности (б) при различных стратегиях

Полученные результаты заставляют сделать вывод о том, что любые заложенные в ТОС методы оптимизации не следует переоценивать: они могут лишь приблизить селективность к комбинаторной. С учетом ранее изложенного можно предположить, что в различных условиях работы, а также с применением различных операционных стратегий коммерческая производительность оборудования будет находиться в пределах зоны, представленной на рис. 5.

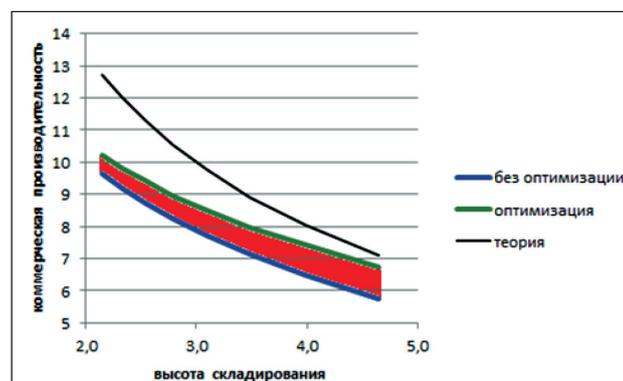


Рис. 5. Зона коммерческой производительности оборудования

Применив полученные данные для грубой оценки оборудования, необходимого для работы контейнерного терминала, получим следующие результаты. Если, например, в течение каждых трех суток на терминал приходит судно вместимостью 1500 контейнеров (около 3 тыс. TEU), выгружая и загружая $1500 + 1500 = 3000$ контейнеров, то годовой грузопоток терминала состав-

ляет 365 тыс. контейнеров (700 тыс. TEU). Следовательно, через склад терминала проходит в среднем 1000 контейнеров в сутки, или $1000/20 = 50$ контейнеров в час. Если на терминале используются складские перегружатели с эксплуатационной производительностью 20 движений в час, а высота складирования составляет четыре яруса, то коммерческая производительность каждой машины составит около четырех движений в час. Соответственно для обслуживания этого грузопотока потребуется 13 складских перегружателей. Таким образом, полученные с помощью имитационного моделирования значения, использованные для расчетно-аналитических оценок, совпадают с практическими данными статистики контейнерных терминалов.

Выводы (Summary)

1. Контейнеры, прибывающие на терминал и убывающие с него, не подвержены ни одной из известных в логистике дисциплин обслуживания очередей (FIFO, FILO, FELO).
2. Последовательность убытия контейнеров с терминала имеет случайный характер, в связи с чем дисциплина обработки контейнеров может быть названа First In/Random Out (FIRO).
3. Оптимизационные стратегии организации выборки из штабеля, предлагаемые современными терминальными операционными системами, позволяют сократить только время обработки транспортных средств, увеличивая нагрузку и, как следствие, потребность в технологическом оборудовании терминала.
4. Единственной возможной оптимизирующей стратегией, сохраняющей необходимое количество ресурсов, является такая организация работы с клиентом, при которой выдача контейнеров, входящих в суточное задание, осуществляется не в порядке поступления за ними транспортных средств клиента, а в порядке, определяемом минимальной трудоемкостью самой выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shortle J. F.* Fundamentals of queueing theory / J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, C. M. Harris. — 5th Edition. — John Wiley & Sons, 2018. — 576 p. DOI: 10.1002/9781119453765
2. *Christopher M.* Logistics & supply chain management / M. Christopher. — 5th Edition. — Pearson UK, 2016. — 328 p.
3. Handbook of big data technologies / A.Y. Zomaya, S. Sakr, eds. — Berlin: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-49340-4
4. *Suchánek P.* Modelling of the Logistic Supplier-Consumer Behavior / P. Suchánek, R. Bucki // KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-319-59394-4_21
5. *Кузнецов А. Л.* Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
6. *Кириченко А. В.* Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко, [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 310 с.
7. *Cordeau J. F.* Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal / J. F. Cordeau, P. Legato, R. M. Mazza, R. Trunfio // Computers & Operations Research. — 2015. — Vol. 53. — Pp. 81–95. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.001.
8. *Euchi J.* Ant Colony Optimization for Solving the Container Stacking Problem: Case of Le Havre (France) Seaport Terminal / J. Euchi, R. Moussi, F. Ndiaye, A. Yassine // International Journal of Applied Logistics (IJAL). — 2016. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 81–101. DOI: 10.4018/IJAL.2016070104.
9. *Ji M.* Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals / M. Ji, W. Guo, H. Zhu, Y. Yang // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2015. — Vol. 80. — Pp. 1–19. DOI:10.1016/j.tre.2015.05.004.
10. *Gnedenko B. V.* Theory of probability / B. V. Gnedenko. — Routledge, 2018. — 520 p. DOI: 10.1201/9780203718964.

REFERENCES

1. Shortle, John F., James M. Thompson, Donald Gross, and Carl M. Harris. *Fundamentals of queueing theory*. 5th Edition. John Wiley & Sons, 2018. DOI: 10.1002/9781119453765
2. Christopher, M. *Logistics & supply chain management*. 5th Edition. Pearson UK, 2016.
3. Zomaya, Albert Y., and Sherif Sakr, eds. *Handbook of big data technologies*. Berlin: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-49340-4
4. Suchánek, Petr, and Robert Bucki. “Modelling of the Logistic Supplier-Consumer Behavior.” *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*. Springer, Cham, 2017. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-319-59394-4_21
5. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. “The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429
6. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznetsov, A. A. Davydenko, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Morskaya konteiner'naya transportno-tehnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
7. Cordeau, Jean-François, Pasquale Legato, Rina Mary Mazza, and Roberto Trunfio. “Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal.” *Computers & Operations Research* 53 (2015): 81–95. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.001
8. Euch, Jalel, Riadh Moussi, Fatma Ndiaye, and Adnan Yassine. “Ant Colony Optimization for Solving the Container Stacking Problem: Case of Le Havre (France) Seaport Terminal.” *International Journal of Applied Logistics (IJAL)* 6.2 (2016): 81–101. DOI: 10.4018/IJAL.2016070104.
9. Ji, Mingjun, Wenwen Guo, Huiling Zhu, and Yongzhi Yang. “Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 80 (2015): 1–19. DOI:10.1016/j.tre.2015.05.004.
10. Gnedenko, B. V. *Theory of probability*. Routledge, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Семенов Антон Денисович — диспетчер ООО «Логистический парк «Янино» Российская Федерация, Ленинградская область, Всеволожский район, д. Янино-1, Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1 e-mail: asemyonov054@gmail.com

Боревич Альберт Зенонович — кандидат физико-математических наук, доцент Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, Российская федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Semenov, Anton D. — Dispatcher Yanino Logistics Park LLC Vsevolozhsky District, Yanino-1 village, Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1, Leningrad Region, Russian Federation e-mail: asemyonov054@gmail.com

Borevich, Albert Z. — PhD, associate professor Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2019 г.
Received: September 19, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-813-822

ORGANIZATION OF LOADING AND UNLOADING OPERATIONS OF NEW CONSOLIDATED CARGO UNITS

O. A. Izotov

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

The contradiction of the organization of cargoes transportation in containers, when the increase in cargo flow required to achieve the effect of large-scale economy automatically entails the expansion of hinterland, and the lengthening of the distance of goods transportation on the overland leg requires additional costs to attract more containers to transportation. The possibility of using new means of goods consolidation for stacking in containers during the organization of sea transportation of cargoes has been evaluated. The expansion of the technological system of cargo handling and transportation by creating a complementary subsystem that will be connected with the main container system of consolidation and distribution of cargo flows will require an assessment of the possibilities of ultimate consumer container cargo flows for organizing transshipment operations with the proposed means of consolidation directly on the areas of cargo owners. The options of processing new consolidation units of cargoes in the zones of peripheral hinterland, in the absence of specialized handling equipment for containers transshipment are considered. The sequence of operations and the technology of transshipment of new means for packages consolidation are proposed, the advantages of their implementation in container transportation of goods are evaluated. The estimation of efficiency of use of the scheme of freights warehousing established at the cargo terminal has been carried out; the prospects for its use at introducing new means of freights consolidation are revealed. On the basis of comparative assessment of application of various technologies of loading and unloading operations, the block diagram of mathematical model of optimizing the options for overload of combined consignments in tare-piece freights and transport modules is presented. The parameters affecting the calculation of requirements of transportation of groupage cargo in the territory of the terminal are considered and the possibility of their storage using various options for cargoes consolidating is estimated.

Keywords: bulk container, groupage cargo, technologies of loading and unloading, cargo terminal, means of consolidation of cargo places.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Organization of loading and unloading operations of new consolidated cargo units." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 813–822. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-813-822.

УДК 656.073.2

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ НОВЫХ ЕДИНИЦ УКРУПНЕНИЯ СБОРНЫХ ГРУЗОВ

О. А. Изотов

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

Выявлено противоречие организации перевозок сборных грузов в контейнерах, когда требуемое для достижения эффекта масштабной экономии увеличение грузопотока автоматически влечет за собой расширение хинтерленда, а удлинение расстояния перевозки грузов на сухопутном плече требует дополнительных затрат на привлечение к перевозкам все большего количества контейнеров. Произведена оценка возможности применения новых средств укрупнения грузов для укладки в контейнерах при организации морской перевозки сборных грузов. Расширение технологической системы грузообработки и грузоперевозки за счет создания некоторой комплементарной подсистемы, которая будет сочетаться с основной контейнерной системой консолидации и распределения грузопотоков, потребует оценки возможностей конечных потребительских контейнерных грузопотоков на предмет организации перегрузочных операций с предлагаемыми средствами укрупнения непосредственно на площадях грузовладельцев. Рассмотрены

варианты организации обработки новых единиц укрупнения сборных грузов в зонах периферийного хинтерланда в условиях отсутствия специализированного перегрузочного оборудования перегрузки контейнеров. Предложена последовательность операций и технология перегрузки новых средств укрупнения грузовых мест, дана оценка преимуществ их внедрения в контейнерные перевозки грузов. Выполнена оценка эффективности использования сложившейся на грузовом терминале схемы складирования грузов, выявлены перспективы ее использования при внедрении новых средств укрупнения грузовых мест. На базе сравнительной оценки применения различных технологий погрузочно-разгрузочных работ приведена структурная схема математической модели оптимизации вариантов перегрузки сборных партий грузов в тарно-штучных грузах и транспортных модулях. Рассмотрены параметры, оказывающие влияние на расчет потребности в средствах транспортировки сборных партий груза по территории терминала, и выполнена оценка возможности их складирования при использовании различных вариантов укрупнения сборных грузов.

Ключевые слова: контейнерные технологии, сборные грузы, технологии погрузки-выгрузки, грузовой терминал, средства укрупнения грузовых мест.

Для цитирования:

Изотов О. А. Организация погрузо-разгрузочных работ новых единиц укрупнения сборных грузов / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 813–822. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-813-822.

Введение (Introduction)

Рост объема контейнерных перевозок, построение все более сложных маршрутов внутриконтинентальной доставки грузов через хинтерланд, повышение требований к эффективности системы доставки грузов в контейнерах требуют все большего количества контейнеров как средств укрупнения сборных грузовых мест. При организации перевозки грузов зачастую приходится сталкиваться с тем, что необходимое для достижения эффекта масштабной экономии увеличение грузопотока автоматически влечет за собой расширение хинтерланда, а удлинение расстояния перевозки грузов на «сухопутном плече» требует дополнительных затрат на привлечение к перевозкам большего количества контейнеров [1], [2]. Одновременно рост объемов перевозки грузов в контейнерах вызывает пропорциональный рост объемов генеральных грузов, помещаемых в универсальные контейнеры.

Проблема низкой производительности погрузочно-разгрузочных работ, с которой сталкивались до контейнеризации все морские порты, постепенно возникла в крупных сухопутных центрах грузораспределения. Кроме высокой трудоемкости данного вида деятельности, низкая интенсивность этих работ еще более увеличивает цикл оборота контейнеров от порта до порта через хинтерленд [3]–[5]. Решением этой задачи при отправке сборных партий грузов может быть внедрение новых средств укрупнения (рис. 1), при которых грузовладелец имеет возможность освобождения линейного контейнера на этапе его перегрузки непосредственно на терминале [6], [7]. Такой модуль может также обеспечивать все преимущества самого контейнера, т. е. герметичность хранения, свободное перемещение на видах транспорта и перегрузку обычными механизмами терминалов, а также недоступность к грузу [8].

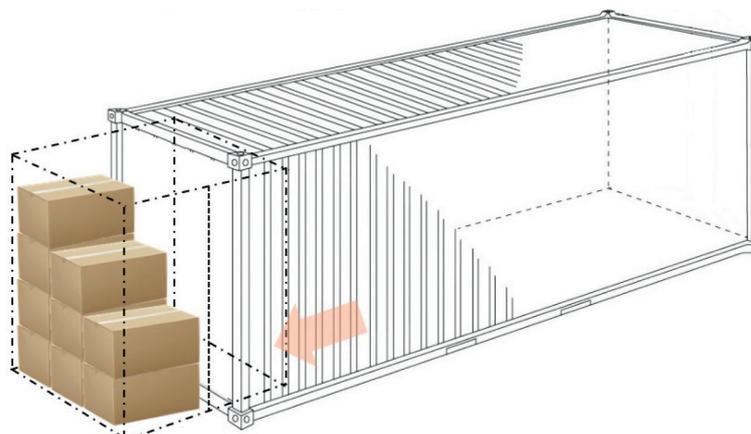


Рис. 1. Модуль как новое средство укрупнения сборных грузов

Методы и материалы (Methods and Materials)

Технология транспортировки новых модулей остается традиционной и сводится к их перевозке в линейном контейнере от пункта консолидации грузопотока до пункта его распределения. Предлагаемая технология перегрузки включает приведенную далее последовательность операций (рис. 2):

- доставку модулей на площадку экспедитора;
- загрузку модулей сборными грузами грузоотправителя и доставка их на терминал консолидации грузопотоков (распределительный центр, сухой или морской порт, контейнерный терминал);
- загрузку модулей в линейный контейнер;
- интермодальную перевозку;
- выгрузку модулей из линейного контейнера на склад терминала назначения для последующей отправки грузополучателю или сразу на смежный вид транспорта при перегрузке по прямому варианту;

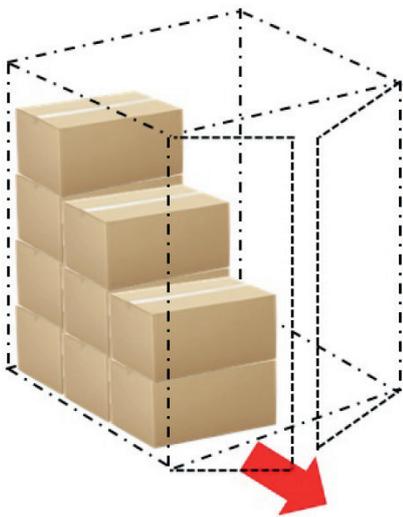


Рис. 2. Схема выгрузки грузов из модуля

- выгрузку сборных грузов из модуля на площадке грузополучателя;
- возврат модуля на площадку экспедитора (в данном случае наиболее предпочтительной является разборная конструкция модуля, так как это способствует экономии при доставке порожней тары).

Данная технология обладает следующими преимуществами:

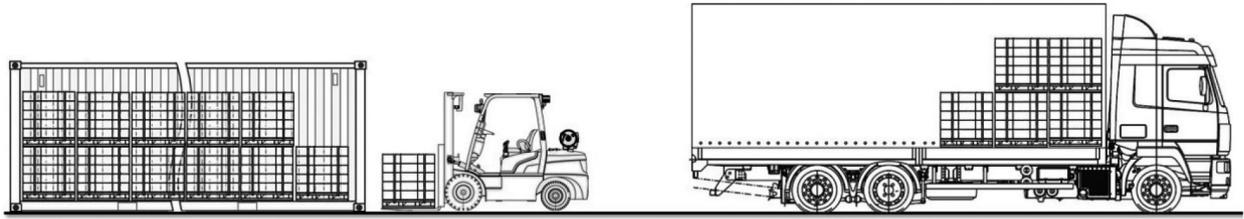
- возможность использования существующей инфраструктуры контейнерных терминалов (нет необходимости смены погрузочно-разгрузочной механизации и переоборудования складских площадей);
- сокращение сроков оборота и тем самым количества задействованных под перевозку сборных грузов контейнеров;
- снижение трудоемкости перегрузочных операций со сборными грузами на контейнерных терминалах (морских и сухих портах).

В то же время применение новых средств укрупнения сборных грузов (модулей) приведет к изменению состава привлекаемых подъемно-транспортных машин и изменению технологии перегрузочных операций на этапах передачи грузов с одного вида транспорта на другой. Кроме того, необходимо выполнить оценку эффективности использования существующей на грузовом терминале схемы складирования грузов и выявить перспективы ее использования при иных вариантах организации грузовых мест.

Анализ изменений, связанных с внедрением новой технологии. Традиционная схема перегрузки сборных грузов предусматривает как привлечение ручного труда (в случае неукрупнения грузовых мест), так и малой механизации типа погрузчиков достаточной грузоподъемности (при укрупнении тарно-штучных грузов на поддонах или в виде иных грузовых мест) — рис. 3, а [9].

Если исходить из современной механовооруженности контейнерных терминалов, то к перегрузке моделей (два модуля на 20'D контейнер) массой до 10 т могут быть привлечены практически всегда имеющиеся большегрузные вилочные погрузчики (рис. 3, б). При отсутствии большегрузных погрузчиков и в целях снижения нагрузки на пол контейнера может быть применена затарочно-растарочная машина, объединяющая преимущества интеллектуальных грузозахватных приспособлений типа затарочной и ратарочной машин [10], навешиваемых на вилы фронтального погрузчика и позволяющих перемещать в контейнере грузы в 2–3 раза большей массы, чем грузоподъемность погрузчика (рис. 4).

а)



б)

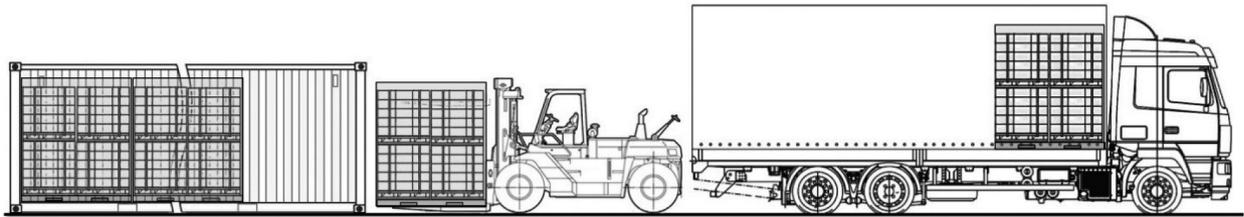


Рис. 3. Схемы перегрузки: а — тарно-штучных грузов; б — модулей

а)



б)

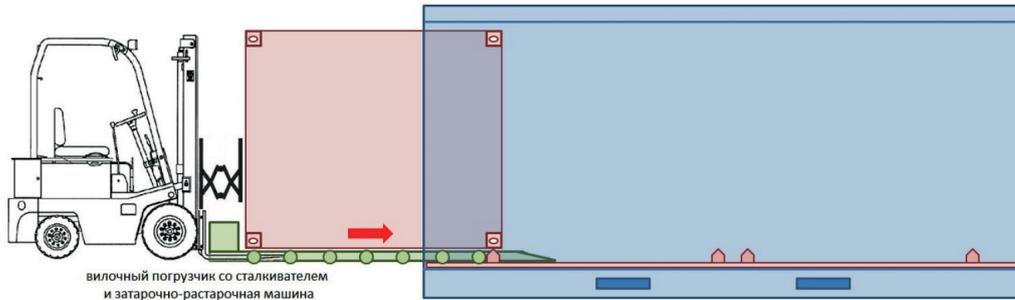


Рис. 4. Погрузочно-разгрузочное оборудование:
 а — затарочная машина ROLLIN-15; б — растарочная машина ROLLOUT-8

В этом случае предлагается следующая технология грузообработки. При погрузке установленный на затарочной машине модуль устанавливается над вкладышем в контейнер, после

чего он сталкивается с платформы машины. Стальная полоска с конусными головками (вкладыш) располагается вдоль бортов на полу контейнера и служит для крепления модуля в контейнере (рис. 5, а). При выгрузке растарочная машина заводится под модуль, что обеспечивает его подъем над вкладышем с конусными головками, дистанционно поднимает упор, после чего модуль извлекается из контейнера (рис. 5, б). Для освобождения грузозахватных приспособлений от перегружаемого модуля погрузчик может быть оборудован сталкивателем.

а)



б)

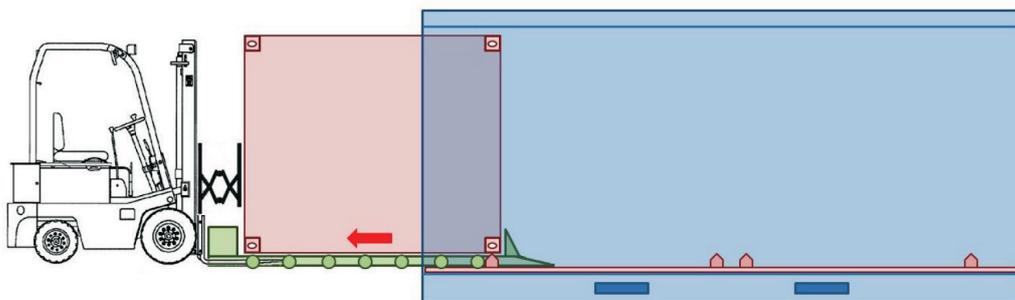


Рис. 5. Затарочно-растарочная машина на роликоопорах:
 а — крепление модуля в контейнере; б — извлечение модуля из контейнера

Нижние фитинги модуля целесообразно приподнять на толщину вкладыша, что обеспечит посадку модуля на пол контейнера всей плоскостью дна в целях распределения нагрузки (рис. 6).

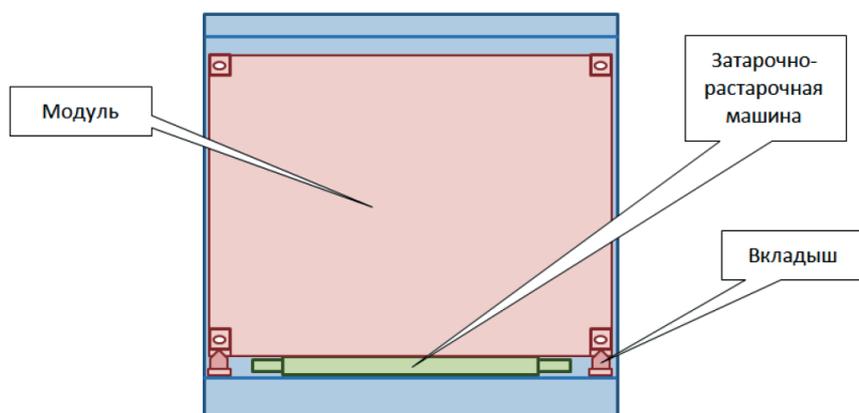


Рис. 6. Вкладыш (вид контейнера с торца)

Таким образом, использование принципиально новых средств перегрузки для перемещения модулей не потребуется.

Обсуждение (Discussion)

Выполним сравнение технологий погрузочно-разгрузочных операций по традиционным эксплуатационным показателям — затратам времени на перегрузку грузов из контейнера, включая внутритерминальное перемещение в автофургон или склад ($t_{\text{выгр}}$), трудоемкость в машино-ч (T_p) — табл. 1, потребную площадь для складирования сборных грузов при различных вариантах укрупнения грузовых единиц ($S_{\text{скл}}$).

Таблица 1

Расчет трудоемкости перегрузки сборных грузов при различных вариантах укрупнения грузовых

Показатели	Количество обрабатываемых контейнеров					
	5	10	15	20	25	30
Перегружено ТШГ, ед.	110	220	330	440	550	660
Перегрузка ТШГ, машино-ч	5,5	11	16,5	22	27,5	33
Перегружено модулей, ед.	10	20	30	40	50	60
Перегрузка модулей, машино-ч	2,5	5	7,5	10	12,5	15
Экономия, машино-часы	3	6	9	12	15	18

Как видно из рис. 7, применение модулей позволяет в 2 раза сократить время обработки контейнеров по сравнению с перегрузкой тарно-штучных грузов¹.

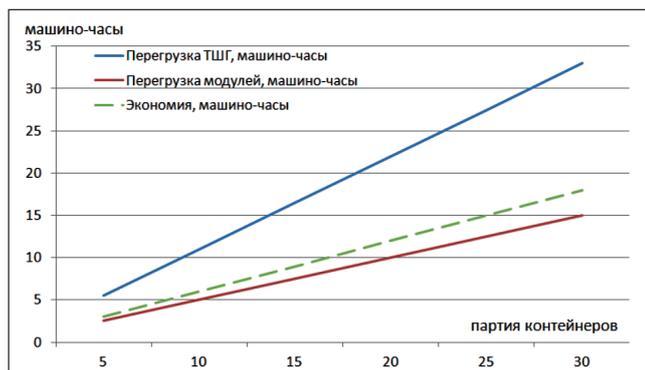


Рис. 7. Сравнение затрат времени выгрузки контейнеров при использовании различных вариантов укрупнения грузовых мест

Оставим за рамками исследования выгрузку сборных грузов в конечном пункте распределения, так как технология и оборудование для выгрузки ТШГ из контейнеров, модулей и автомашин одинаковые (рис. 8). Контейнер при этом, как правило, остается на прицепе для возврата на терминал, а модуль, после освобождения от грузов, может быть сгружен с автомобиля, разобран и после укрупнения с другими модулями отгружен на площадку предоставившего его экспедитора.

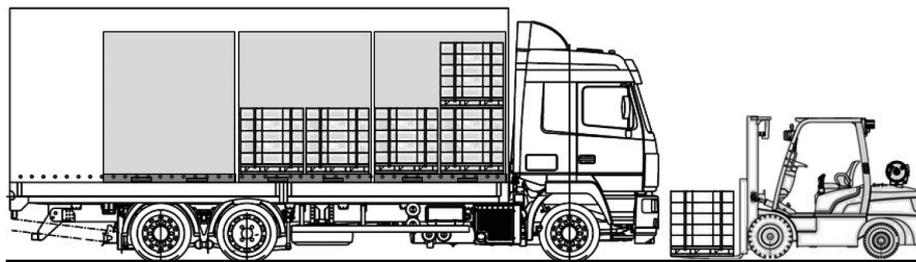


Рис. 8. Схема перегрузки ТШГ в конечном пункте распределения

¹ В расчетах приняты следующие ограничения: время, необходимое для перегрузки единицы ТШГ — 3 мин, модуля — 15 мин.

Потребная площадь для складирования тарно-штучных грузов учитывает площадь УГМ, ярусность укладки на хранение и ширину проездов между рядами грузов (табл. 2).

Таблица 2

**Расчет потребности складских площадей
при различных вариантах укрупнения сборных грузов**

Показатели	Открытая площадка		Крытый склад	
	20'D контейнер	Модуль	ШТГ в штабеле	ШТГ в стеллажах
Площадь, м ²	13,88	4,95	0,96	0,96
Загрузка, т	21,80	10,90	1,00	1,00
Ярусность хранения	3	3	4	5
Нагрузка на площадь склада, т/м ²	4,71	6,61	4,17	5,21
Потребность площади на 1 т груза, м ² /т	0,21	0,15	0,24	0,19
Коэффициент использования площади склада	0,50	0,50	0,60	0,83
Площадь потребная для складирования 1000 т, м ²	424,4	302,6	400,0	231,3

Примечания: 1. В расчетах принята средняя ярусность (4–5 ярусов) хранения ТШГ в штабеле. 2. Ярусность контейнера см. в СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования и РД 31.41.11–82. Инструкция по типовым способам и приемам погрузочно-разгрузочных работ при складировании грузов. 3. Данные для 20'D контейнера см. в СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования (п. 6.2.4). 4. Данные для ШТГ в штабеле см. в РД 31.41.11–82. Инструкция по типовым способам и приемам погрузочно-разгрузочных работ при складировании грузов, п. 2.1.3.

Результаты (Results)

Из выполненных расчетов следует, что использование модулей, так же, как и стеллажей в крытых складах, могут привести к экономии складских площадей (рис. 9). При этом следует отметить, что хранение модулей со сборными грузами на открытых площадках снизит загрузку крытых складов с ТШГ. Разборная модель модуля позволит сократить складские площади и для хранения порожней тары^{1, 2, 3}.

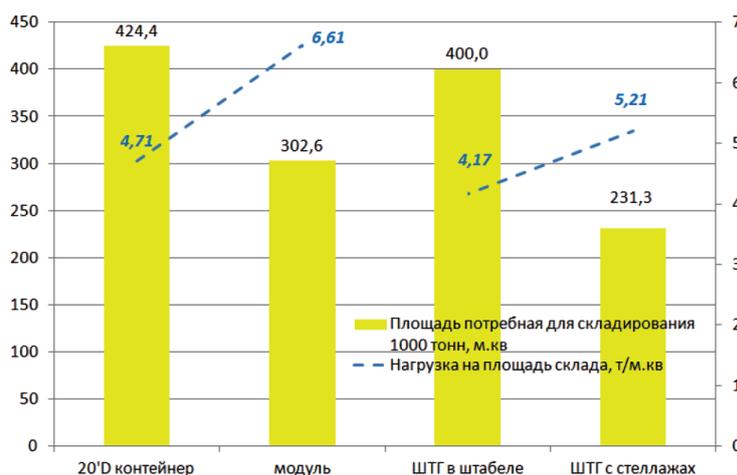


Рис. 9. Потребность складских площадей для хранения сборных грузов при различных вариантах укрупнения

¹ СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства. М.: Стандартинформ, 2017. 88 с.

² ГОСТ 9078–84. Поддоны плоские. Общие технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 9 с.

³ ГОСТ Р 55525–2013. Складское оборудование. Стеллажи сборно-разборные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.

Как следует из оценки внедрения новых средств укрупнения по рассмотренным критериям, сравнительный анализ рассматриваемых вариантов удобно производить при рассмотрении структурной схемы математической модели оптимального варианта укрупнения сборных грузов (рис. 10).

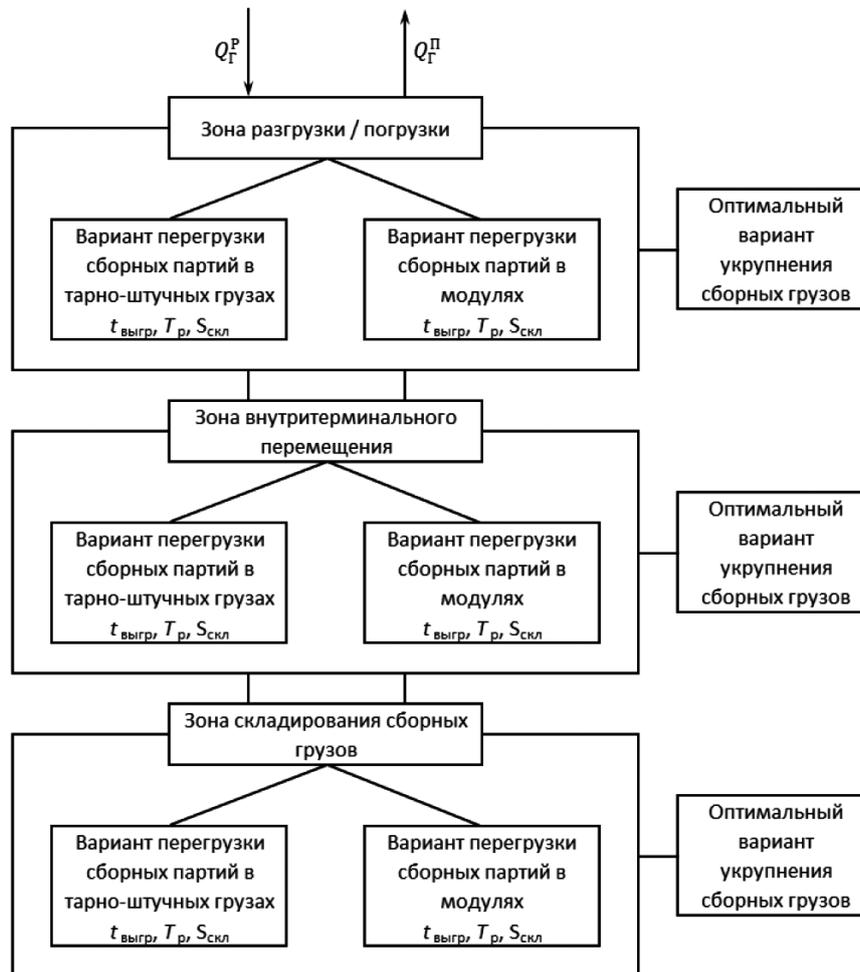


Рис. 10. Структурная схема математической модели оптимального варианта укрупнения сборных грузов

Анализ возможности внедрения новых средств укрупнения сборных грузов необходим для оценки перспектив совершенствования технологий перевозок сборных грузов как через существующие контейнерные терминалы, так и через проектируемые тыловые грузовые площадки.

Выводы (Summary)

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Контейнерная транспортно-технологическая система имеет значительный потенциал для дальнейшего совершенствования перевозок сборных грузов.
2. Контейнеризация грузов привела к появлению в цепочке продвижения товаров нового «узкого» места, конечных пунктов консолидации и распределения грузов.
3. Повышение системной эффективности контейнерных перевозок нуждается в дальнейшем совершенствовании средств укрупнения грузов.
4. Внедрение новых средств укрупнения сборных грузов потребует разработки технологий погрузочно-разгрузочных работ в условиях отсутствия специализированного перегрузочного оборудования у грузополучателей.
5. Оценка возможности внедрения новых средств укрупнения сборных грузов потребует всестороннего анализа перспектив совершенствования технологий перевозок сборных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1. — № 3 (41). — С. 176–182.
2. Кириченко А. В. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.
3. Kuznetsov A. L. Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, J. J. Eglit // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
4. Kuznetsov A. L. Methodological Problems of Modern Transportation Logistics / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2018. — Vol. 12. — No. 3. — Pp. 611–616. DOI: 10.12716/1001.12.03.21.
5. Изотов О. А. Определение требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов методом имитационного моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гульяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 679–686. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686.
6. Murty K.G. A decision support system for operations in a container terminal / K. G. Murty, J. Liu, Y. W. Wan, R. Linn // *Decision Support Systems*. — 2005. — Vol. 39. — Is. 3. — Pp. 309–332. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.002.
7. Xie Y. Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty / Y. Xie, D.P. Song // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2018. — Vol. 119. — Pp. 88–109. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.008.
8. Изотов О. А. Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
9. Vis I. F. A. A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal / I. F. A. Vis // *International Journal of Production Economics*. — 2006. — Vol. 103. — Is. 2. — Pp. 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.
10. Оборудование для загрузки / разгрузки контейнеров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://group812.com/rollin/> (дата обращения: 20.09.2019).

REFERENCES

1. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. “Port development simulation.” *Marine Intellectual Technology* 1.3(41) (2018): 176–182.
2. Kirichenko, A. V., et al. *Morskaya konteynernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
3. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and J.J. Eglit. “Simulation Model of Container Land Terminals.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
4. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. “Methodological Problems of Modern Transportation Logistics.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.3 (2018): 611–616. DOI: 10.12716/1001.12.03.21.
5. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. “Determination of the required quantity of technological resources of ports and cargo terminals by the method of imitation modeling.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 679–686. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686.
6. Murty, Katta G., Jiyin Liu, Yat-wah Wan, and Richard Linn. “A decision support system for operations in a container terminal.” *Decision Support Systems* 39.3 (2005): 309–332. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.002
7. Xie, Ying, and Dong-Ping Song. “Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 119 (2018): 88–109. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.008.
8. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. “Technological solutions for

cargoes shipment through the container transport and technological systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.

9. Vis, Iris F. A. “A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal.” *International Journal of Production Economics* 103.2 (2006): 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.

10. Oborudovanie dlya zagruzki/razgruzki konteinerov. Web. 20 Sept. 2019 <<http://group812.com/rollin/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 22 сентября 2019 г.
Received: September 22, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830

GUARANTEED ESTIMATION OF SHIPS' DOMAINS

A. E. Pelevin

Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

Currently, in the oceans there is an annual increase in the vessel traffic intensity; in addition, there is a significant increase in operational speed, as well as the linear dimensions of ships. Taking into account the high level of technical equipment of modern vessels, the need for participants in the transport process to comply with the requirements of the "International Rules of Preventing Collision" in the field of surveillance, safe speed, etc., a sufficient level of navigation safety in general has to be ensured. As known, excessive approach of ships on the high seas most often occurs due to the development of two situations: crossing courses and reciprocal courses.

Thus, the issue of assessing the size of the zone of permissible approach of vessels for various situations of excessive approach, important from the point of view of ensuring the navigation safety in the high seas and coastal areas is considered in the paper. This issue seems to be extremely relevant taking into account the prospects for the introduction of unmanned technologies in maritime and inland water transport. In the work in the context of situations of crossing and reciprocal courses, it is proposed to use the well-known representations of navigational safety zones (permissible approach) in the form of rectangular, circular, elliptical and polygon areas. However, the quantitative characteristics of the navigational safety zones are set on the basis of statistical data that do not take into account the features of the vessels approaching, their speed and characteristics. In the paper, the main focus is on the guaranteed assessment, taking into account the possible uncoordinated maneuver of the oncoming vessel, time-lag of its detection and characteristics of own vessel. The problem is solved by the methods of the Theory of Differential Games. Analytical formulas for calculating zones parameters are obtained.

Keywords: ships' domains, guaranteed estimate, maneuver of the oncoming vessel.

For citation:

Pelevin, Alexander E. "Guaranteed estimation of ships' domains." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830.

УДК 656.61.052

ГАРАНТИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ЗОНЫ ДОПУСТИМОГО СБЛИЖЕНИЯ СУДОВ В МОРЕ

А. Е. Пелевин

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В настоящее время в Мировом океане наблюдается ежегодный рост интенсивности движения судов и имеет место значительное увеличение эксплуатационной скорости движения, а также линейных размеров судов. Принимая во внимания высокий уровень технической оснащённости современных судов, а также необходимость соблюдения участниками транспортного процесса требований «Международных правил предупреждения столкновений судов в море» в области наблюдения, безопасной скорости и др., следует обеспечить достаточный уровень безопасности судоходства в целом. Известно, что чрезмерное сближение судов в открытом море наиболее часто происходит вследствие развития двух ситуаций: первая — пересекающиеся курсы, вторая — встречные курсы.

Рассматривается важный с точки зрения обеспечения безопасности судоходства в открытом море и прибрежных районах вопрос оценки размеров зоны допустимого сближения судов для различных ситуаций чрезмерного сближения. Данный вопрос представляется крайне актуальным, принимая во внимание перспективы внедрения безэкипажных технологий на морском и внутреннем водном транспорте. В системах предупреждения столкновения судов, реализованных в судовых ECDIS или в системах автоматической радиолокационной прокладки (САРП), в настоящее время используются представления зон навигационной безопасности (допустимого сближения) в виде прямоугольных, круговых, эллиптических и полигональных областей. Однако количественные характеристики зон навигационной безопасности задаются на основании

статистических данных, не учитывающих особенности сближения судов, их скорости и характеристики. Основное внимание в данной работе уделяется гарантированной оценке, учитывающей возможный несогласованный маневр встречного судна, время запаздывания его обнаружения и характеристики своего судна. Задача решается методами теории дифференциальных игр. Получены аналитические формулы расчета параметров зон.

Ключевые слова: допустимое сближение судов, гарантированная оценка, маневр встречного судна.

Для цитирования:

Пелевин А. Е. Гарантированная оценка зоны допустимого сближения судов в море / А. Е. Пелевин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830.

Введение (Introduction)

Принятые «Международные правила предупреждения столкновений судов в море (Правила МППСС-72)» (далее — Правила) для обеспечения безопасности мореплавания, связанной с возможным столкновением со встречными судами, являются обязательными для гражданских судов [1]. Однако Правила не устанавливают конкретные количественные значения дистанции опасных сближений, вместо них используются качественные описания, такие как «настолько близко к другому судну», или «чрезмерное сближение». При этом назначение области опасного сближения судоводителем при решении задачи безопасного расхождения в реальных условиях встречи судов в море определяется «хорошей морской практикой», т. е. собственным опытом судоводителя.

Развитие концепции морского безэкипажного судна также ставит задачи автоматизации процессов управления и в частности такой задачи, как обеспечение безопасного расхождения судов в море [2], [3], где опасное расстояние при сближении судов должно определяться автоматически. При оценке опасного сближения судов, обусловленного несогласованным маневром встречного судна, может быть использована *теория дифференциальных игр*. Подобный подход к решению данной проблемы был предложен автором в работе [4]. В данной статье этот подход дополнен новыми результатами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В источнике [5] рассматриваются основные принципы формирования оценки навигационной ситуации о районе плавания по информации, полученной от судовой *ECDIS*, и прогноз развития ситуации в течение заданного промежутка времени. При построении оценки опасности данной ситуации принимаются во внимание навигационные ограничения и возможность опасного сближения со встречным судном, поэтому судоводитель задает параметры опасной зоны (сближение на дистанцию, менее этой величины, считается опасным), зоны усиленного внимания (сближение на дистанцию, менее которой считается потенциально опасным и требует внимания со стороны судоводителя) исходя из своего опыта. При этом констатируется, что параметры могут быть различными в разных навигационных ситуациях и задаются судоводителем в соответствии с текущими условиями плавания, характеристиками собственного судна, близостью навигационных опасностей, погодными условиями и др. Следует отметить, что количественные оценки значений параметров опасной зоны отсутствуют.

Угроза опасного сближения характеризуется допустимой минимальной дистанцией сближения между судами. Обычно используют окружающую судно область, жестко связанную с ним, так называемый *судовой домен* (англ. domain) [6]. Попадание объекта в домен судна трактуется как угроза его движению. Судовые домены впервые предложено использовать для оценки навигационной безопасности в источнике [7].

Представления зон навигационной безопасности в виде линейных, прямоугольных, круговых, эллиптических, в виде полигонов или более сложных фигур из работ [6], [8] приведено на рис. 1. Формы зон получены на основании статистических данных реальных расхождений судов, они не учитывают особенности сближения судов при текущем сближении, их скорости и характеристики.

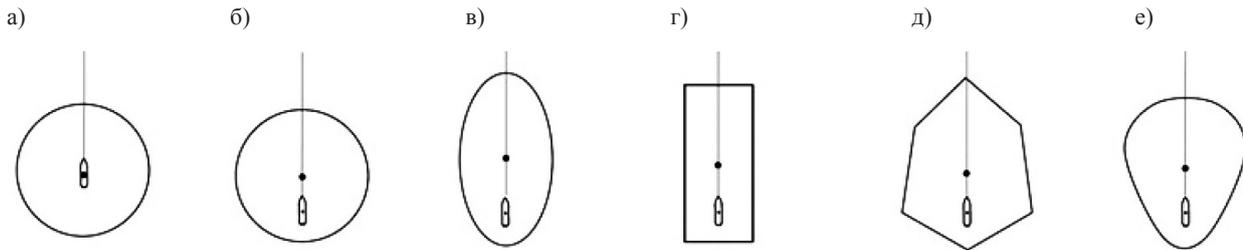


Рис. 1. Возможные формы домена судна:
 а, б — круговые; в — эллиптическая; г — прямоугольная; д, е — полигонные

В статье [9] приводятся также статистические данные для реальных условий сближения судов в открытом море при неограниченной видимости. Кроме того, рекомендуется не начинать маневр расхождения до тех пор, пока суда не сблизятся на расстояние 4,5 мили или до ожидаемого времени сближения останется менее 20 мин, исходя из того, что наступит раньше. При этом предлагается выбрать дистанцию и время маневра, не допуская сближения на дистанцию менее 1,5 мили или времени до сближения менее 7 мин, исходя из того, что наступит раньше. Там же, в источнике [9], капитан Р. А. Кейхилл дает определение термина «чрезмерное сближение», которое в Правилах упоминается неоднократно, однако суть его нигде не раскрывается ни качественно, ни количественно, характеризуя его как некоторую опасную область вокруг судна, в которой столкновение нельзя предотвратить собственными действиями, если приближающееся судно сделает резкое и неожиданное изменение курса или, согласно определению капитана А. П. Яскевича, приведенному в этом же источнике, как ситуацию, когда расстояние между судами настолько мало, что возможна потеря контроля за развитием событий, ибо действия своего судна не смогут позволить уверенно избежать столкновения в случае неблагоприятного маневрирования судна цели. В данной статье рассматривается задача гарантированной оценки размеров зоны опасного сближения судов, обусловленной возможным несогласованным маневром встречного судна с использованием методов теории дифференциальных игр, что позволяет теоретически определить размеры опасной области сближения — судового домена.

Постановка задачи

Для оценки области допустимого кратчайшего сближения своего судна (в дальнейшем — судно E) с другим встречным судном (в дальнейшем — судно P) будем учитывать следующие факторы, принимаемые во внимание судоводителями при задании в настоящее время радиуса зоны опасного сближения в виде круга:

- возможность разового неожиданного маневра судна, осложняющего расхождение;
- время запаздывания для обнаружения маневра встречного судна;
- время принятия решения о выполнении маневра расхождения судна;
- динамические характеристики своего судна.

Целью исследования является определение гарантированной оценки опасной зоны вокруг судна E , обусловленной неожиданным маневром судна P и факторами указанными ранее, для учета которых и обеспечения гарантированной оценки примем модели движения судов E и P безынерционными и будем считать, что маневр судна P неожиданный и разовый по отношению к наблюдающему судну E , т. е. первоначально судно P движется с постоянными скоростью и курсом, а после маневра мгновенно начинает движение с другими судами, но также с постоянными значениями скорости и курса (такая принятая модель хорошо отражает его движения относительно судна E в случае, если оно совершает маневр). При этом этот разовый маневр будем считать наихудшим по отношению к судну E .

Пусть скорость судна P («преследователя») удовлетворяет соотношению

$$0 < V_p \leq V_{p0}, \quad (1)$$

где V_{p0} — максимальная скорость судна P и K_p — его курс; скорость судна E («убегającego») удовлетворяет неравенству

$$0 < V_E \leq V_{E0}, \quad (2)$$

где V_{E0} — максимальная скорость судна E ; K_E — курс. Значения этих переменных принимаются на основании информации, выработанной системой автоматической радиолокационной прокладки или автоматизированной идентификационной системой. Максимальные значения могут быть приняты на 25 % больше значений, полученных от указанных систем.

Уравнения движения судна P в системе координат $E_x y$, связанной с судном E , ось E_y которой направлена на север, а ось E_x — на восток, будут следующие:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V_P \cos K_P; \\ \dot{y} &= V_P \sin K_P - V_E. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом не нарушая общности решения, будем полагать, что в начальный момент вектор скорости судна E направлен по оси E_y на север.

В соответствии с принятым допущением относительно параметров движения судна P введем в рассмотрение кусочно-постоянную стратегию второго порядка в виде матрицы

$$A = \begin{pmatrix} V_{P1} & V_{P2} \\ K_{P1} & K_{P2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где до момента времени t маневра судна P движение происходит с параметрами V_{P1}, K_{P1} , а после маневра — с параметрами V_{P2}, K_{P2} . Стратегию движения судна E также предполагаем кусочно-постоянной.

Введем в рассмотрение область M , определяемую охранным кругом вокруг судна, имеющую в системе координат $E_x y$ следующий вид:

$$M = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq l\}, \quad (5)$$

где l — радиус круга, равный, например, от двух до двух с половиной длин судна E ; область M характеризует размеры судна E и некоторое свободное пространство вокруг него, что обеспечивает исключение «присасывания» судна P , проходящего на близком расстоянии от судна E .

Поскольку ставится задача определения опасной зоны, вне которой гарантируется безопасное уклонение судна E , будем предполагать наихудший маневр судна P с параметрами V_{P2}, K_{P2} , т. е. такой, который может привести к l -захвату судна E , т. е. возможности входа судна P в область M . Будем считать, что из своей начальной позиции (x_0, y_0) , вне опасной зоны, судно P также может совершить l -захват судна E . Это позволит воспользоваться теорией дифференциальных игр с применением для решения попятных конструкций [8], [9]. В соответствии с концепцией дифференциальных игр будем называть судно P игроком P , а судно E — игроком E . Так как игрок P использует кусочно-постоянную стратегию, не меняет управление между моментами коррекций управления, то игрок E может распознать это управление. Следовательно, игрок P сначала выбирает параметры движения V_{P1}, K_{P1} , а игрок E отвечает на это параметрами V_{E1}, K_{E1} . В момент t игрок P выбирает новые параметры V_{P2}, K_{P2} , а игрок E в ответ — новые V_{E2}, K_{E2} . Такая стратегия поведения игрока E называется *контрстратегией* и обозначается последовательностью

$$B = \begin{pmatrix} V_{E1}(V_{P1}, K_{P1}, \tau) & V_{E2}(V_{P2}, K_{P2}, \tau) \\ K_{E1}(V_{P1}, K_{P1}, \tau) & K_{E2}(V_{P2}, K_{P2}, \tau) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

При этом в последовательности (6) учтено запаздывание τ , суммарно характеризующее время запаздывания, отведенное на обнаружение маневра встречного судна, время принятия решения о выполнении маневра расхождения судна и времени поворота судна, например, на 90° (с учетом динамики своего судна). Таким образом, задача сводится к следующему. Дано множество M — целевое множество. Пусть игрок P стремится к тому, чтобы в момент времени T точка $(x(T), y(T))$ достигла множества M , а игрок E преследует противоположную цель. Такая конфликтная ситуация называется *дифференциальной игрой качества* [10], [11].

Пусть для всех решений $x(t), y(t), t > 0$ системы (3) можно записать

$$J(x(\cdot), y(\cdot)) = \begin{cases} 1, & \text{если существует такое } T > 0, \text{ что } (x(T), y(T)) \in M; \\ -1 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

Функционал (7) определяет функцию выигрыша Q игрока P для каждого фиксированного начального состояния x_0 и y_0 :

$$Q(x_0, y_0) = \max_A \min_B I(x_0, y_0, A, B). \quad (8)$$

Выигрыш игрока P равен +1, если траектория $(x(t), y(t))$ в некоторый момент времени T достигает целевого множества M , в противном случае выигрыш равен -1.

Результаты (Results)

Для нахождения области захвата можно использовать *понятную конструкцию* [11], которая применительно к данному случаю будет следующей. Обозначим через $A(M)$ множество всех начальных состояний (x_0, y_0) так, что существуют постоянные V_{P1}, K_{P1} , подчиненные ограничениям (1) и удовлетворяющие для V_{E1}, K_{E1} с ограничением (2) на времени τ условиям: $x(\tau, x_0, V_{P1}, K_{P1}, V_{E1}, K_{E1}), y(\tau, y_0, V_{P1}, K_{P1}, V_{E1}, K_{E1}) \in M$ для какого-либо $0 < t < \tau$. Пусть $C_1 = A(M)$ представляет собой область захвата. Будем искать множество C_1 всех пар начальных положений игроков P и E , удовлетворяющих следующему условию: существует $\tau > 0$ такое, что игрок E не может избежать l -захвата в момент времени τ , если игрок P движется по любому лучу $P(0)E(0+t)$, где $t \in [0, \tau]$ с максимальной скоростью V_{P0} , удовлетворяющей условиям ограничения (2). Луч $P(0)E(0+t)$ для одного фиксированного значения $t \in [0, \tau]$ показан штриховой линией на рис. 2. Другими словами, множество C_1 состоит из всех пар точек начальных положений игроков так, что круг с центром в любой точке $E(0+t)$ при $t \in [0, \tau]$ и радиусом l касается круга с радиусом $V_{P0}t$, центр которого лежит на луче $PE(0+t)$ при $t > 0$. При таком построении области захвата будут учтены запаздывание τ в обнаружении маневра встречного судна и время на принятие решения на маневр расхождения и динамика своего судна, поэтому только по прошествии времени τ игрок E может предпринять маневр уклонения от l -захвата.

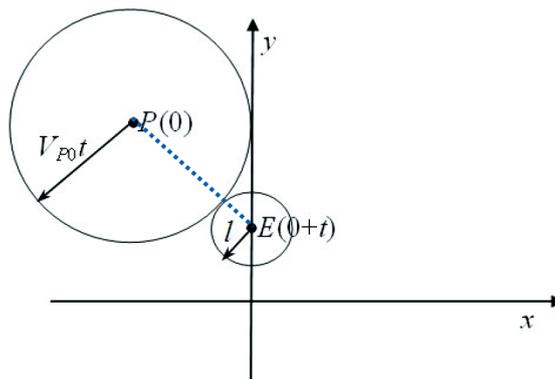


Рис. 2. Геометрия захвата игрока E игроком P

Выражение для определения области захвата, т. е. множества начальных точек местоположения (x_0, y_0) игрока P относительно игрока E , имеет следующий вид:

$$(x_0 + V_{P0}t \sin K)^2 + (y_0 + V_{P0}t \cos K - V_{E0}t)^2 = l^2;$$

$$\sin K = \frac{-x_0}{r}; \quad \cos K = \frac{-y_0 + V_{E0}t}{r};$$

$$r = \sqrt{x_0^2 + (-y_0 + V_{E0}t)^2};$$

$$0 \leq t \leq \tau.$$

Вид зон захвата приведен на рис. 3 для трех случаев: скорость игрока E больше скорости игрока P , скорости их движения равны и скорость игрока E меньше скорости игрока P . Расчеты приведены для значений длины своего судна: $L = 100$ м, $l = 2,5$, $L = 250$ м. Суммарное время запаздывания принято $\tau = 30$ с. На рисунке ромбом обозначено начальное местоположение игрока E . Окружности, выполненные сплошной линией, представляют области захвата при нескольких дискретных значениях $t \in [0, \tau]$, окружности, обозначенные звездочками — суммарную область захвата. Для случая, рассмотренного на рис. 3, а, выполнена аппроксимация зоны захвата, представляющая собой полигон окружностью 0,4 мили.

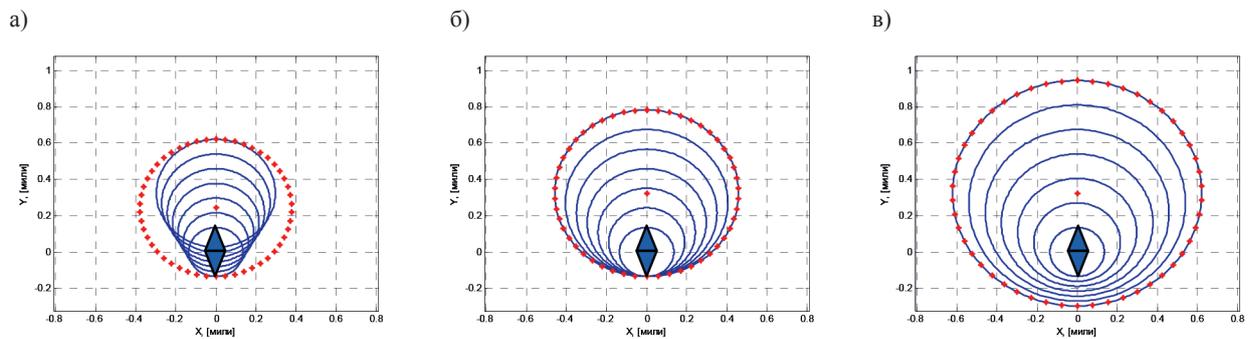


Рис. 3. Зоны допустимого сближения судов:

а — $V_E = 10$ уз; $V_P = 5$ уз; $R = 0,4$ мили; $y^* = 0,2$ мили; б — $V_E = 10$ уз; $V_P = 10$ уз; $R = 0,5$ мили; $y^* = 0,3$ мили; в — $V_E = 10$ уз; $V_P = 15$ уз; $R = 0,6$ мили; $y^* = 0,3$ мили

Приведем формулы расчета параметров зоны захвата, определяемой кругом радиуса R , мили, и смещением его в направлении носа судна на координату y^* , мили, т. е. круг с центром в точке $(0, y^*)$:

$$R = (V_E \tau + V_P \tau - l) / 2;$$

$$y^* = (V_E \tau + V_P \tau + l) / 2;$$

для случая $V_E \geq V_P$, уз:

$$R = V_P \tau + l;$$

$$y^* = V_E \tau.$$

Отличие выражения пара метров зоны в случае $V_E < V_P$ от $V_E \geq V_P$ обусловлено аппроксимацией зоны кругом (см. рис. 3, а)). Необходимо отметить, что для обеспечения безопасности мореплавания при сближении судов, если встречное судно, в соответствии с Международной конвенцией МППСС-72, не предпринимает маневра расхождения, то свое судно должно предпринять маневр расхождения последнего момента. Зону момента последнего момента можно определить достаточно просто — она находится аналогично области C_1 в заданной зоне M , только в этом случае в качестве зоны M выступает область C_1 с таким же отображением.

Обсуждение (Discussion)

Предложенные количественные оценки зоны опасного сближения (судового домена) позволяют учитывать размеры судна, соотношение скоростей сближающихся судов, временные запаздывания на обнаружение маневра и динамические свойства своего судна. Оценки зоны задаются простыми аналитическими формулами. Принятые в работе допущения и ограничения практически не влияют на значимость полученных результатов.

Примененный метод дифференциальных игр позволяет учесть возможный несогласованный разовый маневр встречного судна. На основании «попятной конструкции» определяется также и область маневра расхождения последнего момента.

Предложенный в статье подход к решению задачи расхождения можно реализовать также в среде безэкипажных судов.

Выводы (Summary)

1. На основе теории дифференциальных игр обоснованы формульные зависимости параметров зоны допустимого сближения судов. При этом учитывались следующие факторы: возможный неожиданный маневр встречного судна, временные запаздывания ответного маневра уклонения от опасного сближения своего судна и его характеристик.

2. Предложенный подход формирования допустимой зоны сближения судов в перспективе для систем расхождения безэкипажных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Смоленцев С. В. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
3. Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
4. Пелевин А. Е. Гарантированное расхождение судов / А. Е. Пелевин // Судостроение. — 1990. — № 9. — С. 27–30.
5. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
6. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений при расхождении с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Фенікс, 2010. — 229 с.
7. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / E. M. Goodwin // The Journal of navigation. — 1975. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
8. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гаращенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
9. Найденов Е. МППСС-72 не имеют права на существование / Е. Найденов // Морские вести России. — 2015. — № 12.
10. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Р. Айзекс. — М.: Мир, 1967. — 480 с.
11. Петросян Л. А. Геометрия простого преследования / Л. А. Петросян, В. Г. Томский. — М.: Наука, 1983. — 142 с.

REFERENCES

1. *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*. International Maritime Organization (IMO).
2. Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. “Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
3. Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. “Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
4. Pelevin, A. E. “Garantirovanoe raskhozhdenie sudov.” *Sudostroenie* 9 (1990): 27–30.
5. Smolentsev, Sergey Victorovich. “The problem of estimation of navigation situation in the sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.

6. Vagushchenko, L. L., and A. L. Vagushchenko. *Podderzhka reshenii pri raskhozhenii s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
7. Goodwin, Elisabeth M. "A statistical study of ship domains." *The Journal of navigation* 28.3 (1975): 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
8. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. "The methods for conception of ship's domain." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
9. Naidenov, E. "MPPSS-72 ne imeyut prava na sushchestvovanie." *Morskije vesti Rossii* 12 (2015).
10. Aizeks, R. *Differentsial'nye igry*. M.: Mir, 1967.
11. Petrosyan, L. A., and V. G. Tomskii. *Geometriya prostogo presledovaniya*. M.: Nauka, 1983.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пелевин Александр Евгеньевич —
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Малая Посадская, 30
e-mail: apelevin@eprib.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pelevin, Alexander E. —
Dr. of Technical Sciences,
Leading Researcher
Concern CSRI Elektropribor, JSC
30, Malaja Posadskaja Str., St. Petersburg, 197046,
Russian Federation
e-mail: apelevin@eprib.ru, apelevin@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.
Received: September 30, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841

MULTI-AGENT MODEL OF THE INTEGRATED SHIP CONTROL SYSTEM

Y. M. Iskanderov¹, V. D. Gaskarov², V. I. Doroshenko²

¹ — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation

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

In modern conditions, integrated automation of management is a promising and economically profitable direction of its development, and the intellectualization of management is becoming increasingly important. The construction of an integrated ship control system with a single control, carried out from an integrated central control post - the navigator's automated workplace in the ship's wheelhouse is a major urgent problem. To solve this problem, it is proposed to use a model of a distributed architecture system based on multi-agent technologies, the principle of which is based on the decomposition of the general task into a number of local tasks assigned to the agents of the system, the distribution of these tasks between agents, the planning of collective behavior of agents, coordination of agent interaction based on cooperation, reconfiguration, communication and conflict resolution.

A number of problems solved by an integrated ship control system is identified in the paper and the implementation of multi-agent technology using the processes of a ship's motion control system is considered as an example. The structure of the knowledge base of a multi-agent ship motion control system is presented. A knowledge base management system the key elements or the main agents of which are the coordinator of software agents, the ontology manager, and the communicator of software agents, is presented. The general scheme of the organization of interaction of agent platforms in the ship movement management is presented. The principles on the basis of which a multi-agent system for controlling the ship movement should be created are formulated. It is noted that it is advisable to use a model developed based on the requirements of the Federation of Intelligent Physical Agents, the standard that governs the development of multi-agent systems, and also defines the logical model of the agent platform and a set of services as the base model of the class of intelligent agent. It is proposed that further research will be directed to the formation of many ontologies that make up the knowledge base of the integrated ship control system, the construction of a relevant knowledge base management system that implements effective interaction of the main agents, as well as to the development of agent platforms that provide solutions to the ship control tasks.

Keywords: ship, integrated control system, motion control, multi-agent technology, multi-agent system, software agent, agent platform, knowledge base, ontology, decisions support.

For citation:

Iskanderov, Yurii M., Vagiz D. Gaskarov, and Viktor I. Doroshenko. "Multi-agent model of the integrated ship control system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 831–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841.

УДК 004.89: 656.078

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ

Ю. М. Искандеров¹, В. Д. Гаскаров², В. И. Дорошенко²

¹ — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Рассмотрена комплексная автоматизация управления, являющаяся перспективным и экономически выгодным направлением развития с учетом того, что интеллектуализация управления приобретает все большее значение. Подчеркивается, что построение интегрированной системы управления судном с единым управлением, осуществляемым с комплексного центрального поста управления — ав-

томатизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна, является важнейшей актуальной проблемой. Для решения данной проблемы предлагается использовать модель системы с распределенной архитектурой на основе мультиагентных технологий, принцип действия которых основан на декомпозиции общей задачи на ряд локальных задач, возлагаемых на агентов системы, разделении этих задач между агентами, планировании коллективного поведения агентов, координации взаимодействия агентов на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешении конфликтных ситуаций. Выделен ряд задач, решаемых интегрированной системой управления судном, и рассмотрена реализация мультиагентной технологии на примере процессов функционирования системы управления движением судна. Приведена структура базы знаний мультиагентной системы управления движением судна. Представлена система управления базы знаний, ключевыми элементами которой (главными агентами) являются: координатор программных агентов, менеджер онтологий и коммуникатор программных агентов. Представлена общая схема организации взаимодействия агентных платформ при управлении движением судна. Сформулированы принципы, на основании которых должна создаваться мультиагентная система управления движением судна. Отмечается, что в качестве базовой модели класса интеллектуального агента целесообразно использовать модель, разработанную на основе требований Federation of Intelligent Physical Agents — стандарта, регулирующего создание мультиагентных систем, а также определяющего логическую модель агентной платформы и набор служб. Предлагается направить дальнейшие исследования на формирование множества онтологий, составляющих базу знаний интегрированной системы управления судном, построение релевантной системы управления базы знаний, реализующей эффективное взаимодействие главных агентов, а также на разработку агентных платформ, обеспечивающих решение задач управления судном.

Ключевые слова: судно, интегрированная система управления, управление движением, мультиагентная технология, мультиагентная система, программный агент, агентная платформа, база знаний, онтология, принятие решений.

Для цитирования:

Искандеров Ю. М. Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном / Ю. М. Искандеров, В. Д. Гаскаров, В. И. Дорошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 831–841. DOI: 10.21821/2309-15180-2019-11-5-831-841.

Введение (Introduction)

Ключевым элементом в решении проблемы обеспечения эффективного управления судном является информационная инфраструктура, основанная на использовании достижений современных информационных технологий. Релевантная информация для таких структур является фактором, обеспечивающим выработку оптимальной стратегии управления. В связи с ростом сложности существующая структура управления не обеспечивает функционирование единого информационного пространства. Получение и переработка оперативной, полной и достоверной информации о состоянии судна затруднены вследствие невысокого уровня использования новых информационных технологий. Кроме того, существующие модели не позволяют в полной мере с достаточной степенью адекватности представить и оценить процессы управления судна с учетом таких особенностей, как огромное количество разнородных элементов и связей между ними, влияние природных и других условий и др.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к построению интегрированной системы управления судном (ИСУС) с единым управлением, осуществляемым с комплексного центрального поста управления — автоматизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна [1]. При этом часть задач, ранее решаемых на нижних уровнях иерархической структуры, поступает на верхний уровень, что чрезмерно увеличивает концентрацию задач автоматизированного рабочего места оставшихся судовых специалистов. В то же время усложняются и сами задачи, решаемые на судне. Например, особое положение среди судовых автоматических систем занимают системы управления движением, для которых управляемым объектом является судно в целом [2].

Автоматическое управление движением существенно повышает качество эксплуатации судна, позволяя при этом сокращать численность экипажа. Однако сокращение численности экипажа

жа приводит как к уменьшению общего потенциала знаний, накопленных интеллектом судовых специалистов, так и к перегрузке специалистов на верхних уровнях управления. Для достижения эффективного управления движением судна необходимо решение множества прикладных задач, включающих вопросы организации оптимального пути передачи сообщений и рационального использования ресурсов в процессе эксплуатации судна. Решение этих задач осуществляется системой управления путем контроля и наблюдения за соответствующими ее параметрами, ресурсами и изменением их в соответствии с заданными алгоритмами и программами. Система управления имеет свою внутреннюю архитектуру и ряд подсистем. В ней можно выделить две основные части: систему принятия и систему исполнения решений. Образно говоря, первая часть — это «мозг системы», ее интеллектуальная основа, реализуемая в виде операционной системы, вторая часть — ее «опорно-двигательный механизм», реализуемый в виде программно-технических средств технической эксплуатации. В свою очередь, в технической эксплуатации выделяют следующие подсистемы: контроля, измерений и резервирования, расчетов и др.

На уровне организационного управления осуществляется анализ состояния управления движением и выработка вариантов решения на этапах оперативного управления и планирования. К задачам технологического управления относятся задачи сбора и первичной обработки информации, доведения и реализации управляющих воздействий на исполнительные средства. При решении указанных задач, кроме требований, предъявляемых к оперативности, достоверности и надежности, к процессу автоматизированного управления предъявляются жесткие требования, учитывающие такие особенности управления движением судна, как сложность, большая размерность, территориальная распределенность, динамичность структуры [2]. Это общее понимание роли системы управления, ее взаимосвязи с инфотелекоммуникациями и технической эксплуатацией в последние годы получило новое развитие [3]–[8].

Для поддержания единого информационного пространства система управления движением должна обеспечивать взаимодействие с другими инфотелекоммуникационными системами, использующими различные телекоммуникационные, коммутационные, сетевые и информационные технологии. Все это резко усложняет решение вопросов контроля и управления движением судна. Таким образом, в современных условиях комплексная автоматизация управления является перспективным и экономически выгодным направлением ее развития, причем все большее значение приобретает интеллектуализация управления.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Известно, что особенностями управления судном являются иерархически-сетевой принцип организации управления и влияние различных факторов на качество его функционирования. В связи с этим развитие инфотелекоммуникационной инфраструктуры требует новых принципов построения информационных систем. Такими новыми принципами должны стать принципы распределенных способов обработки информации. Решением этой проблемы может быть использование систем с распределенной архитектурой на основе мультиагентных технологий [9]–[14]. Принцип действия мультиагентных управляющих систем основан на декомпозиции общей задачи на ряд локальных задач, возлагаемых на агентов системы, распределении этих задач между агентами, планировании коллективного поведения агентов, координации взаимодействия агентов на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешения конфликтных ситуаций.

Особенность мультиагентных систем состоит в использовании *онтологий* — специализированных баз знаний о предметной области, используемых в процессе работы агентов. Онтология описывает классы объектов (например, ресурсы, проекты, задачи, заказы и планы) и их атрибуты, отношения и процессы. Отделяя знания о предметной области от системного кода, она не только позволяет вносить изменения в систему специалистам, не имеющим навыков программирования, но и дает возможность вносить эти изменения «на лету», без прерывания работы системы. Знания, содержащиеся в онтологии, используются программными агентами в процессе

переговоров и принятия решений. Именно умение пользоваться знаниями, описанными в онтологии, делает программных агентов интеллектуальными агентами.

Преимущество мультиагентных технологий заключается в принципиально новом методе решения задач. В отличие от классического способа, когда выполняется поиск некоторого четко определенного (детерминированного) алгоритма, позволяющего найти наилучшее решение проблемы, реализация мультиагентных технологий дает возможность получать решение автоматически в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленных программных модулей — агентов. Программный агент (ПА) — ключевой элемент мультиагентных систем, который представляет собой специальный объект, способный анализировать ситуацию, принимать решения, коммуницировать с другими агентами, вести переговоры друг с другом для разрешения возникающих конфликтов и затем информировать систему и пользователя о результатах своих действий.

Обычно агент обладает следующими свойствами:

- *адаптивность* — способностью к обучению;
- *автономность* — способностью работы в качестве самостоятельной программы, ставя при этом цели и выполняя действия для их достижения;
- *коллаборативность* — возможностью взаимодействия с другими агентами несколькими способами, например, играя роль поставщика / потребителя информации или одновременно обе эти роли;
- *способностью к рассуждениям* — наличием частичных знаний или механизмов вывода (например, знаний, как приводить данные из различных источников к одному виду);
- *коммуникабельность* — способностью общения с другими агентами;
- *мобильность* — способностью к передаче кода с одного сервера на другой.

На ИСУС возлагается реализация комплекса задач [15], в том числе:

- подготовка судна к выходу в море;
- подготовка экипажа к выходу в море;
- управление движением судна;
- поддержка принятия решений в различных ситуациях.



Рис. 1. Задачи, решаемые интегрированной системой управления судном

Содержательная структура указанных задач представлена на рис. 1. Очевидно, что выполнение такого значительного объема работ требует наличия соответствующих информационных ресурсов. Причем эти ресурсы должны быть организованы вполне определенным образом, чтобы обеспечить эффективность и качество функционирования ИСУС, что является чрезвычайно сложной задачей.

Рассмотрим реализацию мультиагентной технологии процессов функционирования системы управления движением судном (СУДС), которая должна решать множество задач для оптимального управления судном. В каждой отдельной ситуации система использует правила, предписанные именно для данного случая, не учитывая огромное число других факторов в постоянно меняющемся реальном мире. Мультиагентная система позволяет решить эту проблему. Знания предметной области управления движением судна представляют собой формализованные описания на естественном языке с помощью соответствующих понятий и отношений между ними, которые с использованием методов инженерии знаний могут быть сформированы в релевантную базу знаний (БЗ). Для построения такого рода БЗ разработан новый подход к созданию конструктивного формализма, основанного на семантических графах с оболочками [16], [17]. На рис. 2 представлена структура БЗ мультиагентной системы управления движением судна (МСУДС).

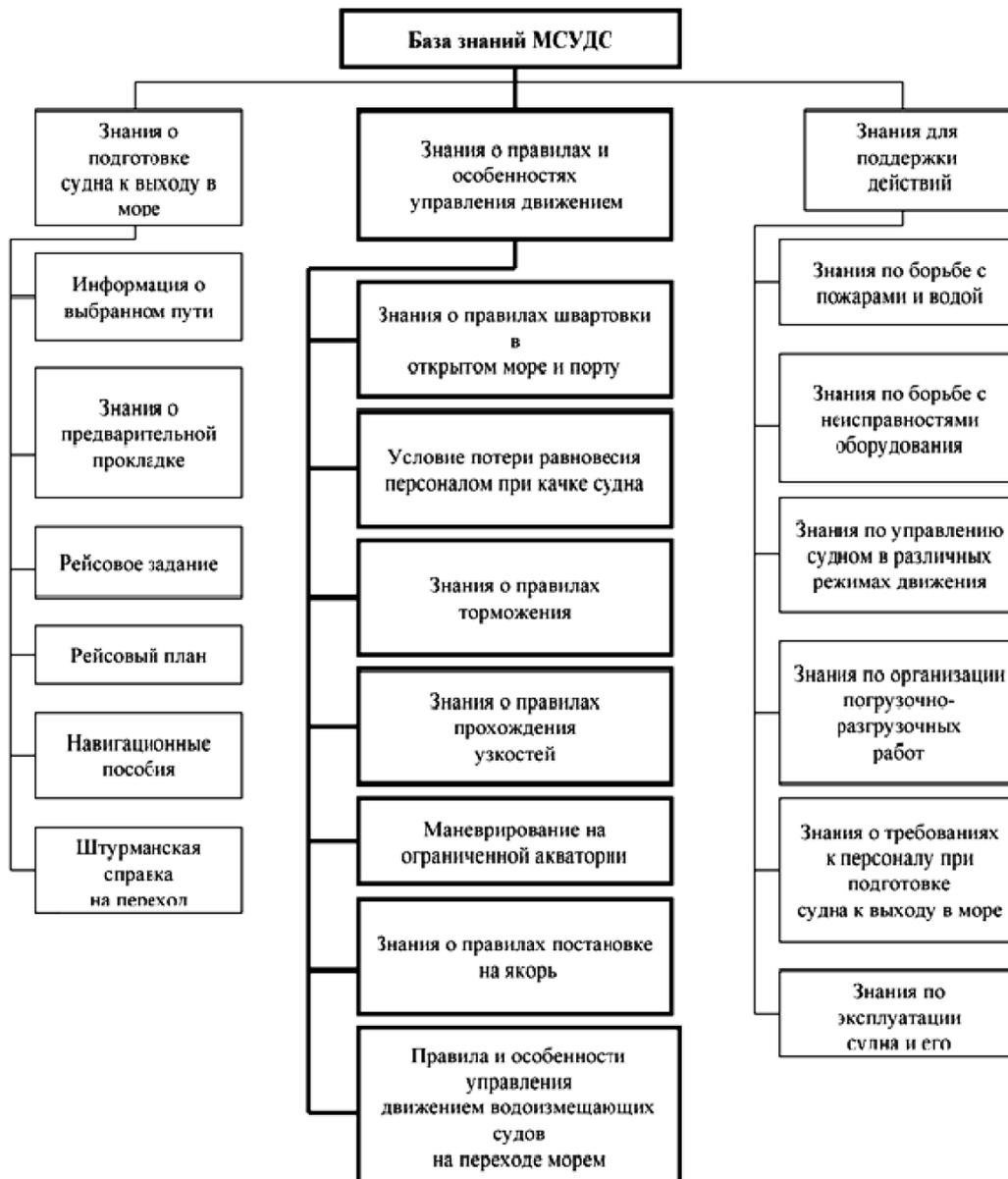


Рис. 2. Структура базы знаний мультиагентной системы управления движением судна

Очевидно, что процесс решения указанных задач имеет определенную структуру, характер которой зависит от функционирования системы управления БЗ (СУБЗ). Поэтому каждой задаче в МСУДС присваиваются программные агенты, которые общаются между собой. На рис. 3 представлен верхний уровень структуры перспективной МСУДС. Ключевыми элементами СУБЗ, или ее главными агентами, являются: координатор ПА, менеджер онтологий и коммуникатор ПА. Функционирование этих главных агентов и их взаимодействие при реализации алгоритмов ПА будут характеризовать качество и эффективность СУБЗ и МСУДС в целом.

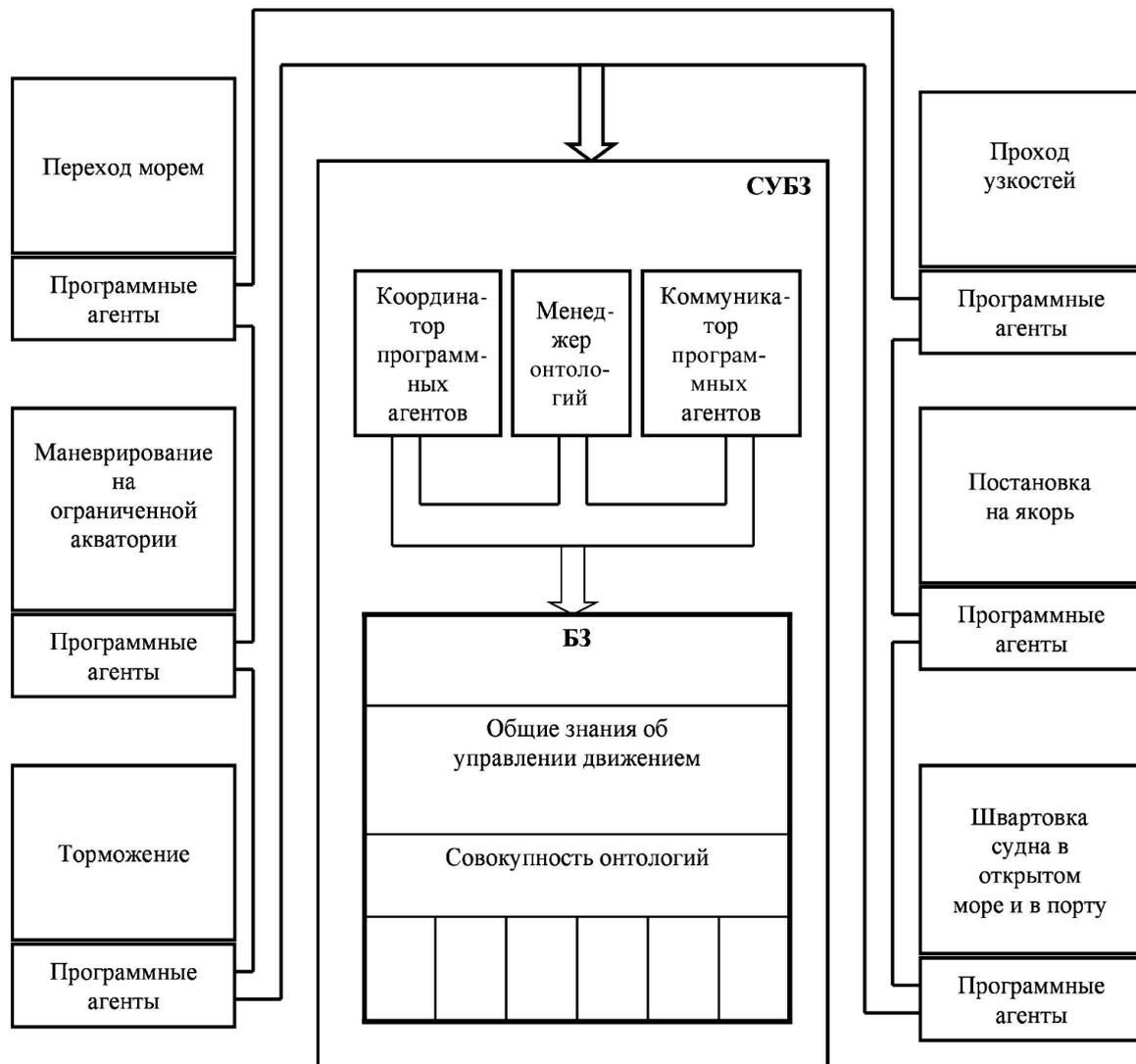


Рис.3. Верхний уровень структуры перспективной мультиагентной системы управления движением судна

С помощью главных агентов СУБЗ агенты обращаются непосредственно к базе знаний, где отыскивают необходимую онтологию. Знания, предписания и правила, хранящиеся в онтологии, позволяют ПА принять правильное решение. Координатор ПА обеспечивает общение агентов, что позволяет без возникновения конфликтов из-за приоритета ситуации учесть все влияния внешних и внутренних факторов для принятия оптимального решения. Используя постоянно пополняющуюся БЗ и удобное «общение» с агентами, мультиагентная система поможет судовым специалистам обеспечить принятие наилучшего решения и в нестандартных ситуациях.

На рис. 4 приведена общая схема организации взаимодействия агентных платформ при управлении движением судна. Например, ПА безопасного маневрирования получает радиолока-

ционные данные о скорости и курсе, обрабатывает информацию, моделирует текущую ситуацию, прогнозирует движение судов, выполняет результирующую оценку и выдает рекомендации курса и скорости для безопасного маневрирования. В качестве варианта указанного ПА может быть использован алгоритм, изложенный в источнике [8].

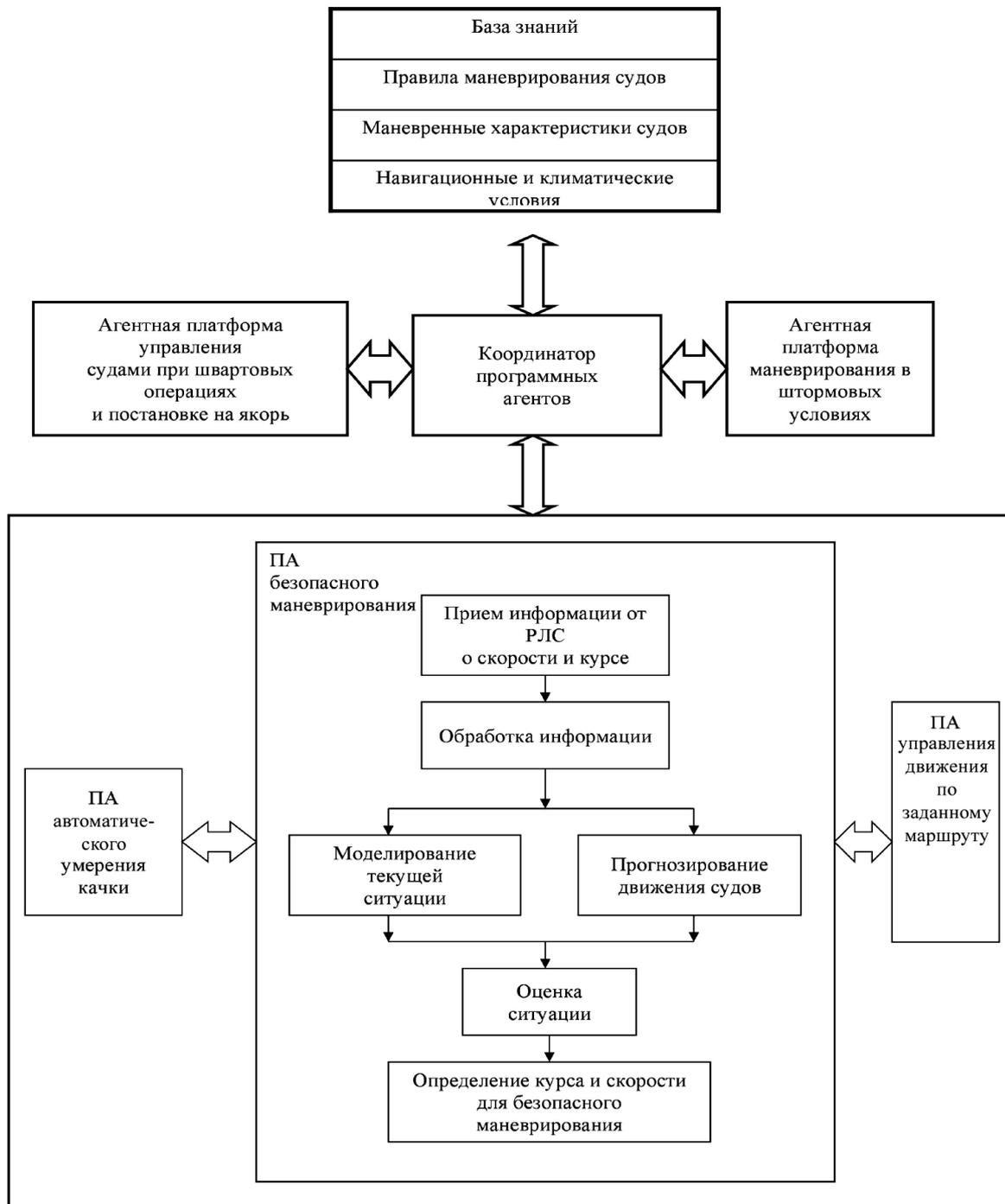


Рис.4. Общая схема организации взаимодействия агентных платформ при управлении движением судна

Обсуждение (Discussion)

Для эффективного решения задач МСУДС должна строиться на основе принципов, реализованных и опробованных на ее модели. Выполненные ранее исследования [12] показали, что данными принципами должны являться следующие:

- применение международных стандартов для всех стадий жизненного цикла системы;
- использование адекватной методологии для построения моделей организационных процессов транспортных систем;
- компонентное построение прикладных и инструментальных средств;
- мультиагентная реализация механизмов взаимодействия инструментальных и прикладных средств.

Основополагающей характеристикой мультиагентной системы является мобильность. В конечном итоге, мобильные информационные системы обладают способностью функционировать в гетерогенном окружении, эволюционно развиваться и адаптироваться к окружающей обстановке и изменениям в структуре и составе объекта управления.

Таким образом, МСУДС должна обладать следующими свойствами:

- структура сообщества агентов является динамической относительно типов и количества членов сообщества;
- сообщество агентов основывается на принципах кооперации;
- структура сообщества агентов подразумевает распределенность, что позволяет эффективно организовать доступ к различным источникам данных;
- агенты используют вполне определенную предметную область для решения поставленных задач;
- агенты обеспечивают работу в асинхронном режиме;
- появление новых членов сообщества агентов или изменение функций некоторых агентов не требует перезагрузки всей информационной системы.

В качестве базовой модели класса интеллектуального агента IA целесообразно использовать модель, разработанную на основе требований FIPA (Federation of Intelligent Physical Agents) — стандарта, регулирующего разработку MAC, а также определяющего логическую модель агентной платформы и набор служб [18]:

$$IA = \langle LA, CM, BM, O \rangle,$$

где LA — множество информационных атрибутов (идентификатор, местоположение и т. д.);

CM — коммуникационная модель (язык и методы для общения);

BM — поведенческая модель (способы обработки сообщений);

O — множество онтологий.

Выводы (Summary)

1. Развитие информационных технологий позволяет совершить качественный скачок в области создания ИСУС с большими сложными динамическими системами. Очевидно, что использование мультиагентных технологий позволит обеспечить переход на новый уровень качества и эффективности функционирования указанных систем. Применение принципа действия мультиагентных управляющих систем позволяет выполнить декомпозицию сложнейшей задачи управления судном на множество локальных задач, возлагаемых на агентов, распределение этих задач между агентами, планирование коллективного поведения агентов, координацию их взаимодействия на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешения конфликтных ситуаций, а также использовать онтологии — специализированные БЗ о предметной области в работе агентов.

2. На примере формирования модели МСУДС предлагаемый подход показал перспективность изложенных исследований. Использование МСУДС позволит значительно уменьшить затраты на сетевое взаимодействие, сократить время решения задач, обеспечить простоту и удобство использования системы за счет автономности, мобильности и интеллектуальности программных агентов.

3. Дальнейшие исследования необходимо направить на формирование множества онтологий, составляющих БЗ ИСУС, построение релевантной СУБЗ, реализующей эффективное взаимодействие главных агентов, т. е. координатора ПА, менеджера онтологий и коммуникатора ПА, а также на разработку агентных платформ, обеспечивающих решение задач управления судном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегрированные системы автоматизации — новое слово в современном судоходстве. 27 июля 2017 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://satprocom.ru/dokumentacija/11979/> (дата обращения: 25.09.2019).
2. *Лукомский Ю. А.* Навигация и управление движением судов : учеб. / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — СПб.: «Элмор», 2002. — 360 с.
3. *Искандеров Ю. М.* Мультиагентная система управления движением судна / Ю. М. Искандеров, М. В. Яковченко // Транспорт России : проблемы и перспективы : труды всероссийской научно-практической конференции. — СПб., 2007. — С. 27–28.
4. *Каретников В. В.* Совершенствование системы управления судами с использованием автоматизированных идентификационных систем на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 93–96.
5. *Павлыгин Э. Д.* Многоагентное моделирование и визуализация окружающей обстановки морского судна / Э. Д. Павлыгин, П. И. Соснин // Автоматизация процессов управления. — 2010. — № 2. — С. 3–12.
6. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
7. *Смоленцев С. В.* Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.
8. *Смоленцев С. В.* Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
9. *Скобелев П. О.* Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени / П. О. Скобелев, А. В. Иващенко, М. В. Андреев, И. О. Бабанин // Механика, управление и информатика. — 2011. — № 5. — С. 110–122.
10. *Скобелев П. О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития / П. О. Скобелев // Информационные технологии. — 2013. — № S1. — С. 1–32.
11. *Городецкий В. И.* Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива / В. И. Городецкий, П. О. Скобелев // Труды СПИИРАН. — 2017. — № 6 (55). — С. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1.
12. *Искандеров Ю. М.* Построение моделей интегрированной информационной системы транспортной логистики на основе мультиагентных технологий / Ю. М. Искандеров // «Новая экономика» и основные направления ее формирования: междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.; под общ. ред. А. В. Яковлевой. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2016. — С. 62–69.
13. *Искандеров Ю. М.* Организация транспортно-технологических процессов на основе интегрированных информационных систем / Ю. М. Искандеров, В. И. Дорошенко // Там же; под общ. ред. А. В. Яковлевой. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2016. — С. 53–62.
14. *Gorodetskii V. I.* Applied multiagent systems of group control / V. I. Gorodetskii, O. V. Karsayev, V. V. Samoylov, S. V. Serebryakov // Scientific and Technical Information Processing. — 2010. — Vol. 37. — Is. 5. — Pp. 301–317. DOI: 10.3103/S0147688210050060.
15. *Ермолаев Г. Г.* Основы морского судоходства / Г. Г. Ермолаев, Е. С. Зотеев. — М.: Транспорт, 1988. — 258 с.
16. *Искандеров Ю. М.* Технология создания базы знаний для автоматизированной системы управления корпоративной сетью связи морского порта: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.13 / Ю. М. Искандеров. — СПб., 2005. — 243 с.
17. *Искандеров Ю. М.* Формирование безопасной базы знаний интеллектуальной системы проектирования АСУ на транспорте / Ю. М. Искандеров, А. А. Ершов // Информационная безопасность регионов

России (ИБРР-2017): материалы конф. — СПб.: СПб. о-во информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2017. — С. 277–278.

18. The Foundation for Intelligent Physical Agents [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.fipa.org/> (дата обращения: 25.09.2019).

REFERENCES

1. Integrirovannye sistemy avtomatizatsii – novoe slovo v sovremennom sudokhodstve. Web. 25 Sept. 2019 <<https://satprocom.ru/dokumentacija/11979/>>.

2. Lukomskii, Yu. A., V. G. Peshekhonov, and D. A. Skorokhodov. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov. Uchebnik*. SPb.: «Elmor», 2002.

3. Iskanderov, Yu. M., and M. V. Yakovchenko. “Mul’tiagentnaya sistema upravleniya dvizheniem sudna.” *Transport Rossii: problemy i perspektivy. Nauchnoe izdanie: trudy vsereossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb., 2007. 27–28.

4. Karetnikov, V. V. and A. A. Sikarev. “System development for ships control by using automated authentication systems on inland waterways.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2010): 93–96.

5. Pavlygin, E. D., and P. I. Sosnin. “Mnogoagentnoe modelirovanie i vizualizatsiya okruzhayushchei obstanovki morskogo sudna.” *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* 2 (2010): 3–12.

6. Sazonov, A. E., and V. V. Deryabin. “Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.

7. Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A. E. Filyakov, and D. V. Kunits. “Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.

8. Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. “Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

9. Skobelev, P. O., A. V. Ivaschenko, M. V. Andreev, and I. O. Babanin. “Multi-agent technology for real time manufacturing resources management.” *Mechanics, Control and Informatics* 5 (2011): 110–122.

10. Skobelev P. O. “Intelligent Systems for Real Time Resource Management: Principles, Experience and Perspectives.” *Information Technologies* S1 (2013): 1–32.

11. Gorodetsky, Vladimir Ivanovich, and Petr Olegovich Skobelev. “Industrial applications of multi-agent technology: reality and perspectives.” *SPIIRAS Proceedings* 6(55) (2017): 11–45.

12. Iskanderov, Yu. M. “Postroenie modelei integrirovannoi informatsionnoi sistemy transportnoi logistiki na osnove mul’tiagentnykh tekhnologii.” *«Novaya ekonomika» i osnovnye napravleniya ee formirovaniya. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Edited by A. V. Yakovleva. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2016. 62–69.

13. Iskanderov, Yu. M., and V. I. Doroshenko. “Organizatsiya transportno-tekhnologicheskikh protsessov na osnove in-tegrirovannykh informatsionnykh system.” *«Novaya ekonomika» i osnovnye napravleniya ee formirovaniya. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Edited by A. V. Yakovleva. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2016. 53–62.

14. Gorodetskii, V. I., O. V. Karsayev, V. V. Samoylov, and S. V. Serebryakov. “Applied multiagent systems of group control.” *Scientific and Technical Information Processing* 37.5 (2010): 301–317. DOI: 10.3103/S0147688210050060.

15. Ermolaev, G. G., and E. S. Zoteev. *Osnovy morskogo sudovozhdeniya*. M.: Transport, 1988.

16. Iskanderov, Yu. M. *Tekhnologiya sozdaniya bazy znaniy dlya avtomatizirovannoi sistemy upravleniya korporativnoi set’yu svyazi morskogo porta*. Dr. diss. Sankt-Peterburg, 2005.

17. Iskanderov, Yu. M., and A. A. Ershov. “The formation of the safe knowledge base of the intelligent system of designing ACS on transport.” *Informatsionnaya bezopasnost’ regionov Rossii (IBRR-2017): Materialy konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskoe Obshchestvo informatiki, vychislitel’noi tekhniki, sistem svyazi i upravleniya, 2017. 277–278.

18. The Foundation for Intelligent Physical Agents. Web. 25 Sept. 2019 < <http://www.fipa.org/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Искандеров Юрий Марсович —

доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
14-я линия В. О., 39
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Гаскаров Вагиз Диляурович —

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

Дорошенко Виктор Иванович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Iskanderov, Yurii M. —

Dr. of Technical Sciences, professor
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy of Sciences
39 14-th Liniay of V.I. Str., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Gaskarov, Vagiz D. —

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_koib@gumrf.ru

Doroshenko, Viktor I. —

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_rmfs@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.
Received: September 30, 2019.*

A MODEL FOR SUPPORTING THE SCHEDULING OF GEOSPATIAL PROCESSES OF THE WATER TRANSPORT BASED ON THE SITUATIONAL MANAGEMENT

Y. A. Ivakin^{1,2}, S. N. Potapychev^{1,2}, R. Y. Ivakin³

¹ — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

² — Concern OCEANPRIBOR JSC, St. Petersburg, Russian Federation

³ — The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation

Scheduling of geospatial processes of vessels is one of the most important processes of ensuring the navigation safety and efficiency of the water transport. It represents the control and coordination of management of geospatial processes of the water transport (i.e. the processes of ship traffic in time and geographical space) to achieve the highest indicators of effectiveness, implementation of traffic schedules, the production program and other parameters at unconditional fulfillment of the navigational safety requirements. Feature of the water transport scheduling is a constant change of situation, adjustability and some inconsistency of schedules, ship traffic schemes, etc. The main objectives of the water transport scheduling are monitoring the navigational status and safety of moving vessels, following the plans and schemes of the movement on the water areas. Modern, effective scheduling of the water transport means a realistic balance between the purposes of navigation (geospatial) safety and the production purposes.

Opportunities for situational management realized within scheduling of geospatial processes of the water transport allow to increase the effectiveness and improve the quality of the country's fleet operation. Scheduling by spatial processes of the water transport using situational management tools and digital cartographic data sets is closely connected with the implementation of more developed data processing model in automation complexes for controlling the ship traffic. The model offered in the paper is oriented, in particular, not at processing data about each vessel, but at tracking spatial situations against the background of data on geographical theater, as well as assessing their danger. It is in this the implementation of the informational component of situational management for scheduling the geospatial processes of the water transport is being represented, and its informative disclosure is considered in the paper.

Keywords: Scheduling the geospatial processes, situational management, digital geospatial data, spatial data, water transport.

For citation:

Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapychev, and Roman Y. Ivakin. "A model for supporting the scheduling of geospatial processes of the water transport based on the situational management." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 842–855. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-842-855.

УДК 681.1.003

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Я. А. Ивакин^{1,2}, С. Н. Потапычев^{1,2}, Р. Я. Ивакин³

¹ — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена диспетчеризация геопропространственных процессов судов, являющаяся одним из важнейших процессов обеспечения навигационной безопасности и эффективности водного транспорта,

представляющая собой контроль и координацию управления геопространственными процессами водного транспорта, т. е. процессами движения судов во времени и географическом пространстве, для достижения максимальных показателей результативности, реализации графиков движения, производственной программы и других параметров при безусловном выполнении требований навигационной безопасности. Отмечается, что особенность диспетчеризации водного транспорта состоит в постоянном изменении обстановки, корректируемости и некоторой противоречивости графиков, схем движения судов и др. Сформулированы основные задачи диспетчеризации водного транспорта, такие как контроль навигационного состояния и безопасности движущихся судов, а также соблюдение планов и схем движения на акваториях. Подчеркивается, что современная эффективная диспетчеризация водного транспорта подразумевает реалистичный баланс между целями навигационной (геопространственной) безопасности и производственными задачами.

Рассмотрены возможности ситуационного управления, реализуемые в рамках диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта, которые позволяют добиться повышения результативности и улучшения качества эксплуатации флота страны. Отмечается, что диспетчеризация пространственными процессами водного транспорта с использованием средств ситуационного управления и цифровых картографических наборов данных тесно связана с воплощением в жизнь более развитой модели обработки данных в комплексах автоматизации управления движением судов водного транспорта. Предлагаемая в данной статье модель ориентирована, в частности, не на обработку данных о каждом судне, а на отслеживание пространственных ситуаций на фоне данных о географическом театре, а также оценку их опасности. Именно в этом представляется реализация информационной составляющей ситуационного управления для диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта, и ее содержательному раскрытию посвящена данная статья.

Ключевые слова: диспетчеризация геопространственных процессов, ситуационное управление, цифровые картографические данные, пространственные данные, водный транспорт.

Для цитирования:

Ивакин Я. А. Модель поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 842–855. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-842-855.

Введение (Introduction)

Рост интенсивности и объемов перевозки водным транспортом, значительное увеличение масштаба компьютеризации систем управления водным видом транспорта и его диспетчеризации потребовали новых подходов и методов поддержки управления этими процессами. Постоянное усложнение диспетчерской деятельности в сочетании с качественным ростом возможностей современной вычислительной техники, а также широкое внедрение программных средств поддержки управленческих решений на базе цифровых картографических наборов данных определили задачи совершенствования поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе современных принципов интеллектуальной обработки информации, в качестве которых в рамках предлагаемой модели рассмотрены механизмы ситуационного управления.

Диспетчеризация в рамках этой модели представлена процессом выявления некоторых нештатных ситуаций в ходе всех существующих диспетчеризируемых пространственных процессов водного транспорта. Под штатной ситуацией подразумевается ситуация, отвечающая некоторому регламенту протекания геопространственных процессов, а под нештатной, соответственно, не соответствующая этому регламенту. Цель диспетчеризации состоит в своевременном выявлении и предотвращении нештатных ситуаций на всем множестве контролируемых геопространственных процессов водного транспорта. Множество контролируемых геопространственных процессов, как правило, ограничено в геопространстве, во времени или в номенклатуре объектов водного транспорта.

Традиционный подход к навигационному обеспечению безаварийности судов сводится к анализу в навигационном пространстве. Базовый принцип функционирования современных систем диспетчеризации водного транспорта заключается в непрерывном прогнозировании дистанции

расхождения судов водного транспорта относительно друг друга, а также иных навигационных препятствий, которая должна превышать некоторую безопасную дистанцию сближения. Прогнозирование ситуации расхождения судов на менее безопасную дистанцию является событием обнаружения опасности, чреватой аварийной ситуацией. В этом случае диспетчер (оператор) вмешивается своим управляющим воздействием, добиваясь увеличения указанной дистанции расхождения судов водного транспорта до безопасной. Проведенное в источнике [1] исследование показало, что текущий уровень оснащенности диспетчеров объектов водного транспорта (операторов Санкт-Петербургского морского канала, операторов систем автоматизированной проводки в узкостях и др.) средствами поддержки диспетчеризации пространственных процессов указанного вида транспорта недостаточен. Именно с учетом этого требования сделано заключение о необходимости привития функциональности системного управления диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на базе широкого применения цифровых картографических наборов данных.

Повышение результативности и улучшение качества диспетчеризации пространственными процессами водного транспорта с использованием средств ситуационного управления и цифровых картографических наборов данных тесно связано с воплощением в жизнь более развитой модели обработки данных в комплексах автоматизации управления движением судов водного транспорта. Предлагаемая модель ориентирована, в частности, не на обработку данных о каждом судне, а на отслеживание пространственных ситуаций на фоне имеющейся информации о процессах, происходящих на водном транспорте, а также оценку их опасности. Именно в этом представляется реализация информационной составляющей ситуационного управления водного транспорта.

Детальное раскрытие обоснования и сути функциональной модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта с учетом использования современных технологий работы с цифровыми картографическими наборами данных составляет суть предлагаемой статьи, имеющей полемический характер, которая может найти практическое применение после проработки вопросов с отраслевыми специалистами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Автоматизированные системы диспетчеризации пространственных процессов (АСДПП) водного транспорта — вид автоматизированных систем управления, выделяемый по следующим признакам:

1. Объектом управления в данном случае являются геопространственные процессы как результат человеческой деятельности. Под геопространственным процессом понимается процесс, который развивается одновременно во времени и в географическом пространстве, представляющий собой упорядоченную во времени совокупность географических позиций управляемых судов водного транспорта.

2. Целью диспетчеризации является безопасность и эффективность взаимодействия объектов водного транспорта, реализующих геопространственный процесс, с элементами и явлениями непосредственно самого пространства и другими судами в нем.

3. Данные системы реализуют свою функциональность в масштабе времени, близком к реальному.

4. АСДПП обладают широким охватом контролируемого географического пространства.

5. АСДПП имеют многоуровневую распределенную инфотелекоммуникационную и функционально-техническую структуру.

6. Для АСДПП характерным является наличие в их составе комплексов мониторинга за состоянием контролируемого геопространства, а также средств информационной и аналитической поддержки диспетчеров, операторов и должностных лиц.

Современная АСДПП водного транспорта является информационно-интеллектуальной системой распределенного типа, предназначенной для достижения навигационной безопасности и роста экономичности водного транспорта путем автоматизации подпроцессов оперативного планирования, сбора, обработки и отображения данных, получаемых от собственных средств

зондирования и мониторинга обстановки географии перевозок, а также по каналам связи от систем независимого наблюдения и гидрометеоинформации [2]. В этом случае в рамках концепции АСДПП процесс диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта является согласованной реализацией функциональности контроля и геопространственной координации управления движением судов с целью достижения максимальных показателей эффективности, планов перевозок и других параметров при безусловном соблюдении требований навигационной безопасности. Особенность диспетчеризации водного транспорта состоит в постоянном изменении обстановки, корректируемости и некоторой противоречивости графиков, схем движения судов и др.

Необходимо дать пояснение о различии смежных, но не эквивалентных по смыслу понятий, таких как «управление» и «диспетчеризация» для геопространственных процессов водного транспорта. Под диспетчеризацией понимается особый вид деятельности по управлению протеканием геопространственных процессов в соответствии с установленным регламентом или «штатом», т. е. диспетчеризация является специфической составляющей более многогранного процесса управления. Иными словами, управление — это сложный многоэтапный процесс, учитывающий множество различных аспектов в функционировании систем водного транспорта, а именно: эффективность, навигационная безопасность, безаварийность функционирования и т. д., а диспетчеризация — это частная составляющая управления, связанная с максимизацией одной приоритетной задачи в целях функционирования водного транспорта.

Основными задачами диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта с применением АСДПП являются [3]:

- недопущение столкновений между судами водного транспорта;
- недопущение столкновения судов с навигационными препятствиями;
- поддержание требуемого темпа потока движения водного транспорта в узкостях и на каналах лоцманской проводки;
- оперативное предоставление данных для обеспечения процессов принятия решений по безопасной и эффективной проводке судов водного транспорта;
- своевременное уведомление поисково-спасательных служб о фактах аварий объектов водного транспорта и оказание этим службам информационно-логистической поддержки.

На сегодняшний день диспетчеризация водного транспорта в целом реализует принципы, подходы и концепции современной теории управления. Традиционная парадигма этой теории имеет такое видение объекта исследования, для которого схема управления представляется «контуром управления», т. е. взаимосвязанной совокупностью субъекта управления, управляющих воздействий, объекта управления и обратной связи. При этом принимается, что субъект располагает некоторой адекватной моделью объекта управления, что позволяет ему прогнозировать последствия управляющих воздействий с определенной степенью точности. Однако сложные объекты управления, такие как совокупность пространственных процессов водного транспорта на определенной акватории, ведут к необходимости учета в ходе управления сотен параметров и критериев, тысяч фактов, большого числа решающих правил. Данное обстоятельство является основанием для того, чтобы свести управление (процедуру диспетчеризации) не к классическому «контурному управлению» (в силу того, что не представляется возможным заранее описать все состояния объекта управления, ограничить варианты управляющих воздействий и связать их с ответной реакцией на управление), а к рассмотрению системы управления в качестве открытой системы. Ранее изложенное предопределяет необходимость использования описания типовых ситуаций в управлении объектом указанного типа, что в данном случае вызывает изменение не только непосредственно процедуры управления (диспетчеризации водного транспорта), но ее принципов, организации и самого подхода.

Метод управления, базирующийся на использовании понятия и сущности «ситуация», классификации таковых и их взаимном преобразовании, традиционно принято называть *методом ситуационного управления*, а соответствующий подход в теории управления — *ситуационным*

подходом к управлению [4]. Именно этот подход положен в основу разработанной и предлагаемой в данной работе логико-информационной модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления.

Методологические основы моделирования диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления заключаются в возможности ситуационного подхода многократно усложнить информационно-аналитические модели диспетчеризируемых геопроцессов, отказаться от строгой детерминированности, придать им стохастический характер, расширить их адаптивность. В результате номенклатура показателей, описывающих диспетчеризируемый геопроцесс, увеличилась так, что психофизиологические возможности диспетчера в оперативной обработке данных перестали ей соответствовать, т. е. диспетчер оказался неспособным быстро анализировать и корректировать все параметры геопространственных процессов, диспетчеризируемых через АСДПП. Именно данное обстоятельство определяет необходимость разработки предлагаемой модели на принципах ситуационного подхода [5].

Диспетчеризируемый геопространственный процесс в предлагаемой модели представляется как соответствующий процесс создания пространственных ситуаций в географическом пространстве. Термином «ситуация» при этом обозначается некоторое соотношение текущих параметров движения диспетчеризируемого объекта водного транспорта и окружающей его среды. Многообразие таких ситуаций условно может быть разделено на следующие классы: ситуации штатные и ситуации нештатные. Под *штатной* понимается ситуация, соответствующая некоторой законной норме, введенному регламенту протекания, а под *нештатной* — не соответствующая. При таком варианте рассмотрения необходимо оперативно контролировать уже не всю номенклатуру параметров диспетчеризируемого геопространственного процесса, а только их соотношение, которое задает принадлежность наблюдаемой навигационной геопространственной ситуации к классу штатных или нештатных ситуаций. Суть такого представления диспетчеризируемых геопространственных процессов отражена на рис. 1.

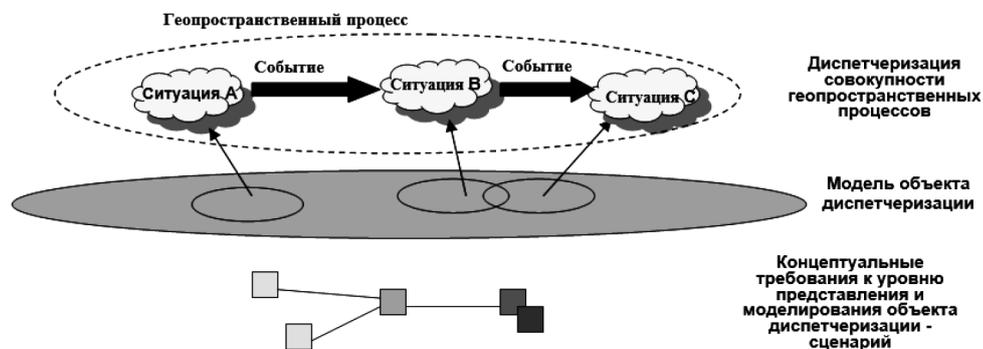


Рис. 1. Ситуационное представление диспетчеризируемого геопространственного процесса

Целью ситуационного представления диспетчеризируемого геопространственного процесса является обеспечение возможности более полного (всестороннего) анализа хода и прогнозирования геопространственного процесса путем моделирования указанных ситуаций с целью благоприятного разрешения каждой из них. Это позволяет на основе уже имеющихся знаний и накопленных априорных данных о ходе развития текущей ситуации с диспетчеризируемым объектом водного транспорта в прошлом четко определить ее будущее развитие. Данная цель хорошо сочетается с современной концепцией развития перспективных АСДПП водным транспортом, предусматривающей эффективное управление и диспетчеризацию сложными транспортными объектами. Она позволяет показать воплощение принципов ситуационного управления в функциональной архитектуре АСДПП водным транспортом, и, соответственно, принять ситуационное управление как теоретическую платформу для синтеза предлагаемой модели.

Использование в ситуационном представлении диспетчеризируемого геопространственного процесса не программных подмоделей, изоморфных к реальным объектам (пространственным процессам), а сценарных комбинаций подмоделей ситуаций, в которых проявляются значимые свойства объекта диспетчеризации, задает множество специфических особенностей для разработки соответствующего прикладного программного обеспечения АСДПП водным транспортом.

Отличительной особенностью такого прикладного программного обеспечения является отсутствие логически завершенного (финитного) сценария реализации геопространственных ситуаций, характерных для диспетчеризируемого пространственного процесса. Синтез сценариев полных геопространственных процессов из набора разноуровневых моделей ситуаций диспетчеризации, и, соответственно, донастройка параметров таких моделей ситуаций является прерогативой деятельности диспетчера или придаваемой ему системы интеллектуализации его поддержки. Управление функциональностью упорядоченного множества интерактивных программных компонентов подмоделей ситуаций является сложным программным процессом. В силу этого в состав прикладного программного обеспечения систем диспетчеризации интегрируются средства CASE-разработки сценариев и указанные базы интерактивных, динамически подключаемых программных библиотек. По существу, сценарии есть упорядоченные совокупности знаний о специфике развития типов навигационных ситуаций в зависимости от действий, инициируемых диспетчером в текущей геопространственной ситуации.

Результаты (Results)

Ранее изложенное представление диспетчеризируемого геопространственного процесса дает возможность рассматривать диспетчеризацию как процесс выявления нештатных ситуаций на всем множестве диспетчеризируемых геопространственных процессов в контролируемой акватории. Тогда прагматической целью диспетчеризации будут служить заблаговременное выявление и предотвращение нештатных ситуаций на контролируемом множестве геопространственных процессов. При этом контролируемое множество геопространственных процессов должно быть ограничено в географическом пространстве, времени и по номенклатуре диспетчеризируемых объектов водного транспорта.

Обычно анализ навигационной безаварийности судов заключается в расчете и назначении безопасной дистанции сближения с каждым из встречных судов. Диспетчеризация водного транспорта сегодня представляет собой непрерывный анализ и пересчет дистанций расхождения судов относительно друг друга, а также иных навигационных препятствий, которые должны превышать безопасную дистанцию сближения [6]. Прогнозирование факта наступления ситуации расхождения судов на дистанции менее дистанции безопасного сближения является выявлением опасности, т. е. навигационной аварийной ситуации. В этом случае диспетчер должен вмешиваться своим управляющим воздействием, добиваясь увеличения дистанции реального расхождения судов до безопасной дистанции сближения.

Традиционный уровень обеспеченности диспетчеризации водного транспорта методами и инструментарием быстрого анализа и поддержки диспетчерских решений очевидно недостаточен. Это прежде всего выражается в том, что диспетчер водного транспорта, разрешая одну текущую геопространственную ситуацию, должен давать управляющие воздействия для недопущения усугубления последующей пространственной ситуации [7]. В свою очередь, ситуационное представление диспетчеризируемого геопространственного процесса делает возможным по-другому логически организовать поддержку диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления. Исходя из ранее изложенного, рациональным является обобщение процедур диспетчеризации в некоторую ситуационную модель пространственного управления, эксплицированную на шкалу времени (рис. 2).

На основе рассмотренной ситуационной модели управления судами водного транспорта, реализующими соответствующие геопространственные процессы, становится очевидно, что диспетчеризация есть упорядоченная последовательность воздействий на подконтрольные силы и средства

с целью обеспечения штатного характера геопространственных ситуаций, органично вытекающих одна из другой. Учитывая, что в зависимости от воздействий диспетчера развитие геопространственной ситуации может иметь несколько исходов, происходит фиксация некоторой обусловленной последовательности ситуаций. Именно эту последовательность в рамках глоссария ситуационного управления понимают как «сценарий развития геопространственного процесса». При этом характерно, что ни одна пространственная ситуация сама по себе не содержит модель объекта диспетчеризации, но все множество ситуаций содержит ситуационно-описанную модель объекта диспетчеризации водного транспорта.

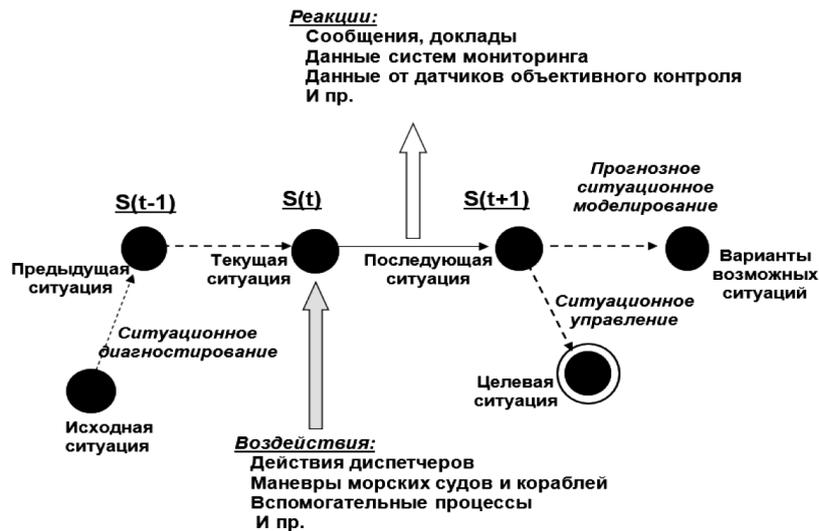


Рис. 2. Диспетчеризация геопространственных ситуаций во времени

Для информационно-расчетной и модельно-алгоритмической интеллектуальной поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления характерными являются следующие факторы:

1. Диспетчеризация геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления требует формирования и ведения априорной базы данных об объекте реализации геопространственного процесса, его функциональных особенностях и способах диспетчерского воздействия на него.

2. Необходимость формализованного описания типовых ситуаций, возникающих при диспетчеризации. Это описание должно быть выполнено на таком алгоритмическом языке, который позволяет отразить основные параметры и логические связи, существенные для классификации элементов данного описания. Важно рационально выбрать релевантный уровень описания ввиду следующих обстоятельств:

- при слишком подробном описании возникает «эффект шума», т. е. несущественные для управления факты значительно усложняют понимание сути ситуации;

- при слишком грубом описании может быть утрачена специфика классов и типов навигационных ситуаций.

3. Язык описания навигационных ситуаций при диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта должен давать возможность отражать качественные знания, которые не могут быть формализованы в обычном алгоритмическом смысле, т. е. это должен быть язык, позволяющий описывать знания в виде продукций, фреймов или семантических сетей.

4. Классификация навигационных ситуаций, объединение их в группы, типы и классы в случае применения одноэтапных диспетчерских решений происходит, как правило, на субъективной основе. Программная система поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления суммирует знания экспертов и специа-

листов, становясь базой коллективного опыта. При этом процедуры классификации должны быть построены так, чтобы такая классификация могла быть использована для тех навигационных ситуаций, о которых система поддержки диспетчеризации не получила данных и знаний от экспертов. Это ведет к тому, что классификация становится аналогичной задаче формирования базы понятий.

5. Системы поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления не могут рационализировать процесс диспетчеризации. Эти системы направлены на реализацию таких управленческих воздействий, когда достигаемые результаты будут не хуже лучших (эталонных) результатов, которые может получить человек.

6. Для многих геопространственных процессов водного транспорта одноэтапные решения не определяют стратегии диспетчеризации. При таких геопространственных процессах, как объекты диспетчеризации, необходимо формировать в качестве итоговых решений цепочки из одноэтапных решений. Именно таким образом формируются более сложные решения по диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления [8], [9].

Полная реализация указанных свойств в процессе поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления позволяет сделать вывод о возможности воплощения в жизнь предлагаемой модели. Дальнейшая ее детализация возможна по различным направлениям, что наглядно показано в работах [10], [11]. Схематично логическую структуру модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления на концептуальном уровне обобщения можно представить в виде рис. 3.

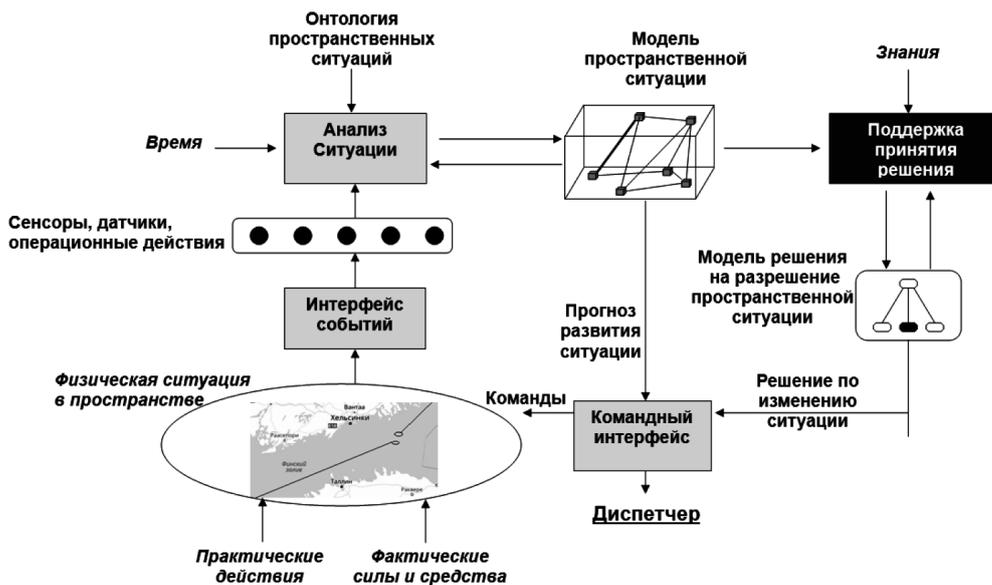


Рис. 3. Логическая структура модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления

Предлагаемая модель является основой для проектирования, разработки и создания интеллектуальных программных комплексов для АСДПП на основе использования передовых принципов ситуационного управления. Такие комплексы прикладного программного обеспечения обладают беспрецедентным уровнем технологической сложности реализации, так как они ориентированы прежде всего не на обработку данных о перемещении каждого судна, а на отслеживание пространственных ситуаций на фоне данных о географическом театре, а также оценку их опасности. Данные комплексы, как правило, имеют распределенную клиент-серверную архитектуру, включают ряд служебных баз данных, специализированный геоинформационный интерфейс пользователя и встроенную подсистему работы со знаниями. На сегодняшний день, как показывает анализ работ [12]–[14], устоявшейся архитектуры программных комплексов интеллектуальной поддерж-

ки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления не существует. Однако в качестве примера можно привести вариант архитектуры апробационного проекта авторов настоящего исследования программного комплекса поддержки диспетчерских решений по контролю за прибрежными акваториями (рис. 4).

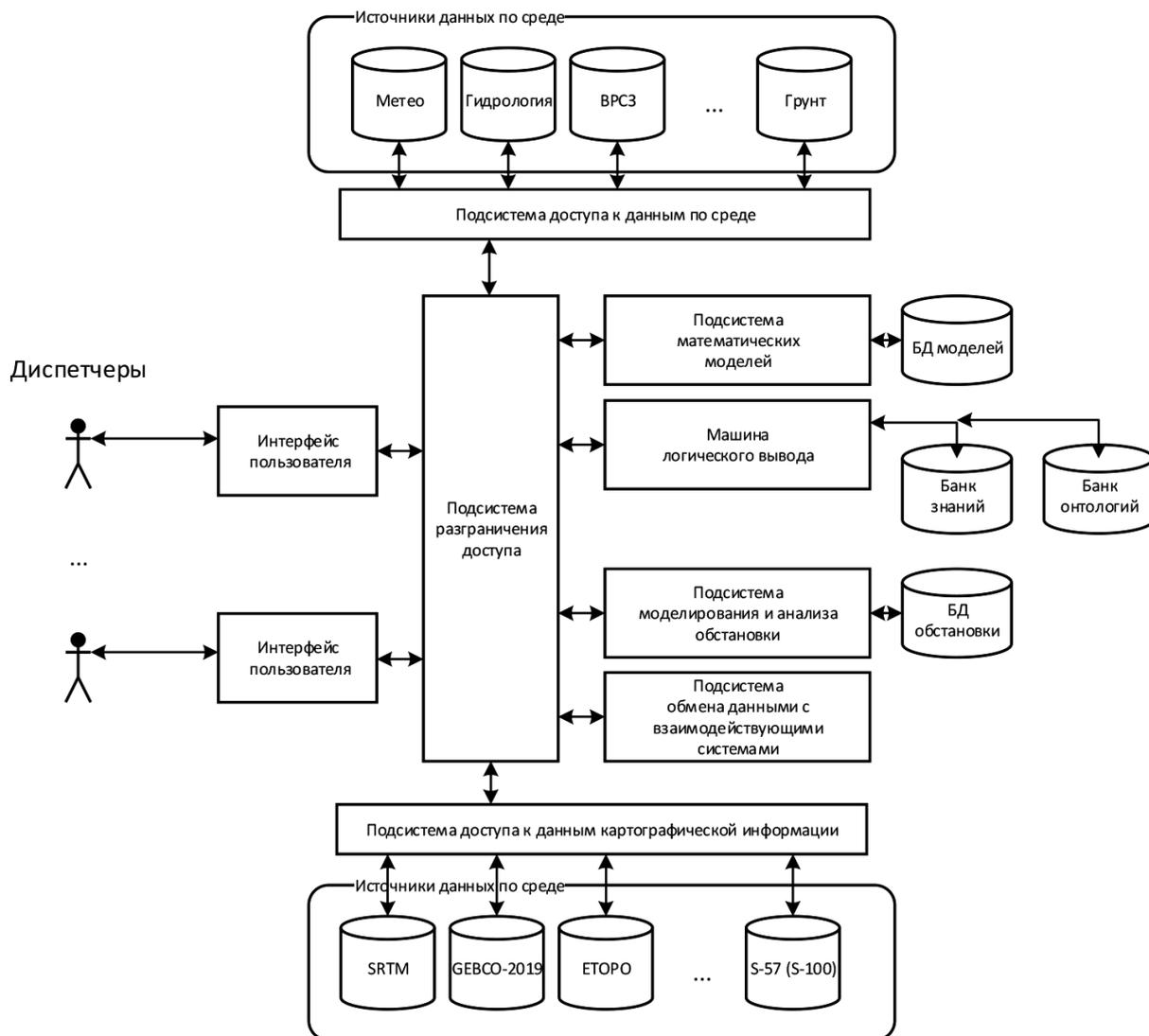


Рис. 4. Пример архитектуры программного комплекса поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления

Особую роль в рамках программных комплексов интеллектуальной поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления играет функциональность, связанная с применением цифровых картографических наборов данных. При этом в качестве базовой основы модели обстановки предполагается применение геопространственных данных. Информационная модель обстановки создается на основе данных составных частей и источников системы диспетчеризации пространственных процессов. Она представляет собой множество условных знаков геопространственных объектов, нанесенных на электронную карту и отображающих существование объектов реального мира, наличие инфраструктуры и природной среды в рамках заданного геопространственного района. Информационная модель обстановки — это базовая основа, на основе анализа которой выполняется определение класса складывающейся в процессе функционирования системы диспетчеризации пространственной ситуации. Также на ее основе производится прогноз развития пространственной ситуации и выра-

батываются диспетчерские воздействия, обеспечивающие решение заданного круга задач диспетчеризации в объективно складывающейся обстановке. Для формирования динамического аспекта обстановки используются системно обновляемые геопространственные данные. Такие цифровые данные могут применяться, поступая как от источников информации, так и после предварительной обработки экспертной системой специальными логико-математическими методами. Разработанные методы пространственного моделирования позволяют сегодня формировать на основе геопространственных данных как двух-, так и трехмерные модели обстановки. Таким образом, применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий позволяет более обоснованно принять диспетчерское решение о классе выявленной геопространственной ситуации, а также необходимости применения диспетчерских воздействий на контролируемые пространственные процессы.

Обсуждение (Discussion)

Возможности и ожидаемый эффект от реализации модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления необходимо рассматривать в тесной связи с этапами развития идеологии ситуационной диспетчеризации, обобщенно описанной, например, в источниках [15]–[17]. Это определяется тем, что знания и представления специалистов об уровне и значимости интеллектуальной поддержки диспетчеризации геопространственных процессов в АСДПП водным транспортом изменялись по ходу развития технологий разработки программного обеспечения, улучшения методов и средств интеллектуализации диспетчеризации и совершенствования искусственного интеллекта как самостоятельного научного направления.

Необходимо констатировать, что общепризнанной и внутренне взаимосвязанной теоретической платформы для реализации принципов и методов ситуационного управления геопространственными процессами водного транспорта, а также совершенствования соответствующих программных комплексов на сегодняшний день не существует. Методология диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления строго не структурирована и формируется по междисциплинарному принципу. В силу этого основные научные результаты этого направления исследований во многом имеют несистемный характер, что, в свою очередь, определяет эмпирический путь развития многих перспективных прикладных программных и информационных технологий ситуационного управления пространственными процессами. Повышение результативности программных комплексов поддержки ситуационного управления в диспетчеризации следует рассматривать в качестве базового фактора совершенствования и развития АСДПП водным транспортом в целом. Этот вывод обусловлен экспоненциальным ростом интеллектуально-управленческой нагрузки на диспетчеров водного транспорта, находящихся на различных прибрежных акваториях и при разной географии интенсивных перевозок. Добиться такого повышения возможно за счет внедрения научно-обоснованных и апробированных схем организации соответствующей интеллектуальной поддержки диспетчеризации, опирающейся на широкое использование цифровых картографических наборов пространственных данных при разработке соответствующего программного обеспечения: от концептуальной постановки до сдачи заказчику в эксплуатацию.

При существующей интенсивности трафика водного транспорта и перспективах его роста системы и технологии диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления находят все большее применение. Конструктивное начало этого применения определяется рассмотрением множества геопространственных процессов как некоторой последовательности геопространственных навигационных ситуаций, вытекающих органично одна из другой и требующих оперативного пространственно-корректного и безопасного разрешения. Постоянный учет того, что в прямой зависимости от текущих диспетчерских решений развитие навигационной ситуации может приобретать несколько вариантов исходов, приводит к появлению фиксированного ряда так называемых *производных ситуаций*. Данное

обстоятельство и составляет конструктивную суть диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления.

Данный способ решения на практике реализуется в использовании возможностей соответствующих программных комплексов интеллектуальной поддержки деятельности диспетчеров водного транспорта на конкретных акваториях. Именно в качестве методологической основы для системного проектирования и создания архитектуры таких программных комплексов и предлагается разработанная и представленная модель. Научный характер модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления определяется ее общностью для релевантного класса автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов на соответствующих водных акваториях, обобщением совокупности субмоделей и технологий ситуационного управления для условий процесса создания, комплексирования и сопровождения перспективных программно-информационных систем диспетчеризации.

В свою очередь, перспективность разработки и развертывания новых АСДПП геопространственных процессов водного транспорта определяется прежде всего реализацией новейших компьютерных технологий в современных интеллектуальных моделях диспетчеризации и средствах поддержки соответствующих решений в вопросах оперативного обеспечения навигационной безопасности судов. В современном понимании понятие «качество диспетчеризации» базируется на результативности ситуационного управления и возможностях реализации перспективных моделей ситуационного управления. Представленная логическая архитектура программных комплексов поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе ситуационного управления, а также результаты ее практической апробации позволяют сделать вывод о реализуемости предлагаемого методологического подхода. На основе ранее описанного подхода к ситуационному моделированию геопространственных процессов водного транспорта возможна реализация соответствующей схемы применения цифровых картографических наборов данных для интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов, а также определение основных способов, необходимых для реализации ее функциональности. Представленная на рис. 4 типовая архитектура приложения учитывает возможности интеграции цифровых картографических наборов данных в составе систем интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование предлагаемой модели поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта дает новые потенциальные возможности для внедрения методик ситуационного управления в сфере организации и логистики навигации судов. Разработанную модель наиболее эффективно в дальнейшем использовать в качестве методологического инструментария (базиса) инженера-системотехника, инженера-программиста, применяемого в ходе проектирования и разработки прикладного программного обеспечения подсистем ситуационного управления перспективных автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов водного транспорта.

2. Очевидна также перспективность дальнейшей адаптации методов, моделей и методик интеллектуальной поддержки диспетчеризации для различных вариантов интеграции цифровых картографических наборов пространственных данных. Данный подход уже сегодня является предметом интереса специалистов в области создания геоинформационных приложений для социкиберфизических систем, что подтверждается публикациями [18], [19]. Он может быть интересен специалистам по автоматизации управления водным транспортом, а также исследователям, использующим цифровые картографические наборы геопространственных данных в решении задач диспетчеризации речного и других видов транспорта.

3. Дальнейшие направления моделирования поддержки диспетчеризации геопространственных процессов водного транспорта на основе принципов и методов ситуационного управления связаны с постановкой и решением задачи поиска оптимальных методик классификации и распознавания опасных ситуаций для объектов водного транспорта, систематизации признаков различных опасностей, практического внедрения конкретных способов и приемов разрешения навигационных ситуаций и др. Очевидная перспективность этих направлений деятельности позволяет прогнозировать появление большого объема исследовательских научных работ по внедрению методов ситуационного управления в автоматизированные системы диспетчеризации геопространственных процессов на морском и речном транспорте.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-07-00437).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Д. А.* Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий индустрии 4.0 / Д. А. Иванов, М. А. Иванова, Б. В. Соколов // Труды СПИИРАН. — 2018. — № 5 (60). — С. 97–127. DOI: 10.15622/sp.60.4.
2. *Ивакин Я. А.* Автоматизированные системы ситуационного управления и диспетчеризации пространственных процессов на авиатранспорте / Я. А. Ивакин, С. В. Мичурин, М. С. Смирнова // Радиотехнология. — 2015. — № 4. — С. 56–64.
3. *Мичурин С. В.* Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта / С. В. Мичурин, Я. А. Ивакин // Информационно-управляющие системы. — 2016. — № 4 (83). — С. 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
4. *Муся А. М.* Обеспечение эффективности геоинформационных систем управления пространственными процессами / А. М. Муся, Я. А. Ивакин // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Системы и средства отображения информации и управления спецтехникой. — 2015. — № 1. — С. 151–159.
5. *Курейчик В. В.* Муравьиный алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией / В. В. Курейчик, М. А. Жиленков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. — 2015. — № 2 (22). — С. 10–12.
6. *Печенкин В. В.* Прикладные аспекты использования алгоритмов ранжирования для ориентированных взвешенных графов (на примере графов социальных сетей) / В. В. Печенкин, М. С. Королёв, Л. Б. Дмитриев // Труды СПИИРАН. — 2018. — № 6 (61). — С. 4. DOI: 10.15622/sp.61.4.
7. *Юсупов Р. М.* Концептуальные и научно-методологические основы информатизации / Р. М. Юсупов, В. П. Заболотский. — СПб.: Наука, 2016. — 542с.
8. *Воротников В. И.* Метод линеаризующей обратной связи в задаче управления по части переменных при неконтролируемых помехах / В. И. Воротников, А. В. Вохмянина // Труды СПИИРАН. — 2018. — № 6 (61). — С.3. DOI: 10.15622/sp.61.3.
9. *Ajwani D.* Average-case analysis of incremental topological ordering / D. Ajwani, T. Friedrich // Discrete Applied Mathematics. — 2010. — Vol. 158. — Is. 4. — Pp. 240–250. DOI: 10.1016/j.dam.2009.07.006.
10. *Мичурин С. В.* Структурирование информационных показателей безаварийности пространственных процессов / С. В. Мичурин // Вопросы радиоэлектроники. — 2016. — № 9. — С. 45–48.
11. *Dobrowski J.* Real-time Web-based GIS for Analysis, Visualization, and Integration of Marine Transport Environment Data / J. Dobrowski, M. Kulawiak, M. Moszynski, K. Bruniecki, L. Kaminski, A. Chybicki, A. Stepnowski // Information Fusion and Geographic Information Systems. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. — Pp. 277–288. DOI: 10.1007/978-3-642-00304-2_19.
12. *Ивакин Я. А.* Взвешивание иерархии показателей оценки качества программно-аппаратных комплексов данных / Я. А. Ивакин [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. — 2017. — № 5. — С. 103–107.
13. *Ивакин Я. А.* Обеспечение качества программно-аппаратных комплексов для центров хранения и обработки данных / Я. А. Ивакин [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. — 2018. — № 3. — С. 145–150.
14. *Дюваль П. М.* Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска / П. М. Дюваль, С. Матиас, Э. Гловер. — СПб.: Символ, 2016. — 240 с.

15. Watson D. F. *A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data* / D.F. Watson. — Oxford Pergamum Press, 2009. — 321 p.
16. Walford N. *Geographical Data Analysis* / N. Walford. — 1st edition. — Wiley, 1995. — 458 p.
17. White F. E. A model for data fusion / F.E. White // Proc. 1st National Symposium on Sensor Fusion. — 1988. — Vol. 2. — Pp. 149–158.
18. Ammar A. B. Query optimization techniques in graph Databases // International Journal of Database Management Systems (IJDMS). — 2016. — Vol. 8. — No. 4. DOI: 10.5121/ijdms.2016.8401.
19. Sarma A. D. Fast distributed pagerank computation / A. D. Sarma, A. R. Molla, G. Pandurangan, E. Upfal // Theoretical Computer Science. — 2015. — Vol. 561. — Pp. 113–121. DOI: 10.1016/j.tcs.2014.04.003/.

REFERENCES

1. Ivanov, Dmitry Alexandrovich, Marina Alexandrovna Ivanova, and Boris Vladimirovich Sokolov. “Analysis of transformation trends in enterprise management principles in the era of industry 4.0 technology.” *SPIIRAS Proceedings* 5(60) (2018): 97–127. DOI: 10.15622/sp.60.4.
2. Ivakin, Ya.A., S.V. Michurin, and M.S. Smirnova. “Automated systems for situational management and dispatching of air transport spatial processes.” *Radio industry* 4 (2015): 56–64.
3. Michurin, S.V., and Ya.A. Ivakin. “The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes.” *Information and Control Systems* 4(83) (2016): 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
4. Musya, A.M., and Ya.A. Ivakin. “Obespechenie effektivnosti geoinformatsionnykh sistem upravleniya pro-stranstvennymi protsessami.” *Voprosy radioelektroniki. Se-riya: Sistemy i sredstva otobrazheniya informatsii i upravleniya spetstekhnikoi* 1 (2015): 151–159.
5. Kureichik, Vladimir Victorovich, and Mikhail Aleksandrovich Zhilenkov. “ANT COLONY algorithms for solving optimization problems with the explicit objective function.” *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* 2(22) (2015): 10–21.
6. Pechenkin, Vitaly Vladimirovich, Mikhail Sergeevich Korolev, and Lyubomir Vankov Dimitrov. “Applied aspects of ranking algorithms for oriented weighted graphs (on the example of social network graphs).” *SPIIRAS Proceedings* 6(61) (2018): 4. DOI: 10.15622/sp.61.4.
7. Yusupov, R.M., and V.P. Zabolotskii. *Kontseptual'nye i nauchno-metodologicheskie osnovy informatizatsii*. SPb.: Nauka, 2016.
8. Vorotnikov, Vladimir Il'ich, and Anastasiya Vladimirovna Vokhmyanina. “Feedback linearization method for problem of control of a part of variables in uncontrolled disturbances.” *SPIIRAS Proceedings* 6(61) (2018): 3. DOI: 10.15622/sp.61.3.
9. Ajwani, Deepak, and Tobias Friedrich. “Average-case analysis of incremental topological ordering.” *Discrete Applied Mathematics* 158.4 (2010): 240–250. DOI: 10.1016/j.dam.2009.07.006.
10. Michurin, S. “Structuring of information indexes of spatial processes fail-safety.” *Voprosy radioelektroniki* 9 (2016): 45–48.
11. Dąbrowski, Jacek, Marcin Kulawiak, Marek Moszyński, Krzysztof Bruniecki, Łukasz Kamiński, Andrzej Chybicki, and Andrzej Stepnowski. “Real-time web-based GIS for analysis, visualization and integration of marine environment data.” *Information Fusion and Geographic Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. 277–288. DOI: 10.1007/978-3-642-00304-2_19.
12. Ivakin, Ya. A., E. G. Semenova, S. A. Morozov, and M.G. Smirnova. “Deliberation of the hierarchy of indicators for assessing the quality of software and hardware systems.” *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series I. Natural and technical science* 5 (2017): 103–107.
13. Ivakin, Ya. A., S. A. Morozov, V. M. Balashov, and M. S. Smirnova. “Quality assurance of software and hardware complexes for data storage and processing centers.” *Voprosy radioelektroniki* 3 (2018): 145–150.
14. Dyuvai', P.M., S. Matias, and E. Glover. *Nepreryvnaya integratsiya. Uluchshenie kachestva programmogo obespecheniya i snizhenie riska*. SPb.: Simvol, 2016.
15. Watson, D. F. *A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Oxford Pergamum Press, 2009.
16. Walford, Nigel. *Geographical Data Analysis*. 1st edition. Wiley, 1995.
17. White, Franklin E. “A model for data fusion.” *Proc. 1st National Symposium on Sensor Fusion*. Vol. 2. 1988. 149–158

18. Ammar, Ali Ben. "Query optimization techniques in graph Databases." *International Journal of Database Management Systems (IJDMs)* 8.4 (2016). DOI: 10.5121/ijdm.2016.8401/
19. Sarma, A.D., A.R. Molla, G. Pandurangan, and E. Upfal. "Fast distributed pagerank computation." *Theoretical Computer Science* 561 (2015): 113–121. DOI: 10.1016/j.tcs.2014.04.003/

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивакин Ян Альбертович —
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14-я линия В. О., 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Чкаловский пр., 46
e-mail: ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
В. О., 14-я линия, 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Чкаловский пр., 46
e-mail: potapychev@mail.ru

Ивакин Роман Янович —
инженер-исследователь НИИ «Технологии связи»
Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций имени профессора
М. А. Бонч-Бруевича
193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, 22, корп. 1
e-mail: romanivakin2018@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivakin, Yan A. —
Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy
of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226,
Russian Federation
e-mail: ivakin@oogis.ru

Potapychev, Sergei N. —
PhD,
senior researcher
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy
of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226,
Russian Federation
e-mail: potapychev@mail.ru

Ivakin, Roman Ya. —
Engineer- Researcher
of SRI "Technologies of Telecommunication"
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University
of Telecommunications
22/1 Bolshevikov Av., St. Petersburg, 193232,
Russian Federation
e-mail: romanivakin2018@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 13 мая 2019 г.
Received: May 13, 2019.*

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866

ACCOUNTING THE IMPACT OF HYDROGRAPHIC STUDIES ON THE SAFETY OF NAVIGATION OF LARGE-TONNAGE VESSELS IN THE NORTHERN SEA ROUTE WATER AREA

E. V. Andreeva, K. Y. Esaulova, A. L. Tezиков

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

The problem of ensuring the safe navigation of large-tonnage vessels on high-altitude routes in the conditions of insufficient hydrographic study of the bottom relief of the Northern Sea Route water area is discussed in the paper. The problem of determining the safe movement of the vessel in the conditions of insufficient hydrographic study of the bottom relief of the water area is being solved. The basic data on the volume and directions of maritime freight carried by large-tonnage vessels are given. The main trends of changes in the structure of the Arctic fleet, in the direction of sea traffic and in the navigation period of the vessels in the Arctic Seas are identified. The analysis of the conditions for shipping routes formation in the Kara Sea is implemented. The prospects for the development of the marine transport infrastructure of the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas, including a network of deep-water routes in the central and eastern sectors of the Arctic, have been determined. The quantitative characteristics of the existing sections of the main high-latitude route, which are a system of bands with a width of 2 km, each of which is more than 20 m deep, which is confirmed by the data of the bottom area survey, are presented. The information about the hydrographic study of the bottom relief of the areas directly adjacent to the route has been analyzed. The route sections are ranked according to the details of the bottom relief survey of adjacent areas. The sections of the route, around which there is no reliable information about the depths are established. The question of assessing the magnitude of the allowable deviation of the vessel from the route is investigated. An analytical review of scientific publications allows us to establish that in the existing methods for determining the permissible deviations, the detail of surveying the bottom topography of adjacent areas is not taken into account. A method for calculating the allowable deviations of vessels from the route, taking into account the information about the depth surrounding the route and the details of the hydrographic survey, on the basis of which such information is obtained, has been developed. The technique involves the use of nautical charts, as well as the hydrographic study of the bottom topography contained on them. The directions for further research are identified.

Keywords: Northern sea route, high-latitude routes, survey bandwidth, lateral deviations, insufficient hydrographic knowledge, survey details, mathematical model.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezиков. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.

УДК 528.47

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАВАНИЯ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков

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

Рассмотрена проблема обеспечения безопасного плавания крупнотоннажных судов по высокоширотным трассам в условиях недостаточной гидрографической изученности рельефа дна акватории

Северного морского пути. Решается задача определения полосы безопасного движения судна в условиях недостаточной гидрографической изученности рельефа дна акватории. Приведены основные данные по объему и направлениям морских грузоперевозок, выполняемых крупнотоннажными судами. Выявлены основные тенденции изменения структуры арктического флота, направления морских транспортных потоков и сроков навигационного периода работы судов в арктических морях. Выполнен анализ условий формирования судоходных маршрутов в Карском море. Определены перспективы развития морской транспортной инфраструктуры моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, включающей сеть глубоководных маршрутов в центральном и восточном секторе Арктики. Приведены количественные характеристики действующих участков основной высокоширотной трассы, представляющих собой систему полос, имеющих ширину 2 км, в пределах каждой из которых глубины превышают 20 м, что подтверждено данными площадного обследования дна. Проанализированы сведения о гидрографической изученности рельефа дна областей, непосредственно примыкающих к трассе. Выполнено ранжирование участков трассы в зависимости от подробности съемки рельефа дна примыкающих областей. Установлены участки трассы, вокруг которых достоверные сведения о глубинах отсутствуют. Исследован вопрос об оценке величины допустимого отклонения судна от трассы. Аналитический обзор научных публикаций позволил установить, что в существующих методах определения допустимых отклонений, подробность съемки рельефа дна примыкающих областей не учитывается. Разработана методика вычисления допустимых отклонений судов от трассы с учетом сведений об окружающих трассу глубинах и подробности гидрографической съемки, на основе которой такие сведения получены. Методика предполагает использование морских навигационных карт, а также содержащихся на них схем гидрографической изученности рельефа дна. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, высокоширотные трассы, ширина полосы обследования, боковые отклонения, недостаточная гидрографическая изученность, подробность съемки, математическая модель.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.

Введение (Introduction)

Развитие Северного морского пути (СМП) направлено на достижение целевых показателей, определенных в Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»¹. В соответствии с Указом Президента в 2024 г. общий объем морских арктических грузоперевозок должен достичь 80 млн т. В 2018 г. объем грузоперевозок по трассам СМП достиг 20 млн т, что превысило показатели 2017 г. почти в два раза. Основную долю всех грузов, составляющую более 86 %, перевезли крупнотоннажные суда, которые за год выполнили более 200 рейсов. К работе в 2018 г. было привлечено сорок танкеров и контейнеровозов, шестнадцать из которых работали в режиме круглогодичной навигации. Основу перевозок составил вывоз углеводородов с месторождений Карского моря в западном направлении по маршрутам, проходящим по относительно глубоководным и хорошо изученным в гидрографическом отношении участкам Карского моря. Перевозка грузов в восточном направлении в 2018 г. носила эпизодический характер. К 2030 г. объем грузоперевозок планируется довести до 125 млн т. Для достижения такого объема потребуется увеличить количество крупнотоннажных судов, а также развить существующую сеть судоходных маршрутов.

По сравнению с Карским морем навигационные условия развития сети маршрутов крупнотоннажных судов в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях отличаются большей сложностью, что связано с более суровыми ледовыми условиями, малыми глубинами и недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна [1], [2]. Составление и реализация плана развития маршрутов крупнотоннажных судов в акватории СМП возложены

¹ О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204.

на ФГУП «Гидрографическое предприятие»¹. В проект включены высокоширотные маршруты, предназначенные для плавания судов с осадкой до 15 м. Большая часть маршрутов проходит по мелководным районам, в которых систематическое обследование рельефа дна не выполнялось или выполнялось с недостаточной подробностью. Высокоширотные маршруты включают основную высокоширотную трассу и альтернативную. Общая протяженность основной трассы составляет 2812 миль, альтернативной — 1603 мили. Маршруты планируется вводить в эксплуатацию по мере проведения на них площадной гидрографической съемки, гарантирующей отсутствие на них опасных глубин. К началу летней навигации 2019 г. площадное обследование рельефа дна выполнено на участке основной трассы протяженностью 2563 мили в полосе шириной 2 км.

С учетом сложных ледовых условий и трудоемкости гидрографических работ до 2024 г. планируется завершить выполнение площадной съемки на всей протяженности основной и альтернативной трасс в полосе шириной 2 км. В дальнейшем ширину полосы обследования планируется увеличить до 10 км. Выход за пределы обследованной полосы связан с возможной посадкой судна на неизвестную мель, что подтверждается результатами исследований, обобщенных в работах [3]–[6].

Исследованию вопроса о допустимом отклонении судна от обследованной полосы посвящены работы [7]–[9], в которых разработана методика оценки предельного отклонения судна от рекомендованного маршрута, основанная на данных морфометрических характеристик рельефа дна арктических морей. В работах [7]–[10] оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы выполнена при условии, что за пределами обследованных полос сведения о глубинах полностью отсутствуют. В действительности, маршруты проходят по районам, в которых сведения о глубинах, как правило, все же имеются. Источником подобных сведений могут служить данные гидрографической съемки рельефа дна, выполненной в разные годы и с разной подробностью². Очевидно, что сведения об окружающих глубинах могут оказывать влияние на оценку допустимых отклонений судна от обследованных полос.

Задача о допустимом отклонении судов от обследованной полосы имеет важное практическое значение при планировании перехода крупнотоннажных судов в акватории СМП, а также при планировании перспективных гидрографических работ. Вместе с тем следует признать, что любое отклонение судна от обследованной полосы безопасным не является. По этой причине ширина обследованной полосы должна быть существенно расширена. Предложение ФГУП «Гидрографическое предприятие» расширить полосу обследования подводного рельефа с 2 км до 10 км на всей протяженности высокоширотных трасс нельзя признать оптимальным. Ширина полосы обследования на разных участках маршрута должна быть разной в зависимости от глубин и гидрографической изученности акватории.

Настоящая работа является продолжением исследований влияния гидрографической изученности акватории СМП на допустимые боковые отклонения от обследованного фарватера, выполняемые на кафедре гидрографии моря ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, в результате которых была разработана методика оценки отклонений от фарватера при условии полного отсутствия сведений о глубинах, окружающих фарватер с обеих сторон. Описание методики и результаты ее использования опубликованы в статье [10].

Целью настоящего исследования является разработка методики учета влияния сведений об окружающих фарватер глубинах на оценку допустимых отклонений крупнотоннажных судов от обследованных полос.

¹ ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 14.07.2019).

² Сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nsrp.ru/> (дата обращения: 12.07.2019).

Методы и материалы (Methods and Materials)

При выполнении оценки гидрографической обеспеченности основной высокоширотной трассы использовалась схема высокоширотных трасс, приведенная на сайте ФГУП «Гидрографическое предприятие», морские навигационные карты акватории СМП масштаба 1 : 500000¹, а также размещенные на них схемы гидрографической изученности акваторий, через которые проходит основная высокоширотная трасса. За основу была взята методика вычисления боковых уклонений от обследованной полосы [10] и полученные с ее использованием количественные оценки.

Методика учета влияния сведений об окружающих глубинах на оценку допустимых уклонений крупнотоннажных судов от обследованных полос имеет следующее обоснование. Для высокоширотных трасс крупнотоннажных судов, эксплуатируемых в акватории СМП, в качестве критической глубины Z_{cr} принимается значение их максимальной осадки. На прямолинейном участке фарватера шириной B_0 выполнена площадная съемка, гарантирующая обнаружение множества глубин Z_0 , каждая из которых превышает установленное предельное значение Z_{cr} :

$$\{Z_0 > Z_{cr}\} \in B_0. \quad (1)$$

Схема обследованной полосы с обозначениями ее основных элементов показана на рис. 1.

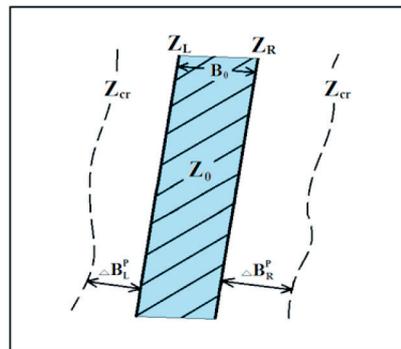


Рис. 1. Схема допустимых боковых уклонений от обследованной полосы

Глубины правой Z_R и левой Z_L краев обследованной полосы принадлежат множеству Z_0 , поэтому для них также выполняются условия:

$$\{Z_R > Z_{cr}\} \in B_0; \quad (2)$$

$$\{Z_L > Z_{cr}\} \in B_0. \quad (3)$$

В случае, когда сведения о глубинах, расположенных за внешними границами полосы B_0 , отсутствуют, при решении задачи используются вероятностные оценки. По мере удаления от полосы, глубины $Z \notin B_0$ могут отличаться от критического значения глубины Z_{cr} как в меньшую, так и в большую сторону. При оценке предельно допустимого уклонения используется условие перестраховки, согласно которому при уклонении от полосы вправо или влево от нее всегда может встретиться глубина Z , имеющая значение, меньшее, чем Z_{cr} .

В качестве предельно допустимого уклонения ΔB принимается минимальное расстояние вправо или влево от полосы, на котором глубина $Z \notin B_0$ с определенной вероятностью может принимать значение, равное Z_{cr} . Для определения допустимых уклонений в работе [10] предложено использовать формулы:

$$\Delta B_R^p = (Z_R - Z_{cr}) \cdot \text{ctg } \gamma_p^{\max}; \quad (4)$$

$$\Delta B_L^p = (Z_L - Z_{cr}) \cdot \text{ctg } \gamma_p^{\max}. \quad (5)$$

¹ Каталог карт и книг ГУНиО РФ. Северный Ледовитый океан. № 7107. СПб: ГУНиО, 2009. Путевые карты Карского моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря, Чукотского моря.

где γ_p^{\max} — предельное максимальное положительное значение угла наклона дна, полученное экспериментальным путем и соответствующее принятому уровню обеспеченности p ;

ΔB_R^p и ΔB_L^p — предельно допустимые уклонения от правой и левой кромок обследованной полосы, соответствующие принятому уровню обеспеченности p .

В формулах (4) и (5) в качестве постоянных величин принимаются параметры Z_{cr} и γ_p^{\max} , а в качестве переменных — измеренные глубины Z_R и Z_L . Из выражений (4) и (5) следует, что при увеличении Z_R или Z_L допустимые уклонения ΔB_R^p и ΔB_L^p возрастают, а при уменьшении глубин Z_R или Z_L показатели ΔB_R^p и ΔB_L^p уменьшаются. Предельно допустимые уклонения вправо и влево от обследованной полосы на рис. 1 отмечены пунктирными линиями.

С учетом ширины обследованной полосы B_0 и допустимых уклонений ΔB_R^p и ΔB_L^p ширина полосы маневрирования B_M определяется по формуле

$$B_M = B_0 + \Delta B_R^p + \Delta B_L^p. \quad (6)$$

В полосе B_0 отсутствие опасных глубин со значением менее Z_{cr} гарантируется с вероятностью, равной единице. В полосах ΔB_R^p и ΔB_L^p отсутствие опасных глубин гарантируется с принятым уровнем обеспеченности p .

Допустим, что участок обследованной полосы пересекает система параллельных промерных галсов G_i , где $i = 1, \dots, N$. Галсы отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии L , на каждом из которых измерено множество глубин Z_{Gi} . Схема взаимного расположения обследованной полосы и промерных галсов показана на рис. 2.

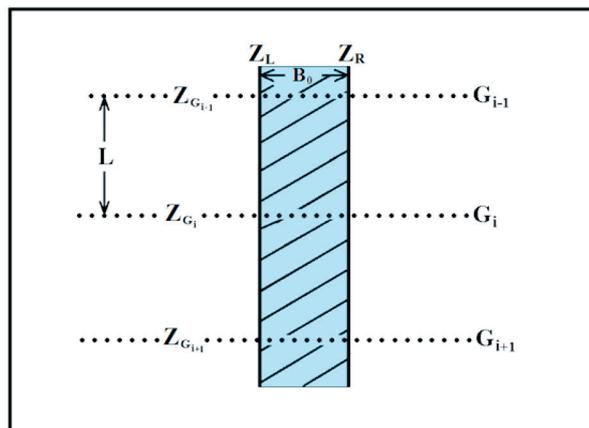


Рис. 2. Схема взаимного расположения обследованной полосы и промерных галсов

Глубины Z_{Gi} во внутренней области полосы B_0 совпадают с глубинами Z_0 , поэтому для них выполняется условие

$$[Z_{Gi} \in B_0] > Z_{cr}. \quad (7)$$

С учетом того, что при вычислении уклонений ΔB_R^p и ΔB_L^p по формулам (4) и (5) использовались условия перестраховки, можно утверждать, что для каждой глубины Z_{Gi} , попадающей во внутреннюю область полосы шириной $\Delta B_N^p = B_0 + \Delta B_R^p + \Delta B_L^p$, будет выполняться условие

$$[Z_{Gi} \in B_N^p] > Z_{cr}. \quad (8)$$

Следствием неравенства (8) является то, что дополнительная информация о глубинах за пределами полосы B_0 , позволяет на принятом уровне обеспеченности p расширить ширину полосы маневрирования. Уточненная ширина полосы безопасного маневрирования определяется выражением

$$B_M^* = B_0 + B_R^p + B_L^p. \quad (9)$$

В формуле (9) боковые уклонения B_R^p и B_L^p определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} B_R^p &= \Delta B_R^p + \left(Z_{GR} - Z_{cr} - \frac{L}{2} \operatorname{tg} \gamma_p^{\max} \right) \operatorname{ctg} \gamma_R; \\ B_L^p &= \Delta B_L^p + \left(Z_{GL} - Z_{cr} - \frac{L}{2} \operatorname{tg} \gamma_p^{\max} \right) \operatorname{ctg} \gamma_L, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где Z_{GR} и Z_{GL} — измеренные глубины в точках, отстоящих от правой и левой границ полосы B_0 на расстоянии ΔB_R^p и ΔB_L^p , соответственно, $Z_{GR} > Z_{cr}$ и $Z_{GL} > Z_{cr}$;

γ_R и γ_L — углы наклона дна по направлению галса вправо и влево от обследованной полосы.

Выражения (10) можно преобразовать к виду:

$$\left. \begin{aligned} B_R^p &= \Delta B_R^p + (Z_{GR} - Z_{cr}^*) \operatorname{ctg} \gamma_R; \\ B_L^p &= \Delta B_L^p + (Z_{GL} - Z_{cr}^*) \operatorname{ctg} \gamma_L, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где Z_{cr}^* — значение критической глубины с учетом поправки за гидрографическую изученность;

$$Z_{cr}^* = Z_{cr} + \frac{L}{2} \operatorname{tg} \gamma_p^{\max}.$$

Соотношения (11) удобно представить в виде рабочих формул:

$$\left. \begin{aligned} B_R^p &= \Delta B_R^p + \delta B_R(Z_{GR}, Z_{cr}^*); \\ B_L^p &= \Delta B_L^p + \delta B_L(Z_{GL}, Z_{cr}^*), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\delta B_R(Z_{GR}, Z_{cr}^*)$ и $\delta B_L(Z_{GL}, Z_{cr}^*)$ — соответственно горизонтальные расстояния, измеряемые на морских навигационных картах по линии галса между отметками глубин, значения которых приведены в круглых скобках.

Схема взаимного расположения границ допустимых боковых уклонов судна от полосы B_0 приведена на рис. 3.

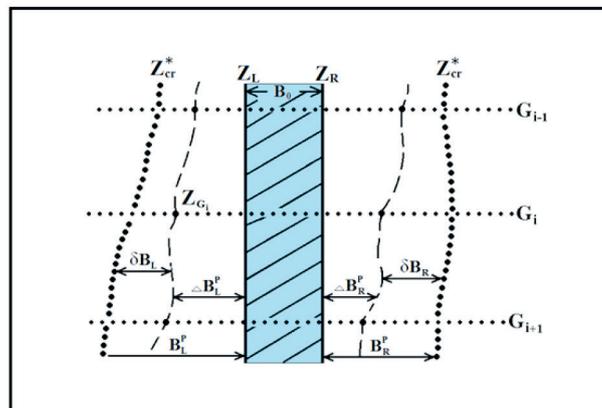


Рис. 3. Схема взаимного расположения границ допустимого уклона судна

Таким образом, измерение расстояний между отдельными точками на морских навигационных картах, соответствующих определенным значениям измеренных на галсах глубин, позволяет оценить влияние дополнительной информации о глубинах на допустимое безопасное уклонение судна от узкой обследованной полосы.

Результаты (Results)

Схема высокоширотных трасс показана на рис. 4 линиями синего цвета: пунктирные линии — альтернативная трасса, сплошные линии — основная трасса. Линии соответствуют полосам, имеющим ширину 2 км, в которых площадное обследование рельефа дна уже выполнено или будет выполнено. Цифрами на схеме обозначены границы прямолинейных участков основной трассы. Участки трассы, отмеченные цифрами от единицы до семи, проходят по Карскому морю,

участок трассы 7–8 относится к проливу Вилькицкого, участки 9–10, 10–11–8a, а также 11–13 относятся к акватории моря Лаптевых. Участки трассы 10a–15–16–17, а также 13–14–15 относятся к акватории Восточно-Сибирского моря. Участки трассы, проходящие по акватории Чукотского моря, на схеме не показаны.

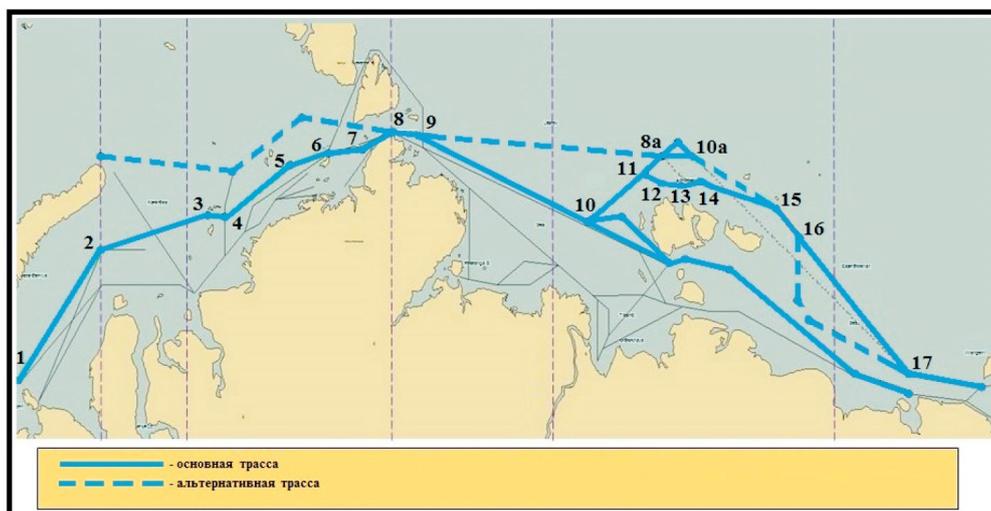


Рис. 4. Схема высокоширотных трасс

Обобщенные навигационно-гидрографические характеристики основной трассы приведены в таблице.

Навигационно-гидрографические характеристики основной высокоширотной трассы

Номера точек границ участков	Длина участка, км	Подробность съемки прилегающей акватории, м	Диапазон глубин, м	Допустимое уклонение $\Delta B_{R,L}^{0,95}$, км, при $Z_{CR} = 13$ м	Количественная оценка уклонения	
					$B_R^{0,95}$, км	$B_L^{0,95}$, км
1–2	570	500	44,0–50	9,7	>50	>50
2–3	360	1200	25,0–35	3,7	19	24
3–4	80	1200	45,6–50	10,2	10,2	10,2
4–5	250	500	27,4–40	4,5	6	6
5–6	130	1000	35,0–46	6,9	27	>50
10–8a	295	МП	24,4–26	3,6	3,6	3,6
8a–10a	100	МП	23,1–36	3,2	3,2	3,2
10a–15	245	МП	28,6–38	4,9	4,9	4,9
15–16	176	МП	22,4–29	3,0	3,0	3,0
16–17	625	МП	20,9–27	2,5	2,5	2,5
11–12	40	МП	20,6–28	2,4	2,4	2,4
12–13	25	2000	19,4–21	2,0	2,0	2,0
13–14	35	2000	21,0–23	2,5	2,5	2,5
14–15	270	2000	22,0–39	2,8	13	33

В графе 1 таблицы приведены номера прямолинейных участков трассы. В графе 2 показана протяженность каждого прямолинейного участка трассы, выраженная в километрах. В графе 3 приведены данные о подробности гидрографической съемки акватории, через которую проходят участки высокоширотной трассы. В качестве количественного показателя подробности гидрографической съемки в таблице использовано значение междугалсового расстояния, выраженное в метрах. На отдельных участках, в которых систематическая гидрографическая съемка рельефа

дна не выполнялась, подробность съемки обозначена аббревиатурой МП (маршрутный промер). В графе 4 приведен диапазон глубин в метрах. В графе 5 приведены оценки допустимых боковых уклонов $\Delta B_{R,L}^{0,95}$, которые получены при условии отсутствия информации об окружающих обследованную полосу глубинах. Значения боковых уклонов приведены в километрах. В графах 6 и 7 приведены оценки боковых уклонов $B_R^{0,95}$ и $B_L^{0,95}$, в которых учтены сведения об окружающих глубинах, полученных по результатам гидрографических работ прошлых лет. Значения уклонов приведены в километрах.

Обсуждение результатов (Discussion)

Сравнение данных, приведенных в графах 5–7 таблицы навигационно-гидрографических характеристик основной высокоширотной трассы, показывает, что допустимая величина уклонов существенно зависит от диапазона глубин и характера рельефа района, по которому проходит трасса. На мелководных участках значения уклонов уменьшаются, по мере увеличения глубин — возрастают. К участкам с относительно большой глубиной относятся участки 1–2, 3–4, 5–6 и 10а–15 (см. рис. 4), на которых уклоны $\Delta B_{R,L}^{0,95}$, приведенные в графе 5, превышают 4,9 км в обе стороны от трассы. Учет информации об окружающих глубинах и подробности съемки, на основе которой получена информация о глубинах, позволяет уточнить оценки уклонов.

По уточненным данным, на участках 1–2 и 5–6 оценки уклонов вправо и влево от трассы превысили 27 км. На участках 1–2 и 10а–15 оценки, приведенные в графах 6 и 7, не изменились по сравнению со значениями, приведенными в графе 5, по двум разным причинам. Участок 3–4 проходит по акватории, в которой систематический промер был выполнен, но допустимое уклонение ограничено малым расстоянием до отмелей островов Известий ЦИК и островов Арктического института. На участке 10а–15 оценка не изменилась из-за отсутствия достоверной информации об окружающих глубинах. Оценки уклонов на участках трассы 10–8а, 11–12 и 15–16, так же, как и оценки уклонов на отрезке 10а–15, не изменились из-за отсутствия достоверной информации об окружающих глубинах. На участках 12–13 и 13–14, так же, как и на участке 3–4, оценка не изменилась из-за ограничений, связанных с наличием с обеих сторон трассы опасных глубин, выявленных в ходе выполнения систематической съемки.

Детальное изучение распределения глубин и подробностей гидрографической съемки на участках акватории, по которой проходит основная высокоширотная трасса, позволяют выделить районы, в которых выполнение площадной съемки в пределах двухкилометровой полосы является явно недостаточным. К таким районам в первую очередь относятся части акватории с глубинами в диапазоне 20–30 м, а также районы, в которых сведения об окружающих глубинах получены по результатам маршрутного или систематического промера, выполненного с подробностью 2000 м на мелководных участках. На схеме, приведенной на рис. 5, красной штриховой линией выделены участки недостаточной гидрографической изученности.

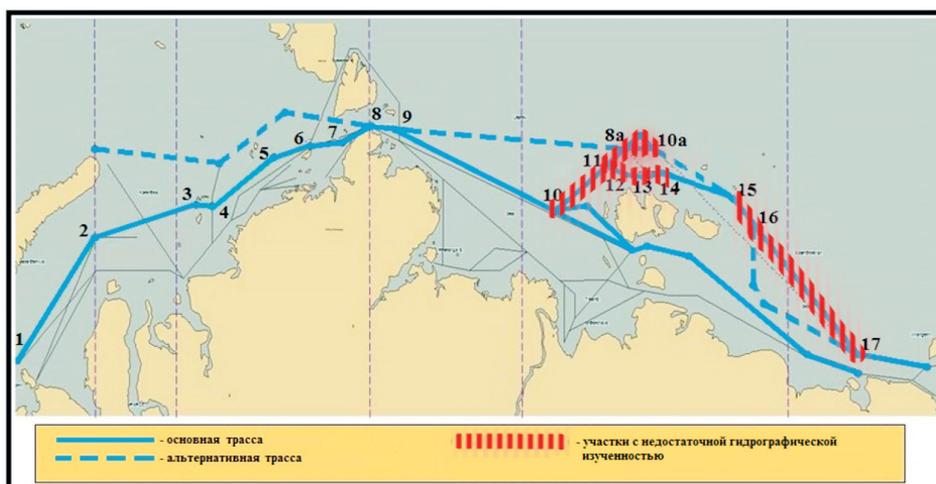


Рис. 5. Схема участков с недостаточной гидрографической обеспеченностью

Исследования параметров движения крупнотоннажных судов, выполняемых с использованием данных автоматизированных идентификационных и географических информационных систем [11]–[13], показали, что фактическая ширина полосы движения судов в летний навигационный период колеблется от 10 до 20 км в зависимости от района плавания. В зимний навигационный период при маневрировании во льдах ширина полосы движения существенно увеличивается. Поэтому при планировании площадного обследования высокоширотных трасс следует учитывать значения фактических отклонений движения судов от рекомендованного маршрута.

Выводы (Summary)

1. Разработанная методика учета информации об окружающих глубинах при оценке допустимых боковых уклонений подтвердила свою работоспособность. Учет информации об окружающих глубинах, как правило, позволяет увеличить оценку безопасной ширины маневрирования судов, относительно узкой обследованной полосы. Установлено, что величина оценки допустимого уклонения зависит от распределения глубин в акватории и подробности съемки, по данным которой получены сведения об окружающих глубинах.

2. Предложенная методика может быть использована в качестве теоретического обоснования при планировании переходов судов в акватории арктических морей, а также гидрографических работ и развития сети высокоширотных маршрутов для крупнотоннажных судов.

3. Полученные теоретические выводы и аналитические зависимости позволяют уточнить количественные оценки ширины полосы движения крупнотоннажных судов в акватории с недостаточной гидрографической изученностью подводного рельефа. В дальнейшем предполагается выполнение исследований, направленных на оценку фактических отклонений движения судов от рекомендованных маршрутов в разные периоды навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетняк С. В. Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.
2. Тезиков А. Л. Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.
3. Lee T. Barriers of voyaging on the Northern Sea Route: A perspective from shipping Companies / T. Lee, H. J. Kim // Marine Policy. — 2015. — Vol. 62. — Pp. 264–270. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.09.006
4. Афонин А. Б. Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
5. Бродский П. Г. Современные подходы к решению проблем обеспечения безопасности плавания судов и кораблей в Арктике / П. Г. Бродский, Ю. В. Румянцев, А. Н. Лукин // Навигация и гидрография. — 2016. — № 42. — С. 12–19.
6. Бураковский Е. П. К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитриевский // Известия КГТУ. — 2013. — № 29. — С. 159–164.
7. Королёв И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / И. Ю. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.
8. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
9. Afonin A. B. Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route / A. B. Afonin, E. Olkhovik, A. Tezиков // Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. — IGI Global, 2019. — Pp. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.

10. Ольховик Е. О. Обоснование плана проведения площадного обследования высокоширотных маршрутов / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.

11. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

12. Ольховик Е. О. Влияние льда на формирование судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик, Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.

13. Chang K. Y. Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS / K. Y. Chang, S. S. He, C. C. Chou, S. L. Kao, A. S. Chiou // International Journal of Geographical Information Science. — 2015. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.

REFERENCES

1. Reshetnyak, S. V. “Gidrograficheskaya izuchennost’ podvodnogo rel’efa arkticheskikh morei Rossii.” *Geodeziya i kartografiya* 4 (2006): 57–60.

2. Tezиков, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. “The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area.” *Transport of Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.

3. Lee, Taedong, and Hyun Jung Kim. “Barriers of voyaging on the Northern Sea Route: A perspective from shipping Companies.” *Marine Policy* 62 (2015): 264–270. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.09.006

4. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev, and Aleksandr L. Tezиков. “Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.

5. Brodskii, P. G., Yu. V. Rumyantsev, and A. N. Lukin. “Sovremennye podkhody k resheniyu problem obespecheniya bezopasnosti plavaniya sudov i korablei v Arktike.” *Navigatsiya i gidrografiya* 42 (2016): 12–19.

6. Burakovskii, E. P., P. E. Burakovskii, and V. A. Dmitrovskii. “K voprosu ob otsenke riskov posadki sudna na mel’.” *Izvestiya KGTU* 29 (2013): 159–164.

7. Korolev, Ivan Jurevich. “Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.

8. Afonin, Andrej B. “A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

9. Afonin, Andrej, Evgeniy Olkhovik, and Alexander Tezиков. “Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route.” *Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic*. IGI Global, 2019. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.

10. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezиков. “A planning rationale for conducting the areal surveys of high-latitude routes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.

11. Ol’khovik, Evgeniy O. “Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

12. Olkhovik, E. O., E. V. Andreeva, and A. L. Tezиков. “Ice influence on forming shipping routes in the water area of the Northern Sea Route.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2019): 26–36. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-26-36.

13. Chang, K. Y., S. S. He, C. C. Chou, S. L. Kao, and A. S. Chiou. “Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS.” *International Journal of Geographical Information Science* 29.8 (2015): 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

Исаулова Кристина Яновна —
заведующая лабораторией
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

Тезиков 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: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

Esaulova, Kristina Y. —
Head of the laboratory
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

Tezikov, 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: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2019 г.
Received: July 23, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879

PROSPECTS FOR UNESCORTED NAVIGATION OF ARC7 ICE-CLASS VESSELS IN THE REGION OF THE NEW SIBERIAN ISLANDS DURING THE WINTER PERIOD

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

The prospects for unescorted navigation of Arc7 ice-class vessels in the region of the New Siberian archipelago and its adjacent waters during the winter navigation period are analyzed in the paper. As new hydrocarbon and coal fields are actively developed and commissioned in the Arctic on the regular basis, the number of high-classed ice strengthened vessels designed for year-round operation on the Northern Sea Route continues to grow rapidly. Considering the global tendencies of climate warming and subsequent ice coverage decline, ship operators become more interested using the eastern sections of the Northern Sea Route during the winter period, particularly those passing in the Laptev and East Siberian Seas. At present, these water areas are hard to reach without icebreaker assistance in the winter–spring months and very rarely used for transit due to the heavy ice situation.

ICDC reanalysis is used to estimate ice conditions and their change trends in the considering area. The applicability of this data source is confirmed by comparing its results with the actual ice measurements carried out at polar weather stations “Ostrov Kotelnyi” and “Proliv Sannikova” in the period of 1979–2017. By means of the reanalysis data, the values of mean ice thickness in the waters surrounding the New Siberian Islands in December–March of the above period are derived and the probability estimates of collision with the ice of unacceptable thickness, the latter of which exceed 1.4 m for the Arc7 ice-class vessel, are obtained. On this basis, the mean change rates for such probabilities for all parts of considering region and the major trends of ice situation development in the next decade are revealed. The results are presented in graphics on contour maps by use of Delaunay triangulation technique.

It is concluded that despite overall improvement of ice conditions in the Arctic, the considering area including the Sannikov Strait will remain very risky for unescorted navigation even for the high-class arctic vessels. The study demonstrates that the high-latitude route passing to the North of the Anzhu Islands will gradually become a better alternative to the Sannikov strait during December–January. Further comprehensive studies both in hydrographical and hydrometeorological aspects of high-latitude shipping routes are required on continuous basis to keep up with the rapidly changing arctic environment.

Keywords: Northern Sea Route, New Siberian Islands, mean ice thickness, safety of shipping, winter navigation, Arc7 ice class, trend, reanalysis

For citation:

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.

УДК 656.61.052: 551.583

ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЗЛЕДОКОЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ СУДОВ КЛАССА ARC7 В РАЙОНЕ НОВОСИБИРСКИХ ОСТРОВОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

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

Исследованы перспективы безледокольной навигации судов ледового класса Arc7 в акваториях, прилегающих к архипелагу Новосибирские острова, в зимний период. Отмечен существенный рост числа судов данного класса в связи с вводом в эксплуатацию новых месторождений в Арктике, рассмотрены перспективы дальнейшего увеличения работающих в круглогодичном режиме судов на трассах Севморпути. В свете глобальных тенденций потепления климата и сокращения ледового покрова Арктики отмечена возрастающая актуальность маршрутов, проходящих через восточную часть Севморпути в зимний период, являющихся до сих пор крайне труднодоступными из-за сложной ледовой обстановки. Для наиболее сложного участка трассы Севморпути — района Новосибирских островов и пролива Санникова — выполнены приблизительные оценки тенденций изменения ледовой обстановки на ближайшее десятилетие. В качестве исходных данных использованы результаты реанализа ICDC, адекватность которых подтверждена сравнением с данными измерений, проводимых на полярных станциях «Остров Котельный» и «Пролив Санникова» за период с 1979 по 2017 гг. По данным реанализа, получены средние значения толщины льда в исследуемом районе. Выполнена оценка вероятностей, с которыми суда класса Arc7 могут встретить льды непреодолимой толщины в зимние месяцы, а также в марте. Определены средние скорости изменения таких вероятностей для всех участков исследуемого района, что позволило выявить тенденции изменения ледовых условий. Результаты представлены графически на контурных картах с использованием триангуляции Делоне. Установлено, что несмотря на то, что в целом ледовые условия в Арктике улучшаются, район Новосибирских островов и, в частности, пролив Санникова, будут оставаться крайне тяжелыми для самостоятельной навигации судов рассматриваемого класса. Показано, что в декабре–январе более доступной альтернативой судоходной трассе через пролив Санникова будет служить высокоширотный маршрут, проходящий к северу от островов Анжу. Отмечена необходимость дальнейшего изучения высокоширотных трасс как в гидрографическом, так и гидрометеорологическом отношении.

Ключевые слова: Северный морской путь, Новосибирские острова, средняя толщина льда, безопасность судоходства, зимняя навигация, ледовый класс Arc7, тенденция, реанализ.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Суровый климат и ледовые условия Арктики предъявляют высокие требования к флоту, работающему на Северном морском пути (СМП). Для выполнения круглогодичной навигации по всей акватории СМП суда должны иметь класс ледовых усилений, как правило, не ниже Arc7. Существующий флот судов такого класса на момент проведения исследования представлен газозавозами типа «Ямалмакс» (15 ед.), танкерами серии «Штурман» (6 ед.), контейнеровозами проекта «Норильский никель» (5 ед.), танкерами для перевозки газоконденсата типа «Борис Соколов» (2 ед.), а также судами ряда других единичных проектов. В пятилетней перспективе ожидается ввод в эксплуатацию дополнительно не менее двадцати судов класса Arc7^{1,2}. С учетом устойчивых климатических изменений и сокращения ледового покрова Арктики вопрос достаточности их возможностей для самостоятельного преодоления наиболее сложных акваторий СМП в зимне-весенний навигационный период в перспективе ближайших десятилетий является актуальным для оценки экономических перспектив развития СМП и обеспечения безопасного и устойчивого судоходства в Арктике.

В настоящее время проблемам доступности арктических акваторий для регулярного судоходства посвящено большое количество научных работ. В частности, в работе [1] предпринята попытка всестороннего прогноза по срокам открытия судоходных путей в Арктике в течение XXI в. при сохранении нынешних темпов таяния арктических льдов. Отмечается, что к середине текущего столетия для массового судоходства будут открыты высокоширотные, в том числе трансполярные арктические маршруты. Подобным выводам сделаны авторами работ [2], [3]. Пер-

¹ Перспективная потребность в судах до 2024 г. для обеспечения перевозок по Севморпути оценивается в 74–76 ед. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portnews.ru/news/271249> (дата обращения: 01.07.2019)

² Морские итоги ПМЭФ–2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portnews.ru/news/271249> (дата обращения: 01.07.2019).

спективы транзитного торгового судоходства в настоящее время вызывают все больший интерес у ряда азиатских и европейских стран, что подтверждается регулярными публикациями в зарубежной научной периодике [4]–[7]. В этих работах авторами сделаны выводы о том, что несмотря на то, что климат Арктики становится более благоприятным, навигационный период для большинства транзитных судов пока остается довольно непродолжительным: как правило, с августа по октябрь. При этом судовладельцы готовы всерьез рассматривать переходы по Севморпути только при условии безледокольного плавания. Указанные исследования проводятся в основном для летне-осеннего навигационного периода. О зимней транзитной навигации в перспективе ближайших десятилетий пока речь не идет.

Вместе с тем увеличивающийся флот судов высокого ледового класса (Arc7 и выше) позволяет уже сейчас задаваться вопросом о возможности их работы в зимнюю навигацию на транзитных маршрутах. Публикации на эту тему немногочисленны. В частности, вопросы доступности наиболее сложного участка СМП — Восточно-Сибирского моря — исследованы в работе [8]. Авторы отмечают высокие риски безледокольной навигации из-за крайне неустойчивого климата региона, образующихся мощных ледяных массивов (Новосибирского и Айонского), высокой вероятности выноса сплоченных льдов со сжатием на судоходные трассы. Более подробно климатические и, в частности, ледовые условия региона рассмотрены в работе [9], на основе данных которой также можно сделать вывод о том, что навигация в восточной части трассы СМП в зимний период крайне опасна.

Несмотря на указанные ранее риски, единичные попытки транзитного прохода по СМП в зимний период тем не менее предпринимаются в научной публикации [10]. Так, 6 января 2018 г. танкер-газовоз «Эдуард Толль» (тип «Ямалмакс») при движении с востока на запад пересек мыс Челюскин, установив рекорд по наиболее позднему самостоятельному транзиту СМП на тот момент. Спустя год новый рекорд был установлен караваном в составе танкера-газовоза «Борис Давыдов» (тип «Ямалмакс») и танкера для перевозки газоконденсата «Борис Соколов» (оба имеют ледовый класс Arc7), которые, также двигаясь с востока на запад, прошли траверз мыса Челюскин 14 января 2019 г. Примечательно, что вышедший на СМП первым танкер «Борис Соколов» в районе Новосибирских островов, встретив сплошной лед, не смог продолжить движение самостоятельно, лег в дрейф в ожидании более мощного танкера-газовоза «Борис Давыдов», имеющего на винтах 45 МВт, и только под его проводкой смог следовать далее (рис. 1). Все суда в итоге благополучно завершили транзит, но в целом такие переходы можно признать скорее «экспериментальными», чем типичными.

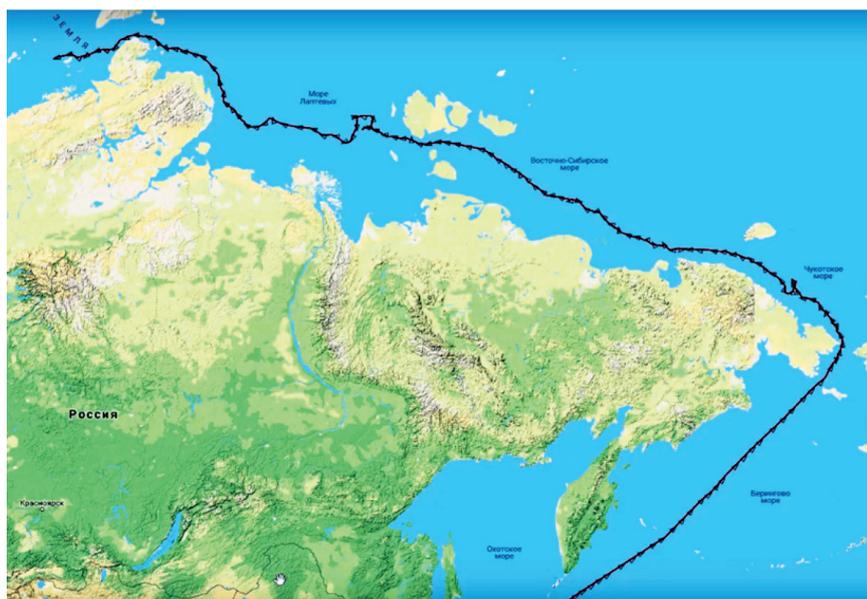


Рис. 1. Маршрут транзитного прохода СМП танкером «Борис Соколов» (по данным сайта MarineTraffic.com)

Основной маршрут трассы СМП в районе Новосибирских островов проходит по проливу Санникова. В проливе круглый год складываются непростые ледовые условия, которые зимой дополнительно осложняются тем, что к его западному и восточному входам океанические течения Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых выносят дрейфующие льды. Наиболее мощные льды прибывают со стороны моря Лаптевых, в которое впадают реки Лена, Хатанга, Анабар, Оленёк и Яна. За год эти реки доставляют в море более 730 км³ пресной воды, вызывая ощутимое опреснение его вод и способствуя интенсивному ледообразованию в зимний период. В районе немало также и речного льда, принесенного этими реками [11]. В результате у западного побережья Новосибирских островов формируются ледовые условия, трудно проходимые даже для современных ледоколов [8], [12].

Для того чтобы планировать переход в указанном районе, особенно в зимний период, требуется иметь максимально полную информацию о ледовой обстановке. Ее мониторинг в районе пролива Санникова ежедекадно осуществляют полярные станции «Остров Котельный» (76°00' с. ш.; 137°54' в. д.) и «Пролив Санникова» (74°42' с. ш.; 138°54' в. д.)¹. Однако для оценки характеристик ледовых условий по всей акватории района Новосибирских островов этой информации недостаточно. Спутниковый мониторинг толщин льда также имеет свои методические ограничения, в том числе по зоне покрытия и задержки предоставляемой информации, и далеко не всегда дает точные оценки [13]. Таким образом, решение о переходе через рассматриваемый район, а также выбор наиболее безопасного и быстрого маршрута в нем представляют значительные трудности из-за неопределенности, вызванной недостаточным гидрометеорологическим обеспечением. Последствия неправильной оценки ледовой обстановки и выбора неоптимального маршрута наглядно видны на представленном примере движения танкера «Борис Соколов», полностью потерявшего ход к западу от Новосибирских островов и вынужденного ожидать помощи.

Одним из способов борьбы с неопределенностью при оценке ледовой обстановки и тенденций ее изменения является математическое моделирование. Существующие математические модели, в том числе [14], верифицированные с использованием данных полярных станций и метеоспутников, позволяют восстановить предысторию (реанализ) изменения среднемесячных значений средней толщины дрейфующих льдов в любом районе Арктики и Антарктики. Подобная информация, учитывающая происходящие перемены климата, дает возможность оценить вероятность появления в интересующем районе льда, представляющего опасность для судна с определенным ледовым классом, а также выявить современную тенденцию ее изменения. При наличии этих данных судоводители и экипажи судов, совершающих арктическое плавание, могут более обоснованно подходить к планированию маршрутов своих судов в том или ином районе в определенный сезон.

Настоящая работа ставит целью выявить тенденции изменения ледовой обстановки в районе архипелага Новосибирские острова и оценить перспективы безледокольных транзитных переходов через указанный район судами ледового класса Arc7 в зимний период. Для достижения указанной цели рассмотрены следующие задачи:

- 1-я задача — определение средних значений толщины льда на различных участках акваторий, прилегающих к Новосибирским островам, для зимних месяцев в современном периоде;
- 2-я задача — оценка вероятности появления в рассматриваемом районе льдов, представляющих опасность для судов класса Arc7 в период зимней навигации;
- 3-я задача — выявление тенденций изменения вероятности появления таких льдов в зимний период в данном районе с учетом динамики изменения ледовой обстановки с 1979 по 2017 гг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Знак «Arc7», присваиваемый судам Российским морским регистром судоходства (РМРС), на сегодняшний день является, фактически, самым высоким ледовым классом действующих торговых судов. Суды этого класса допущены к самостоятельному плаванию в зимне-весеннюю навигацию в сплоченных однолетних арктических льдах при их толщине до 1,4 м и 1,7 м в лет-

¹ Основные сведения о действующих гидрометеорологических станциях [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.oceaninfo.ru/meta/gms/index.jsp> (дата обращения: 01.07.2019).

нее-осеннюю навигацию при эпизодическом преодолении ледяных перемычек набегами. Плавание в канале за ледоколом разрешено в однолетних льдах толщиной до 2,0 м в зимнее-весеннюю и до 3,2 м в летнее-осеннюю навигацию [15].

Учитывая ограниченность данных фактических измерений параметров льда в исследуемом районе, для решения поставленных задач были использованы результаты реанализа, проводимого на постоянной основе Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета (Integrated Climate Data Center — ICDC)¹. Реанализ представляет собой метод восстановления данных о значениях основных характеристик атмосферы и океана, которые имели место в прошлом, путем математического моделирования распределения интересующих характеристик. Моделирование выполняется на основе массива доступных данных фактических измерений, осуществляемых наземными станциями либо с помощью спутников. Математические модели постоянно обновляются по мере поступления новых данных измерений. Результаты реанализа успешно применяются в гидрометеорологии не только для понимания ситуации в прошлом, но и для оценки тенденций изменений состояния атмосферы и океана в будущем. Подробнее математическая основа реанализа представлена в работе [14].

Используемый в настоящей работе реанализ ICDC содержит результаты математического моделирования среднемесячных значений толщины льда для любых районов Мирового океана с дискретностью 13×13 км, включая арктические акватории. На момент проведения исследования указанная информация доступна с официального сайта ICDC в период с января 1979 г. по декабрь 2017 г. Применимость данных реанализа ICDC для района Новосибирских островов в зимние месяцы была проверена путем сравнения с результатами измерений толщины льда на полярных станциях «Пролив Санникова» и «Остров Котельный» за период 1979–2017 гг. Указанная информация доступна через портал системы ЕСИМО². Измерения на этих полярных станциях проводятся полярниками еженедельно в фиксированных пунктах акватории, удаленных от берега, соответственно, на 200 м и 360 м. По этим данным вычислялись соответствующие среднемесячные значения толщины льда в проливе.

В качестве примера на рис. 2 отображены межгодовые изменения среднемесячных значений толщины льда в проливе Санникова в зимние месяцы по результатам ее фактических измерений на полярной станции «Пролив Санникова».

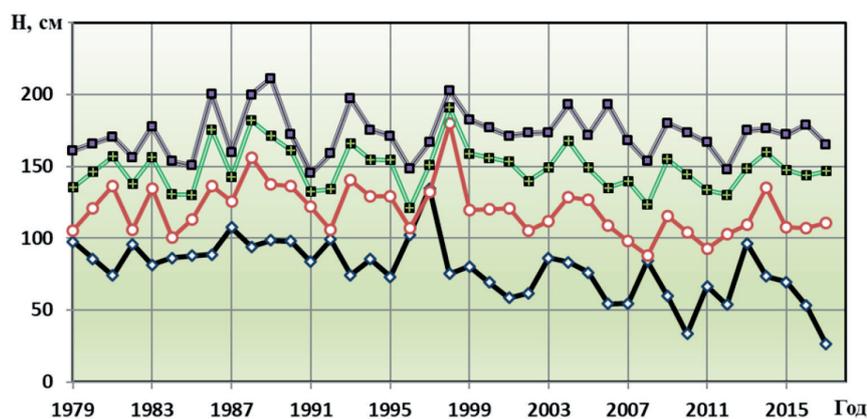


Рис. 2. Межгодовые изменения среднемесячных значений толщины льда (Н) в проливе Санникова по данным фактических измерений на полярной станции «Пролив Санникова»

Условные обозначения:

— декабрь; — январь; — февраль; — март

Как следует из этого рисунка, очевидная тенденция к снижению толщины льда в проливе Санникова наблюдается в декабре. В остальные месяцы аналогичных тенденций выявлено

¹ Integrated Climate Data Center. Ocean [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean> (дата обращения: 01.07.2019).

² Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.oceaninfo.ru> (дата обращения: 01.07.2019).

не было. При этом, из-за меньшего количества льда, образовавшегося в декабре, средние значения толщины льда за период 2008–2017 гг. ниже, чем за 1979–2017 гг. Аналогичные результаты получены также на полярной станции «Остров Котельный». Результаты измерений на этих станциях представлены в табл. 1.

Таблица 1

Усредненные за 1979–2017 гг. и за 2008–2017 гг. среднемесячные значения толщины льда (H) в зимние месяцы на полярных станциях «Пролив Санникова» и «Остров Котельный»

Среднемесячные значения H , см							
на станции «Остров Котельный»				на станции «Пролив Санникова»			
Месяц	1979–2017 гг.	2008–2017 гг.	Разность	Месяц	1979–2017 гг.	2008–2017 гг.	Разность
Декабрь	80,3	59,9	20,4	Декабрь	81,2	56,4	24,8
Январь	120,0	96,8	23,2	Январь	117,5	99,2	18,3
Февраль	148,9	128,8	20,1	Февраль	149,8	138,6	11,2
Март	172,7	151,4	21,3	Март	177,7	170,1	7,6

При проведении проверки применимости реанализа в качестве источника фактических данных оценивалась достоверность статистического вывода о том, что межгодовые изменения среднемесячных значений толщины льда в зимние месяцы (по данным реанализа), усредненные по всем участкам рассматриваемого района, статистически значимо связаны с изменениями того же показателя, полученного по данным полярных станций. Принято допущение, согласно которому реанализ может быть применен как источник фактического материала только в том случае, если достоверность такого вывода составит не менее 95 %. Для оценки фактических значений достоверности этого вывода использованы метод корреляционного анализа и критерий Стьюдента [16]. В сопоставляемых временных рядах были предварительно скомпенсированы линейные тренды, пороговый уровень коэффициента их корреляции определен с учетом числа степеней свободы изучаемых рядов и равен 0,32.

При решении первой задачи учитывалось, что в рассматриваемом периоде в Арктике наблюдалось потепление климата, вследствие чего процесс изменения средней толщины льда на участках акватории изучаемого района и их ледовитости являлся нестационарным. Вследствие этого было признано целесообразным характеризовать его современное состояние на определенном участке изучаемой акватории за период 2008–2017 гг. при помощи математического ожидания среднемесячных значений толщины льда.

В рамках второй задачи проводилась приближенная оценка вероятностей появления в изучаемом районе льдов, представляющих опасность для судов класса Arc7, за период 2008–2017 гг. Вероятность оценивалась как отношение количества относящихся к этому периоду лет, в течение которых среднемесячное значение толщины льда превышало допустимый для ледового класса предел к общему количеству таких лет. В качестве предельного значения была выбрана толщина льда, равная 1,4 м, исходя из того, что данное значение указано в описании ледового класса Arc7 как максимально допустимое при условии самостоятельного плавания в однолетних сплошных льдах [15]. Однако в контексте данного исследования речь идет не о максимальных (их практически невозможно заранее прогнозировать из-за плохо поддающейся оценке дисперсии распределения толщин льда), а о средних значениях, которые, очевидно, будут меньше. Тем не менее учитывая, что заявленная и подтвержденная испытаниями ледопроездимость судов проекта «Ямалмакс» (а именно они в обозримой перспективе будут главными претендентами на совершение транзитных переходов в зимний период) в сплошном льду составляет 2,1 м (при движении кормой вперед)¹, а при скорости 7,2 уз эти суда способны преодолевать сплошной лед толщиной 1,5 м,

¹ Высокие стандарты: испытания в арктических льдах [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sovcomflot.ru/press_office/news_articles/item94453.html (дата обращения: 01.07.2019).

было принято решение оставить значение, равное 1,4 м, в качестве ориентировочного предельного среднемесячного значения. Дрейфующий лед такой (либо меньшей) толщины в рассматриваемом районе, как правило, является однолетним (средняя толщина многолетних льдов в этом районе обычно находится в пределах 2–4 м).

В качестве количественной меры тенденции изменения вероятности появления льдов недопустимой толщины на участках акватории изучаемого района рассматривался угловой коэффициент B линейного тренда значений данного показателя, рассчитанных в скользящем окне длиной 10 лет. Зная тренд на определенном участке, а также оцененную в рамках решения второй задачи вероятность появления льда недопустимой толщины в период 2008–2017 гг. (P_{08-17}), можно оценить вероятность аналогичного события для следующего десятилетия P_{18-27} :

$$P_{18-27} = P_{08-17} + 10B.$$

Подобные оценки можно считать адекватными при условии, что тенденция изменения толщины льда в определенном районе в рассматриваемые месяцы, выявленная за период 1979–2017 гг., сохранится в будущем. Результаты, полученные при решении указанных задач, отображались на контурной карте изучаемого региона с использованием метода триангуляции Делоне [17].

Результаты (Results)

Результаты проверки достоверности данных реанализа ICDC с использованием корреляционного анализа и критерия Стьюдента представлены в табл. 2, откуда следует, что для всех зимних месяцев результаты реанализа изменений среднемесячных значений средней толщины льда в проливе Санникова статистически значимо связаны с данными фактических измерений той же характеристики на полярных станциях. Таким образом, было принято решение о допустимости применения реанализа ICDC в качестве источника фактического материала.

Таблица 2

Значения отношения коэффициента корреляции временных рядов среднемесячных значений толщины льда в проливе Санникова по данным реанализа и результатов измерения на полярных станциях к пороговому уровню 0,32

Полярная станция	Декабрь	Январь	Февраль	Март
«Остров Котельный»	1,06	1,14	1,17	1,12
«Пролив Санникова»	1,11	1,15	1,18	1,14

При решении первой задачи для зимних месяцев, а также марта периода 2008–2017 гг. для каждого участка изучаемого района были определены значения средней толщины встречающегося на нем льда. Результаты представлены в виде распределений толщин льда на контурных картах региона с использованием триангуляции Делоне [17] — рис. 3.

Из рис. 3, а видно, что в декабре практически вся акватория архипелага Новосибирских островов была проходимой для судов ледового класса Arc7. В море Лаптевых, за исключением его участков, расположенных непосредственно у западных побережий архипелага, и на большей части акватории Восточно-Сибирского моря значения средней толщины льда не превышали 1,4 м. Пролив Санникова в декабре был вполне проходим, хотя более безопасной альтернативой являлась высокоширотная трасса, огибающая острова Анжу с севера. На рис. 3, б видно, что в январе на большей части рассматриваемого района ледовые условия становились предельными для судов ледового класса Arc7. Пролив Санникова и западная часть архипелага во второй половине января, как правило, покрывались льдами толщиной более 1,7 м, что делало самостоятельную навигацию там крайне рискованной. Вместе с тем обход островов Анжу с севера по высокоширотному маршруту был еще вполне возможен.

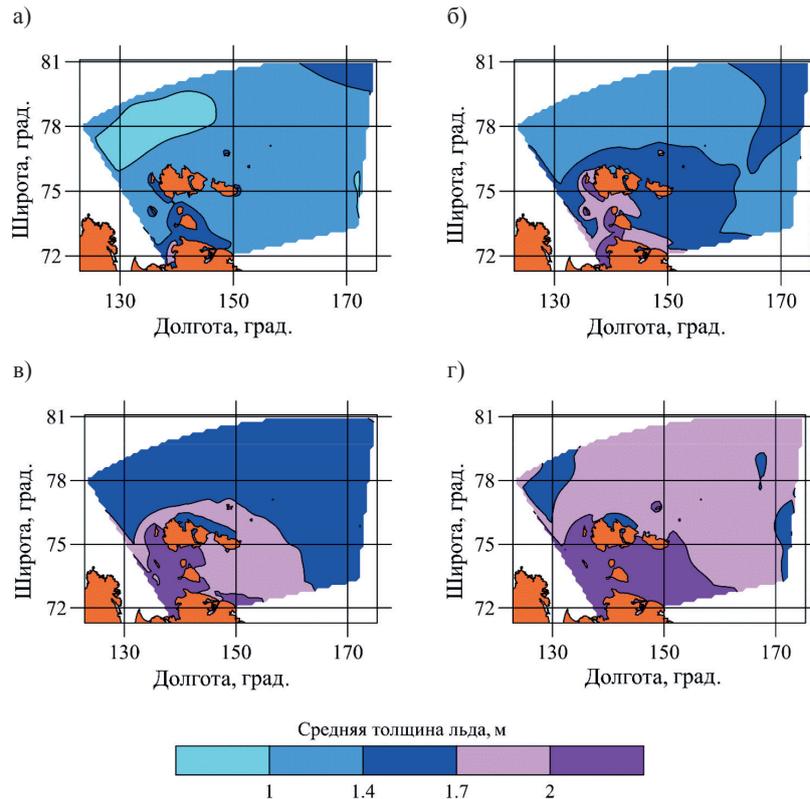


Рис. 3. Средние за период 2008–2017 гг. среднемесячные значения толщины льдов (м) на различных участках акватории района Новосибирских островов: а — в декабре; б — в январе; в — в феврале; г — в марте

В феврале (рис. 3, в) условия в рассматриваемом районе далее усложнялись. Практически вокруг всего архипелага толщина льда превышала 1,7 м, а в проливе Санникова и к западу от архипелага — 2 м. Самостоятельная навигация судов класса Arc7 была исключена. В марте (рис. 3, г) ледовые условия по всему рассматриваемому региону не позволяли осуществлять навигацию судам класса Arc7 даже под проводкой ледокола.

Распределения толщин льда, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод о том, что в целом в условиях зимней навигации путь из моря Лаптевых в Восточно-Сибирское море через пролив Санникова в современном периоде представляется более рискованным, чем путь в обход островов Анжу с севера. Для подтверждения справедливости этого предположения в рамках второй поставленной задачи были оценены вероятности появления в исследуемом районе льда толщиной более 1,4 м для всех участков акватории и всех месяцев зимней навигации, а также марта периода 2008–2017 гг. Результаты представлены на рис. 4.

Из рис. 4, а следует, что в декабре вероятность встречи опасных льдов судами класса Arc7 в большинстве акваторий, прилегающих к архипелагу Новосибирские острова, не превышала 0,4. В проливе Санникова такая вероятность была выше — от 0,4 до 0,8. При этом на высокоширотной трассе вероятность не превышала 0,1. В январе вероятность встретить лед толщиной более 1,4 м в проливе Санникова и на подходах к нему приближалась к единице (рис. 4, б). Вместе с тем на маршрутах, идущих севернее островов Анжу, такая вероятность была меньше. В феврале и марте (рис. 4, в, г) опасный лед в исследуемом районе был повсеместно.

В результате решения третьей задачи для каждого рассматриваемого месяца и каждого участка акватории изучаемого района была выполнена оценка средней скорости изменения вероятности встречи судами льдов с толщиной, выходящей за допустимые для класса Arc7 пределы. По этим данным построены соответствующие распределения по акватории района Новосибирских островов значений указанных показателей, которые представлены на рис. 5.

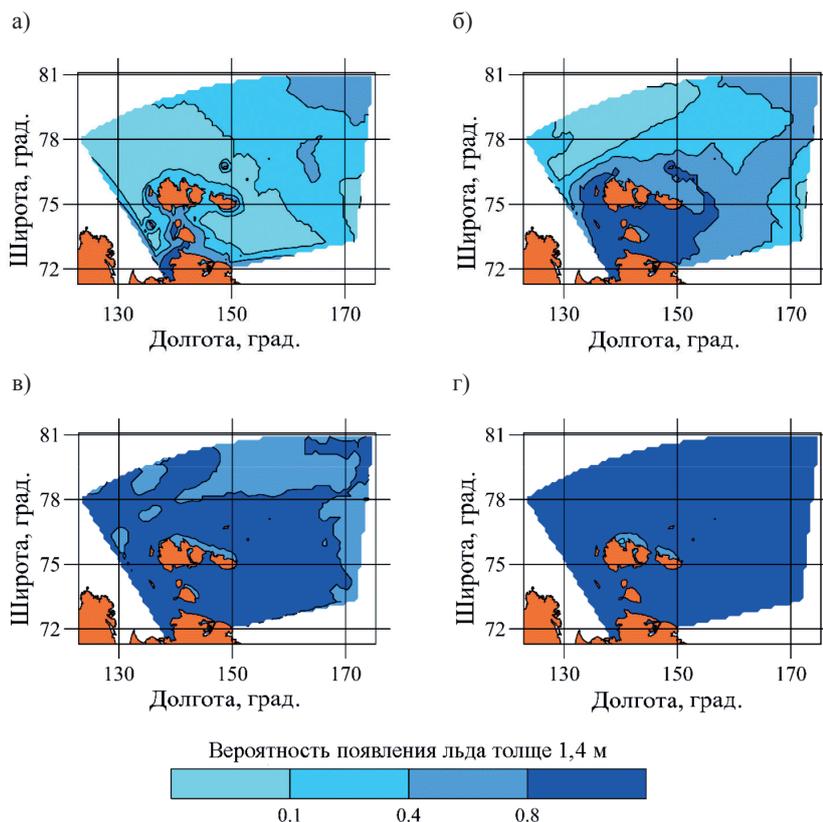


Рис. 4. Распределение вероятностей появления льда толщиной более 1,4 м в акватории архипелага Новосибирские острова за период 2008–2017 гг.: а — в декабре; б — в январе; в — в феврале; г — в марте

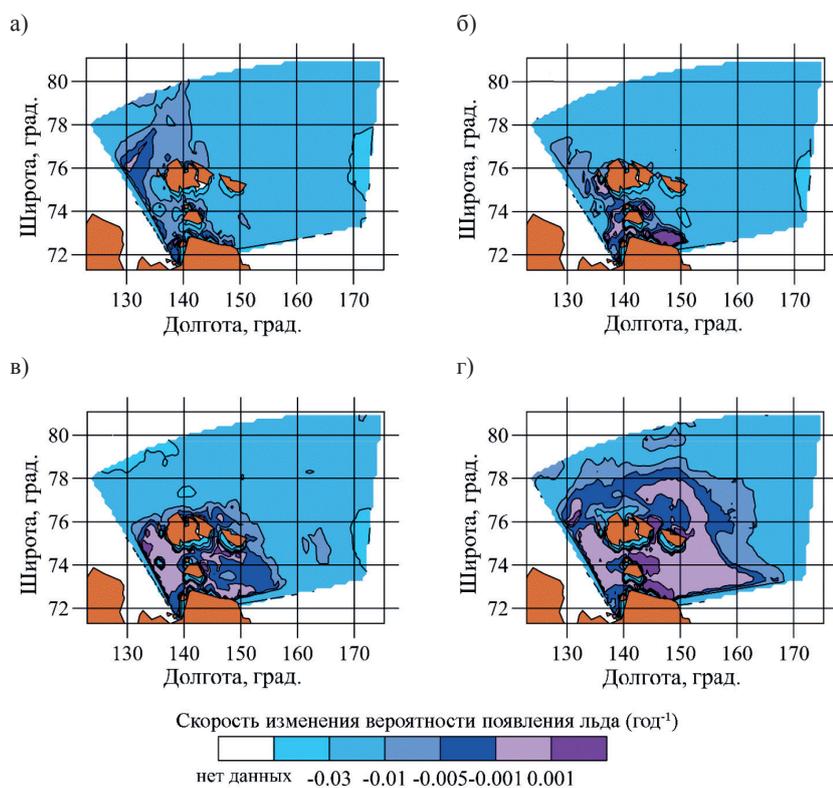


Рис. 5. Распределение по акватории района Новосибирских островов средних за период 1979–2017 гг. скоростей изменения рисков появления льдов толщиной более 1,4 м: а — в декабре; б — в январе; в — в феврале; г — в марте

Из рис. 5 следует, что в течение всех зимних месяцев вероятность появления льдов толщиной более 1,4 м, скорее всего, снижалась на участках, расположенных к северу от островов Анжу (здесь скорость данного процесса составляла от 0,01 до 0,02 (год⁻¹). Вместе с тем в проливе Санникова и прилегающих к архипелагу с запада и юго-запада акваториях скорость снижения этих рисков была существенно меньше (от 0,001 до 0,005 (год⁻¹)). В некоторых районах в феврале и марте, наоборот, выявлена незначительная тенденция к повышению рисков появления опасных льдов. Прежде всего это касается пролива Санникова и подходов к нему.

Обсуждение (Discussion)

Выявленные особенности распределений по акватории района Новосибирских островов средних значений толщины льда, вероятностей появления льдов недопустимой толщины, а также скоростей изменения таких вероятностей в 1979–2017 гг. для зимних месяцев в целом соответствуют современным представлениям о последствиях происходящего потепления климата Арктики. Результаты исследования показывают, что в следующем десятилетии безледокольная навигация судов с ледовым классом Arc7 в исследуемом районе с большой вероятностью будет доступна в декабре и начале января. Улучшение ледовых условий в указанный период ожидается на высокоширотном маршруте, огибающем острова Анжу с севера. За период 1979–2017 гг. вероятности появления здесь льдов, представляющих опасность для судов класса Arc7, снижались быстрее всего.

Постепенно открывающаяся высокоширотная трасса находит применение на практике, подтверждением этого является рейс танкера-газовоза «Борис Вилькицкий» (тип «Ямалмакс»), который в конце ноября 2017 г. прошел транзитом по СМП с востока на запад к северу от Новосибирских островов. При этом средняя скорость судна на высокоширотном участке находилась в приемлемых пределах (7–11 уз) [10]. Очевидно, в ближайшее время следует ожидать, что переходы «Ямалмаксов» по таким маршрутам в ноябре-декабре станут вполне обычными. Однако препятствием для активного использования высокоширотных трасс, как отмечается в работе [18], на сегодняшний день остается слабая гидрографическая исследованность и навигационная обеспеченность большинства районов Восточно-Сибирского моря. В феврале-марте ледовая обстановка во всем исследуемом районе, по всей видимости, останется тяжелой, что подтверждают выводы, сделанные в работе [8]. Самостоятельная навигация судов класса Arc7 в указанные месяцы будет невозможна. Вместе с тем устойчивые тенденции снижения толщины льда в феврале-марте также наблюдаются на высокоширотном участке рассматриваемого района. Неблагоприятным на ближайшее десятилетие остается прогноз о доступности основной трассы Севморпути, проходящей через пролив Санникова и подходы к нему в зимние месяцы. Очевидно, что смягчения ледовых условий в зимне-весеннюю навигацию в этом районе пока ожидать не следует.

Заключение (Conclusion)

Глобальное потепление климата открывает новые возможности для судоходства в Арктике, увеличивая периоды навигации и уменьшая риски плавания в северных морях. Вместе с тем для того чтобы обеспечить привлекательность и доступность Северного морского пути для транзитной навигации, морской администрации России предстоит решить актуальные вопросы, связанные с повышением качества гидрометеорологического, гидрографического, навигационного и коммуникационного обеспечения акваторий арктических морей, в первую очередь, наиболее сложных его участков.

Совокупность факторов, вызванных происходящими климатическими изменениями, в сочетании с недостатком объективных данных по одному из наиболее сложных участков Севморпути — району архипелага Новосибирские острова, затрудняет оценку его ближайших перспектив с точки зрения увеличения сроков навигации и стратегического планирования через него транзитного судоходства. Эффективным прогностическим инструментом в условиях подобной неопределенности могут быть реанализы ледовой обстановки, позволяющие оценить тенденции изменений интересующих параметров льда на любом участке изучаемой акватории. В настоящей работе по-

казано, что реанализ, проводимый Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета, является достаточно надежным источником информации при моделировании ледовой обстановки в любых частях района Новосибирских островов в зимний период.

Практически важным результатом настоящего исследования можно считать оценку перспектив основной трассы Севморпути, проходящей через пролив Санникова. Несмотря на потепление климата и таяние арктических льдов, до 2030 г. не следует ожидать улучшения там ледовых условий в зимне-весенний период. Вместе с тем существенные улучшения ледовых условий ожидаются к северу от островов Анжу — на участках высокоширотной трассы СМП. За последние десять лет ледовая обстановка там зачастую была легче, чем в проливе Санникова и на подходах к нему.

В настоящее время безледокольная навигация современных судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов возможна до начала января. В ближайшем будущем можно предвидеть ее постепенное продление до конца января при условии обоснованного выбора судами доступных высокоширотных трасс. Прогнозирование ее увеличения до февраля пока не выглядит обоснованным, так как наблюдаемые в настоящее время уникально быстрые темпы климатических изменений вполне могут замедлиться в обозримой перспективе.

Актуальным направлением дальнейших исследований является оценка тенденций изменений ледовой обстановки и поиск безопасных маршрутов зимней навигации в Восточно-Сибирском море и районе архипелага Северная Земля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Melia N.* Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins. — Foresight, Government Office for Science, 2017. — 39 p.
3. *Stephenson S. R.* Marine accessibility along Russia's Northern Sea route / S.R. Stephenson, L.W. Brigham, L.C. Smith // *Polar Geography*. — 2014. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859
4. *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.
5. *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.
6. *Ha Y. S.* The Northern Sea Routes and Korea's Trade with Europe: implications for Korea's Shipping Industry / Y. S. Ha, J. S. Seo // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 73–84. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.007.
7. *Rahman N. S. F. A.* Effect of the Northern Sea Route Opening to the Shipping at Malacca Straits / N. S. F. A. Rahman, A. H. Saharuddin, R. Rasdi // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 85–98. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.008.
8. *Шаронов А. Ю.* Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // *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. *Зонн И. С.* Восточно-Сибирское море: энциклопедия / И. С. Зонн, А. Г. Костяной, А. В. Семенов; под ред. акад. РАН Г. Г. Матишова. — М.: Междунар. отношения, 2014. — 173 с.
10. *Ольховик Е. О.* Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017–2018 гг. / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
11. *Alexandrov V. Y.* Sea ice circulation in the Laptev Sea and ice export to the Arctic Ocean: Results from satellite remote sensing and numerical modeling / V. Y. Alexandrov, T. Martin, J. Kolatschek, H. Eicken,

M. Kreyscher, A. P. Makshtas // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2000. — Vol. 105. — Is. C7. — Pp. 17143–17159. DOI: 10.1029/2000JC900029.

12. Лоция Восточно-Сибирского моря. — СПб.: ГУНИО, 1988. — 207 с.

13. Гриняк В. М. Оценка перспектив использования данных метеоспутников для планирования маршрута судна в арктических водах / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, А. С. Девятисильный // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.

14. Zuo H. A Generic Ensemble Generation Scheme for Data Assimilation and Ocean Analysis. Technical Memorandum / H. Zuo, M. Alonso-Balmaseda, E. de Boisseson, S. Hirahara, M. Chrust, P. de Rosnay. — ECMWF, 2017. — No. 795. — 44 p. DOI: 10.21957/cub7mq0i4.

15. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010. — Т. 1. — 479 с.

16. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.

17. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. — Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2002. — 128 с.

18. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

REFERENCES

1. 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.

2. Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. *Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes*. Foresight, Government Office for Science, 2017.

3. Stephenson, Scott R., Lawson W. Brigham, and Laurence C. Smith. “Marine accessibility along Russia’s Northern Sea route.” *Polar Geography* 37.2 (2014): 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859.

4. Lee, Sung-Woo, and Ju-Mi Song. “Economic possibilities of shipping through Northern Sea route.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30.3 (2014): 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.

5. 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.

6. Ha, Yeong-Seok, and Jung Soo Seo. “The Northern Sea Routes and Korea’s Trade with Europe: implications for Korea’s Shipping Industry.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 1 (2014): 73–84. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.007.

7. Rahman, NSF Abdul, Abdul Hamid Saharuddin, and R. Rasdi. “Effect of the Northern Sea Route Opening to the Shipping at Malacca Straits.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 1 (2014): 85–98. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.008.

8. 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.

9. Zonn, I. S., A. G. Kostyanov, and A. V. Semenov. *Vostochno-Sibirskoe more: entsiklopediya*. Edited by G. G. Matishova. M.: Mezhdunar. otnosheniya, 2014.

10. Ol’khovik, Evgeniy O. “Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

11. Alexandrov, Vitaly Y., Thomas Martin, Josef Kolatschek, Hajo Eicken, Martin Kreyscher, and Alexandr P. Makshtas. “Sea ice circulation in the Laptev Sea and ice export to the Arctic Ocean: Results from satellite remote sensing and numerical modeling.” *Journal of Geophysical Research: Ocean* 105.C7 (2000): 17143–17159. DOI: 10.1029/2000JC900029.

12. *Lotsiya Vostochno-Sibirskogo morya*. SPb.: GUNIO, 1988.

13. Grinyak, Victor M., Denis A. Akmaykin, and Alexander S. Devyatisilnyi. "Assessment of the prospects for using meteorological satellite data for planning a vessel route in the Arctic waters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.

14. Zuo, H., M. Alonso-Balmaseda., E. de Boisseson, S. Hirahara, M. Chrust, and P. de Rosnay. *A generic ensemble generation scheme for data assimilation and ocean analysis. Technical Memorandum*. No. 795. ECMWF, 2017. DOI: 10.21957/cub7mq0i4.

15. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Vol. 1. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2010.

16. Aivazyan, S. A., and V. S. Mhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.

17. Skvortsov, A. V. *Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002.

18. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

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 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru
Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 августа 2019 г.

Received: August 11, 2019.

SEABED RELIEF MAPPING PROBLEMS ON THE RUSSIAN BATHYMETRIC CHART OF THE ARCTIC OCEAN

Yu. G. Firsov

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

Current situation regarding the seabed relief research inside the Russian sector of the Arctic Ocean is examined in the paper. The main goal of this study is to analyze the credibility of the Arctic Ocean mapping on the existing Russian bathymetric charts and provide recommendations for their revision by method of the computer modelling of the Arctic Ocean relief using geoinformation technology. It is noted that the interest in the Arctic Ocean seabed relief research arose at the beginning of the 21st century due to the Continental Shelf delimitation according to the regulations of the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) Article 76. A short historical retrospective overview of the seafloor relief mapping and the Arctic Ocean bathymetric charts development is provided. It is mentioned that the IBCAO digital model and the Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean at a scale of 1:2 500 000 (admiralty number 9115) were published at the same time.

The Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean was published in 2001. It contained all currently known seabed structures in the Arctic Ocean and was presented to the world scientific community. However, it is still little known abroad which led to the fact that the foreign scientific expedition 'discovered' the seamount which had already existed on the Russian bathymetric chart (admiralty number 9115). As the modern Russian bathymetric data were appearing this chart was updating and now it is available in the digital format S-57. Nevertheless, some of the seabed structures on this chart are shown incorrectly and have to be revised. The examples are the «Belov Trog» and the false seamount in the southeastern part of the «Wrangel Plain». The urgency of the prolongation of the seabed relief research in the Russian sector of the Arctic Ocean is noted in connection with the problem of supporting the Russian submission on the extended continental shelf in the Arctic.

Keywords: underwater topography, Arctic ocean, undersea features, IBCAO, russian bathymetric chart, Belov Thoug, continental shelf, UNCLOS.

For citation:

Firsov, Yury G. "Seabed relief mapping problems on the Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.

УДК 910.27

ПРОБЛЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА НА РОССИЙСКИХ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ КАРТАХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Ю. Г. Фирсов

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

Рассмотрены вопросы текущего состояния изученности рельефа Северного Ледовитого океана, источники информации и достоверность отображения отдельных форм рельефа на существующих батиметрических картах. Целью исследования является анализ достоверности отображения рельефа дна Арктического бассейна и формирование предложений по актуализации отечественной батиметрической карты. Методом решения поставленной задачи является компьютерное моделирование рельефа Северного Ледовитого океана с использованием геоинформационных технологий. Кратко изложена история изучения рельефа дна Северного Ледовитого океана и создания наиболее известных батиметрических карт, включая современную цифровую модель IBCAO v.3 и подготовленную на ее основе бумажную версию карты масштаба 1: 6 000 000, а также отечественную батиметрическую карту масштаба 1: 2 500 000

с адмиралтейским номером 91115. Отмечается, что интерес к изучению рельефа дна Северного Ледовитого океана возник с начала XXI в. в связи с проблемой делимитации Северного Ледовитого океана в соответствии с правилами ст. 76 «Конвенции по морскому праву». Указывается, что российская батиметрическая карта, опубликованная в 2001 г., была создана в результате более чем 30-летнего самоотверженного труда отечественных гидрографов и содержит все основные морфоструктуры дна Северного Ледовитого океана, однако она осталась практически неизвестна зарубежному научному сообществу. Это привело к тому, что зарубежная научная экспедиция повторно «открыла» подводную гору, уже отмеченную на карте с адмиралтейским номером 91115. По мере получения новых российских батиметрических данных эта карта была дважды отредактирована. В настоящее время батиметрическая карта с адмиралтейским номером 91115 подготовлена в электронном виде в формате S-57, однако ряд морфоструктур на ней показан некорректно и требует уточнения. В качестве примеров рассмотрены некоторые морфоструктуры, включая трог Белова и ложную подводную гору на равнине Врангеля. Отмечается актуальность дальнейшего изучения рельефа дна в российском секторе Северного Ледовитого океана в связи с проблемой поддержки российского «Представления на расширенный континентальный шельф в Арктике». Сформулированы предложения по актуализации батиметрической карты с адмиралтейским номером 91115.

Ключевые слова: подводный рельеф, Северный Ледовитый океан, морфоструктуры морского дна, международная батиметрическая карта, российская батиметрическая карта, трог Белова, юридический континентальный шельф, конвенции по морскому праву.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Проблемы отображения рельефа дна в российских батиметрических картах Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.

Введение (Introduction)

Систематическое изучение рельефа дна Северного Ледовитого океана (СЛО), начавшиеся после Второй мировой войны, проходило в несколько этапов. На начальном этапе в период до середины 50-х гг. XX в. основными средством являлся промер со льда, выполнявшийся в составе высокоширотных экспедиций с использованием механических средств измерения глубин и астрономических методов плановой привязки. Однако уже в конце 40-х гг. XX в. советские полярники открыли такие важнейшие морфоструктуры СЛО, как хребты Ломоносова и Гаккеля, а также поднятие Менделеева. Следующий этап познания рельефа дна СЛО был связан с появлением атомных подводных лодок (АПЛ). На этом этапе с АПЛ было измерено большое количество глубин по всей акватории СЛО, позволивших выявить основные морфоструктуры дна и создать первые батиметрические и наглядные физиографические карты рельефа.

В 70–80-е гг. XX в. промер со льда и АПЛ продолжался с использованием более современных средств, позволяющих уточнить ранее полученные результаты. Технологический прорыв в изучении рельефа дна СЛО произошел в 1990 г., когда на немецком исследовательском «Поларштерн» был впервые установлен многолучевой эхолот (МЛЭ). В дальнейшем МЛЭ были установлены на многих исследовательских ледоколах, ознаменовав новый современный этап изучения дна СЛО [1], [2].

Историческим аспектам изучения рельефа дна СЛО посвящено много работ. Отечественные исследования, выполненные гидрографической службой в Арктическом бассейне в 60–80 гг. XX в. подробно описаны в монографии [3], зарубежные исследования рельефа дна СЛО представлены в работах [4] и [5]. Современные съемки рельефа дна СЛО, выполненные с начала XXI в. на основе использования МЛЭ и спутниковых средств позиционирования представлены в работах [6]–[8].

В начале XXI в. произошел технологический прорыв в области картографии с появлением информационных технологий, позволивших автоматизировать создание 2D/ 3D/4D изображения рельефа на основе измерений, которые стали выполняться и регистрироваться в цифровом виде. Начало эры цифровой картографии, ознаменовавшее переход от бумажных (аналоговых) карт к цифровым, радикально изменило подходы к созданию батиметрических карт, включая методы визуализации рельефа.

Интерес к дальнейшему изучению рельефа дна СЛО возник с начала XXI в. в связи с проблемой разграничения арктических акваторий в соответствии с правилами ст. 76 «Конвенции ООН по морскому праву». Необходимость установления положения континентальной окраины материка, зоны основания континентального склона (ОКС) и фиксации точек подножия континентального склона (ПКС), а также точное положение изобаты 2500 м потребовало необходимости проведения детальной батиметрии. Указанные данные должны быть зафиксированы и представлены в цифровом виде на электронной карте.

Основная часть (Main Part)

Первая цифровая карта СЛО была создана усилиями мирового научного сообщества в 2001 г. в виде цифровой модели рельефа дна с регулярной сеткой (гридом) $2,5 \times 2,5$ км [9]. Модель рельефа, получившая название «Международная батиметрическая карта Арктического океана» (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean — IBCAO), учитывала все доступные батиметрические данные, в том числе российские, содержащиеся на батиметрической карте. В дальнейшем эта цифровая модель IBCAO была существенно уточнена в 2008 г. [10] и появилась версия 2 с гридом 1×1 км. Текущая версия IBCAO v.3 построена на основе регулярной сетки с размерностью $0,5 \times 0,5$ км. Детальная информация по IBCAO v.3, представленная на сайте¹, изложена в работе [11].

Батиметрическая карта СЛО, основанная цифровой модели IBCAO с регулярной сеткой размерностью 500 м, подготовлена в масштабе 1: 6 000 000 для распечатки в формате A1². Эта карта содержит только основные морфоструктуры и их топонимы, представленные в Газетире ГЕБКО³. Подробная информация по созданию модели IBCAO приведена в работе [12].

Батиметрическая карта «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115) была первоначально подготовлена Управлением навигации и океанографии (УНиО) на основе ретроспективных материалов съемок, выполненных в период 1954–1994 гг. [13]. В 2002 г. карта «Центральный Арктический бассейн» была представлена международной научной обществу в аналоговом (бумажном) виде на рабочем совещании «Bathymetric mapping of the north polar seas» [14], но в дальнейшем не получила широкой известности за рубежом. В 2013 г. карта «Центральный Арктический бассейн» была отредактирована с использованием современных российских съемок [15].

В 2017 г. батиметрическая карта «Центральный Арктический бассейн» была выпущена в новой редакции с учетом всех российских и ряда доступных современных батиметрических данных с использованием многолучевых съемок [16]. Источники современных батиметрических данных по СЛО, находящиеся в открытом доступе в сети Интернет, представлены в работе [6]. Результатом недостаточной известности батиметрической карты «Центральный Арктический бассейн» международному научному сообществу с момента ее выхода в свет [14] явился курьезный случай, когда американская экспедиция на ледоколе «Хилли» (Healy) в 2003 г. повторно «открыла» подводную гору [17], уже обозначенную на карте с адмиралтейским номером 91115 (2002 г.). Эта подводная гора, названная «Healy» (рис. 1), была включена в Газитир ГЕБКО с координатами: $78^{\circ}40'$ с. ш. и $158^{\circ}00'$ з. д. Трехмерное изображение подводной горы Healy в работе [17] как «Healy Sea Mount-2003» представлено на рис. 1. На рис. 2 приведен фрагмент карты «Центральный Арктический бассейн», на которой эта «вновь открытая» гора показана в красной рамке.

¹ IBCAO Version 3.0 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/ibcaoversion3.html>.

² International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Printable maps. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.gebco.net/data_and_products/printable_map/ibcao_map/documents/ibcao_v3

³ GEBCO Undersea Features Names Gazetteer. Arctic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/>.

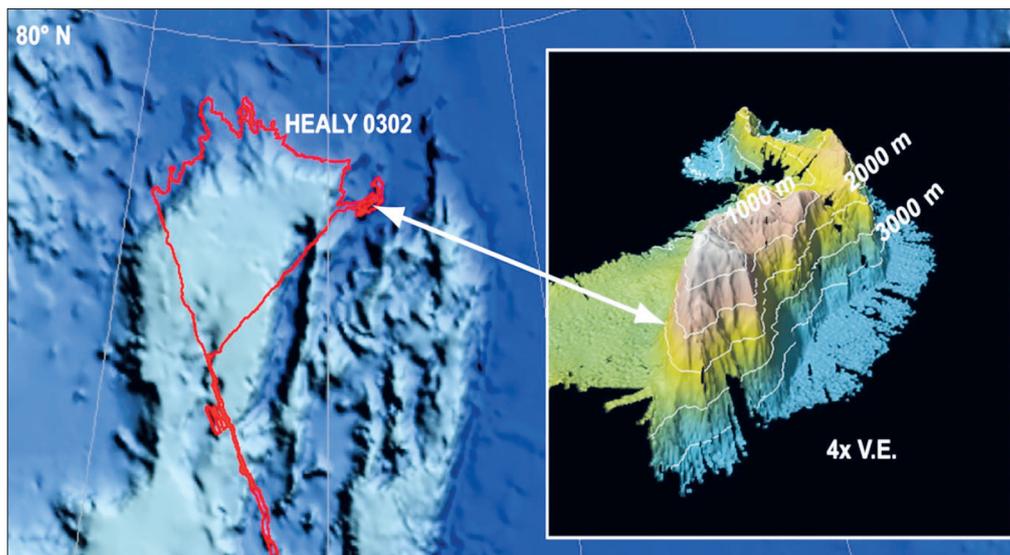


Рис. 1. Трехмерное изображение подводной горы Healy



Рис. 2. Фрагмент карты «Центральный Арктический бассейн» с указанием положения горы Healy

Координаты центральной части горы Healy, снятые с карты (адмиралтейский номер 91115), составляют: $78^{\circ}49.7'$ с. ш. и $157^{\circ}31.5'$ з. д. Следует отметить, что на северо-востоке от горы Healy на карте с адмиралтейским номером 91115 обозначена еще одна безымянная подводная гора (отмечена на рис. 2 красной точкой), которая, по-видимому, также ждет своего первооткрывателя. На карте с этим адмиралтейским номером еще достаточно безымянных морфоструктур, открытых российскими исследователями, которые до сих пор не названы именами российских ученых и исследователей.

Часть форм подводного рельефа, появившихся на картах в прежние годы, когда средства съемки были далеки от совершенства, являются ложными и требуют дополнительной проверки с целью установления достоверности. В качестве примера можно привести безымянную подводную гору на равнине Врангеля с координатами: $80^{\circ}17'$ с. ш., $172^{\circ}28'$ в. д. и глубиной 1800 м. Фрагмент 3D батиметрической карты с адмиралтейским номером 91115, совмещенной с моделью IBCAO v.3 с изображением этой «горы» (помечена желтым), представлен на рис. 3. Эта форма рельефа

впервые появилась на батиметрических картах Хайзена [18], [19] и затем была представлена на отечественных батиметрических картах [13], [20], а также на всех трех версиях карт ИВСаО: [9], [10].



Рис. 3. Фрагмент совмещенной 3D батиметрической карты 91115 с моделью ИВСаО v.3 с изображением подводной горы

Наличие локальной подводной возвышенности на седиментационной равнине Врангеля давно вызывало удивление специалистов. В 2008 г. немецкая экспедиция на научно-исследовательском ледоколе «Поларштерн» специально проложила галс многолучевой съемки через данную морфоструктуру, убедившись в ее отсутствии [21]. Полоса обзора многолучевой съемки, проложенная через эту «гору», показана на карте на рис. 4.

RV Polarstern expedition ARK-XXIII/3
Lost Seamount – Scale 1:3000000
© 2008 AWI Bathymetry

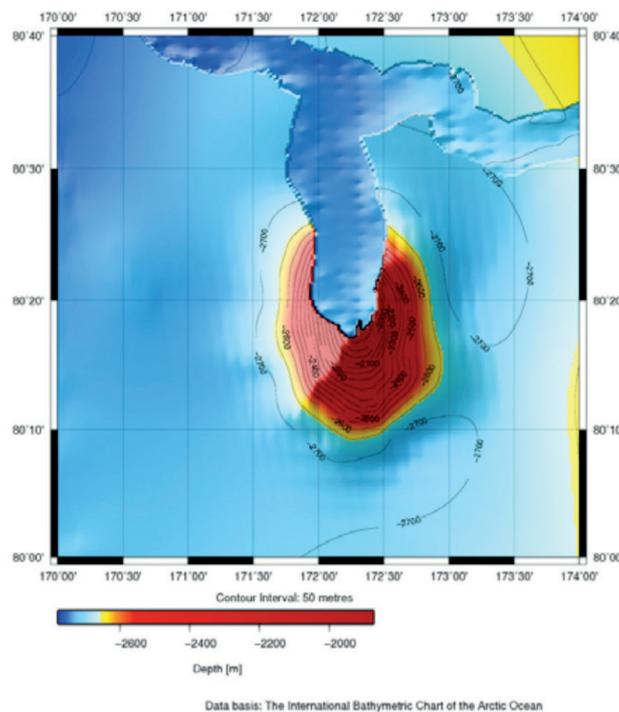


Рис. 4. Полоса обзора многолучевой съемки, проложенной через несуществующую «гору» на равнине Врангеля

батиметрической съемки «Оден» (2009) и «Хилли» (2011 г.) в виде регулярной сетки в различных форматах находятся в открытом доступе в интернете.

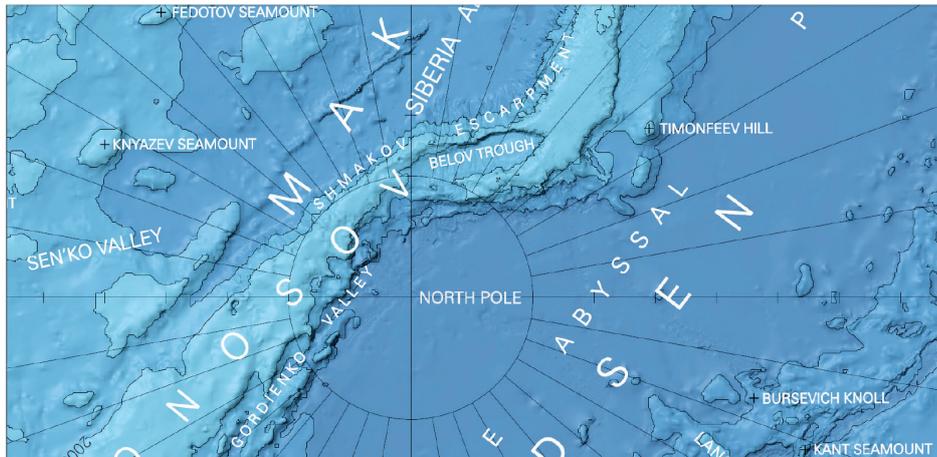


Рис. 6. Изображение трого Белова на батиметрической карте IBCAO v.3

На рис. 7 приведена трехмерная модель грида размерностью 100×100 м по результатам съемки «Оден» (2009 г.) в районе трого Белова, наложенная на модель IBCAO v.3. Площадная съемка рельефа «Оден» (2009 г.) была выполнена внутри трого, вдоль его восточного фланга.

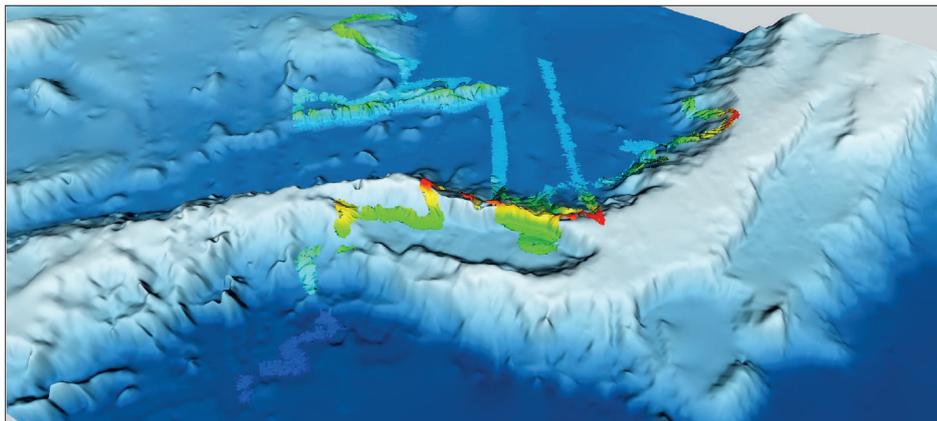


Рис. 7. Трехмерная модель грида по результатам съемки «Оден» (2009 г.)

На рис. 8 представлена трехмерная модель грида размерностью 100×100 м на полосе обзора МЛЭ по результатам съемки «Хилли» (2011 г.) на восточном фланге трого Белова.

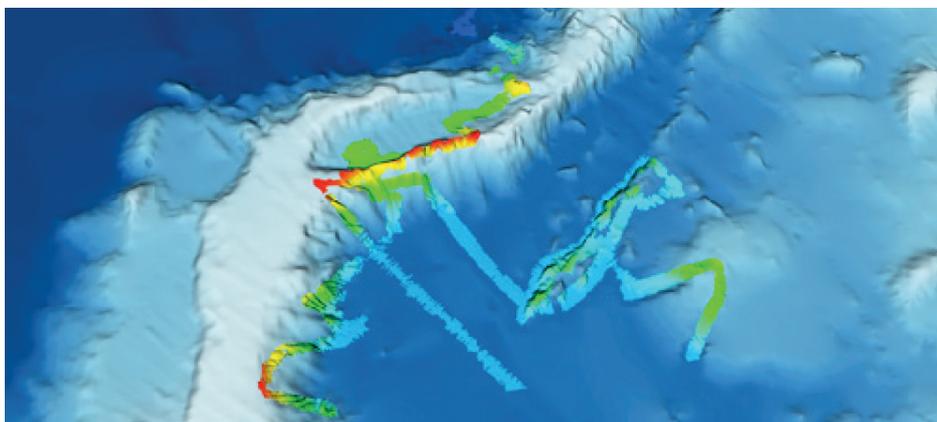


Рис. 8. Трехмерная модель грида по результатам съемки «Хилли» (2011 г.) на восточном фланге трого Белова

Визуализация результатов детальных съемок рельефа на восточном фланге трога Белова, выполненная в программном пакете «Fledermause» (см. рис. 7 и 8), основанная на реальных данных, полученных в сети Интернет, убедительно показывает, что трог Белова на самом деле является замкнутой морфоструктурой.

Актуальность изучения рельефа дна в российском секторе СЛО в последние годы была связана с проблемой поддержки «Частичного пересмотренного представления России на расширенный континентальный шельф в Арктике» [26]. Первое «Представление Российской Федерации на ВГКШ в СЛО» (далее — Представление) было подано в 2000 г. В результате Комиссией по границам континентального шельфа были сделаны замечания и даны рекомендации, для реализации которых Федеральным агентством по недропользованию (Роснедра) в период 2005–2014 гг. в Арктическом бассейне было организовано и проведено десять комплексных геолого-геофизических экспедиций. Широкомасштабные экспедиционные работы в центральной части СЛО, значимой для российского частично пересмотренного Представления, выполнялись с использованием российских научно-исследовательских судов ледового класса под проводкой атомных ледоколов. Информация по частично пересмотренному Представлению приведена в работе [27]. Батиметрическая съемка с МЛЭ выполнялась в 2010, 2011 и 2014 гг. При этом было выполнено более 38 тыс. лин. км кондиционной съемки рельефа с контролем качества.

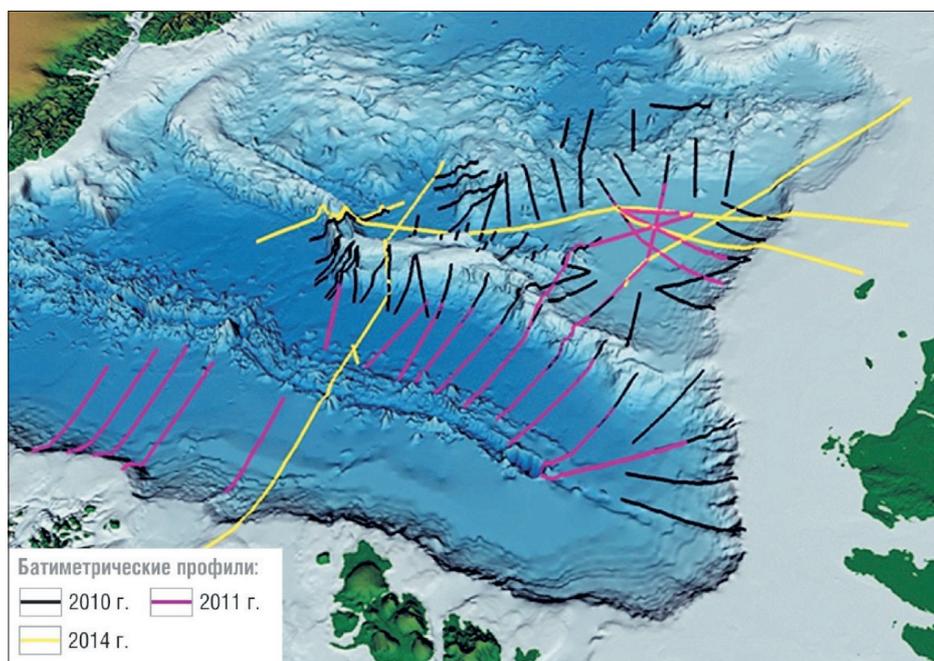


Рис. 9. Галсы многолучевой батиметрической съемки в СЛО, выполненной в 2010, 2011 и 2014 гг.

Галсы многолучевой батиметрической съемки в СЛО на фоне модели ИВСаО представлены на рис. 9 [27]. Анализ распределения галсов батиметрической съемки СЛО, представленных на этом рисунке показывает, что не вся акватория российского сектора СЛО, значимая для установления ВГКШ, была покрыта кондиционной многолучевой съемкой за исключением района в южной части котловины Нансена. Для поддержки заявленной линии ВГКШ в районе южной части котловины Нансена потребовалось проведение дополнительной батиметрической и сейсмоакустической съемки, которая была выполнена в августе–сентябре 2019 г.

В результате выполнения современной батиметрической съемки в данном районе представится возможность дополнить батиметрическую базу данных (БД) российского сектора СЛО [16] и дополнительно актуализировать карту с адмиралтейским номером 91115 с учетом ранее изложенных рекомендаций.

Обсуждение (Discussion)

В России проведена большая работа по обобщению ранее созданных картографических материалов по СЛО, преобразованию их в цифровой формат и подготовке батиметрической карты СЛО в масштабе 1: 2500000 (адмиралтейский номер 91115). В настоящее время карта актуализирована с учетом современной отечественной батиметрической съемки с использованием МЛЭ и представлена в обменном формате S-57 МГО. При этом была устранена малодостоверная информация о рельефе, которая вошла в противоречие с «реперными» данными, полученными по результатам площадной съемки с использованием МЛЭ. На обновленной батиметрической карте СЛО (адмиралтейский номер 91115) наиболее достоверно представлен рельеф дна российского сектора СЛО. Эти новые сведения о рельефе до сих пор недоступны для формирования цифровой модели ИВСаО v.3 в данном районе.

Новая БД российского сектора СЛО позволила существенно улучшить отображения структуры рельефа дна российского сектора СЛО, представленные на геоморфологической карте [28]. На батиметрической карте видно, где находятся большие и меньшие глубины, какие поверхности плоские и пологие, и какие склоны относительно крутые, но границы между ними отсутствуют. Батиметрическая модель — это связанная непрерывная модель поверхности. В связи с проблемой ВГКШ перед исследователями были поставлены задачи разграничения глубоководного океанического дна и континентальных окраин на основе морфологических критериев. Наличие достоверной батиметрической информации позволило корректно решать эти задачи и, в частности, обоснованно аргументировать наличие в СЛО области Центральных арктических поднятий, включающих хребты Ломоносова и Альфа, поднятие Менделеева и Чукотское плато, а также разделяющие их впадины в зонах, прилегающих к российскому шельфу.

Получение дополнительной современной батиметрической информации в южной части котловины Нансена позволит актуализировать рельеф в этой ранее мало исследованной части российского сектора СЛО, что даст возможность выполнить обоснованное уточнение построения зоны основания континентального склона и тем самым аргументировать поддержку заявленной линии ВГКШ в восточной части хребта Гаккеля. Для этого потребуется актуализация как батиметрической карты (адмиралтейский номер 91115), так и геоморфологической карты СЛО. При актуализации можно будет исправить рельеф на тропе Белова, убрать несуществующую подводную гору в восточной части равнины Врангеля, а также уточнить отдельные топонимы форм подводного рельефа СЛО, обоснование которых дано в работе [29].

Детальные батиметрические исследования в настоящее время являются ведущим направлением изучения Мирового океана. Кроме проекта ИВСаО, в настоящее время проводятся международные батиметрические программы: «ГЕВСО–2009», «ГЕВСО Seabed 2030», «EMODnet Bathymetry», а также региональные проекты. Детальную информацию по данной проблематике можно найти в работе [30]. Россия пока выполнила только необходимый и достаточный объем батиметрической съемки СЛО в целях обоснования своего расширенного континентального шельфа. Необходимы дальнейшие батиметрические исследования в российском секторе СЛО и в первую очередь в восточной части хребта Гаккеля.

Заключение (Conclusion)

На основе результатов выполненного исследования можно сделать следующие выводы и дать рекомендации.

1. Российской Федерации следует более активно популяризировать результаты своих исследований в СЛО и принимать меры для защиты приоритета обнаружения ранее неизвестных форм рельефа дна, давая им имена российских ученых и исследователей.

2. Российскую батиметрическую карту с адмиралтейским номером 91115 следует актуализировать с учетом поступления новых данных. При этом рекомендуется:

– убрать с батиметрических карт СЛО ошибочно нанесенную гору в юго-восточной части равнины Врангеля в координатах: 78°40' с. ш. и 158°00' з. д.;

– откорректировать вид морфоструктуры «Отрог Белова», отобразив его как замкнутый объект на основе использования батиметрической информации по данному району, находящейся в открытом доступе в сети Интернет.

3. Дальнейшую актуализацию цифровой батиметрической карты (адмиралтейский номер 91115) рекомендуется производить с учетом зарубежных батиметрических данных 2014–2016 гг., находящихся в открытом доступе в сети Интернет.

4. Дополнительная батиметрическая съемка в южной части котловины Нансена позволит уточнить не только рельеф, но и положение основания континентального склона в данном малоисследованном районе. Исследования в этом районе СЛО следует продолжить.

Выполнение указанных рекомендаций позволит не только более обоснованно защищать материалы «Частичного пересмотренного Представления Российской Федерации на расширенный континентальный шельф в Арктике» [26] в Комиссии по границам континентального шельфа, но и обеспечить предстоящие межгосударственные переговоры с приарктическими государствами, касающиеся делимитации морских пространств в приполюсной части СЛО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фирсов Ю. Г.* Батиметрическая изученность северного ледовитого океана для определения внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Геодезия и картография. — 2007. — № 5. — С. 48–58.

2. *Фирсов Ю. Г.* Анализ зарубежного опыта и перспективы российских исследований северного ледовитого океана в интересах определения внешней границы континентального шельфа / Ю. Г. Фирсов, В. Н. Баландин, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2010. — № 9. — С. 54–59.

3. *Фридман Б. С.* Результаты гидрографических исследований и картографирование рельефа дна Арктического бассейна для определения внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Б. С. Фридман. — СПб.: Наука, 2007. — 208 с.

4. *Weber J. R.* Maps of the Arctic Basin sea floor: a history of bathymetry and its interpretation / J. R. Weber // Arctic. — 1983. — Vol. 36. — No. 2. — Pp. 121–142.

5. *Weber J. R.* Maps of the Arctic Basin sea floor Part II: bathymetry and gravity of the Alpha Ridge: the 1983 CESAR Expedition / J. R. Weber // Arctic. — 1987. — Vol. 40. — No. 1. — Pp. 1–15.

6. *Фирсов Ю. Г.* Современная батиметрическая съемка северного ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.

7. Арктический бассейн (геология и морфология) / Ред. В. Д. Каминский. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. — 291 с.

8. Geologic Structures of the Arctic Basin / A. L. Piskarev, V. A. Poselov, V. D. Kaminsky (Eds.). — Springer, 2018. — 190 p. DOI: 10.1007/978-3-319-77742-9.

9. *Jakobsson M.* New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers / M. Jakobsson, N. Cherkis, J. Woodward, R. Macnab, B. Coakley // EOS, Transactions American Geophysical Union. — 2000. — Vol. 81. — Is. 9. — Pp. 89–96. DOI: 10.1029/00EO00059.

10. *Jakobsson M.* An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses / M. Jakobsson, R. Macnab, L. Mayer, R. Anderson, M. Edwards, J. Hatzky, H. W. Schenke, P. Johnson // Geophysical Research Letters. — 2008. — Vol. 35. — Is. 7. — L07602. DOI: 10.1029/2008GL033520.

11. *Jakobsson M.* The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO) version 3.0 / M. Jakobsson, L. Mayer, B. Coakley, J. A. Dowdeswell, S. Forbes, B. Fridman, H. W. Schenke, et al // Geophysical Research Letters. — 2012. — Vol. 39. — Is. 12. — L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.

12. *Jakobsson M.* Arctic ocean bathymetry: A necessary geospatial framework / M. Jakobsson, L. Mayer, D. Monahan // Arctic. — 2015. — Vol. 68. — Pp. 41–47. DOI: 10.14430/arctic4451.

13. Центральный Арктический бассейн. Масштаб 1:2 500 000, по параллели 75. Проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — № 91115.

14. *Glebovsky V. Y.* New Russian bathymetry map of the central Arctic basin / V.Y. Glebovsky // Bathymetric mapping of the North Polar seas: Report of a Workshop at the Hawaii Mapping Research Group, University of Hawaii, Honolulu HI, USA, October 30–31, 2002. — University of Hawaii, 2002. — Pp. 9–11.
15. *Алексеев А. С.* Обновленная карта Северного Ледовитого океана / А. С. Алексеев, А. Ф. Зеньков, А. М. Шарков, В. И. Коваленок // Российские полярные исследования. — 2013. — № 1 (11). — С. 44–46.
16. *Фирсов Ю. Г.* Новая батиметрическая базы данных российского сектора Арктики в контексте заявки российской федерации на расширенный континентальный шельф в Северном Ледовитом океане / Ю. Г. Фирсов, С. В. Егоров // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения: сборник материалов II международной научно–практической конференции. — СПб.: Издательство «Политехника», 2017. — С. 489–492.
17. *Mayer L. A.* US Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the US Arctic Ocean Margin. Cruise Report USCGC Icebreaker Healy (WAGB-20). CRUISE HEALY 1102 / L. A. Mayer, A. Armstrong. — Center for Coastal and Ocean Mapping, 2011. — 235 p.
18. *Heezen B. C.* Arctic Ocean Floor (Bathymetric Compilers) / B. C. Heezen, M. Tharp. — National Geographic Society, 1971. — Scale 1:9 757 000.
19. *Heezen B. C.* Map of the Arctic Region / B. C. Heezen, M. Tharp, M. Pinther. — 1975. — World 1:5000000.
20. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. Масштаб 1:5000000, проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО, ВНИИОкеангеология, РАН, 1998.
21. The Expedition of the Research Vessel “Polarstern” to the Arctic in 2008 (ARK-XXIII/3). Reports on Polar and Marine Research / W. Jokat, ed. — Deutschland: Helmholtz-Gemeinschaft, 2009. — 222 p.
22. *Edwards M. H.* SCICEX investigations of the Arctic Ocean system / M. H. Edwards, B. J. Coakley // Geochemistry. — 2003. — Vol. 63. — Is. 4. — Pp. 281–328. DOI: 10.1078/0009-2819-00039.
23. *Björk G.* Bathymetry and deep-water exchange across the central Lomonosov Ridge at 88°–89°N / G. Björk, M. Jakobsson, B. Rudels, J. H. Swift, L. Anderson, D. A. Darby, J. Backman, B. Coakley, P. Winsor, L. Polyak, M. Edwards // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2007. — Vol. 54. — Is. 8. — Pp. 1197–1208. DOI: 10.1016/j.dsr.2007.05.010.
24. *Jakobsson M., and C. Marcussen.* Lomonosov Ridge off Greenland 2009 (LOMROG II). Cruise Report. — Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate and energy, 2009. — 122 p.
25. *Björk G.* Bathymetry and oceanic flow structure at two deep passages crossing the Lomonosov Ridge / G. Björk, M. Jakobsson, K. Assmann, L. G. Andersson, J. Nilsson, C. Stranne, L. Mayer // Ocean Science. — 2018. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 1–13. DOI: 10.5194/os-14-1-2018.
26. Частичное пересмотренное представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Резюме. — 2015. — 37 с.
27. *Поселов В. А.* Обоснование юридического шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане / В. А. Поселов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 3 (166). — С. 48–54.
28. *Зинченко А. Г.* Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте конвенции ООН по морскому праву 1982 г. / А. Г. Зинченко, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.
29. *Фирсов Ю. Г.* Проблемы наименования равнин и котловин центрально-арктической области подъятий Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов, А. Г. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 315–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331.
30. *Wöfl A. C.* Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry / A.-C. Wöfl, H. Snaith, S. Amirebrahimi, C.W. Devey, B. Dorschel, V. Ferrini, V. A. I. Huvenne, M. Jakobsson, J. Jencks, G. Johnston, G. Lamarche, L. Mayer, D. Millar, T.H. Pedersen, K. Picard, A. Reitz, T. Schmitt, M. Visbeck, P. Weatherall, R. Wigley // Frontiers in Marine Science. — 2019. — Vol. 6. — Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.

REFERENCES

1. Firsov, Yu. G. “Bathymetric study of Arctic Ocean for the determination of the continental shelf external boundary of Russia in Arctic.” *Geodesy and Cartography* 5 (2007): 48–58.

2. Firsov, Yu. G., V. N. Balandin, and I. V. Menshikov. "Analysis of foreign experience and prospects for Russian studies of the Arctic Ocean aimed at identifying outer limits of continental shelf." *Geodesy and Cartography* 9 (2010): 54–59.

3. Fridman, B. S. *Rezultaty gidrograficheskikh issledovaniy i kartografirovaniye rel'efa dna Arkticheskogo basseina dlya opredeleniya vneshnei granitsy kontinental'nogo shel'fa Rossii v Arktike*. SPb.: Nauka, 2007.

4. Weber, J.R. "Map of the Arctic Basin seafloor: a history of bathymetry and its interpretation." *Arctic* 36.2 (1983): 121–142.

5. Weber, J. R. "Maps of the Arctic Basin sea floor Part II: bathymetry and gravity of the Alpha Ridge: the 1983 CESAR Expedition." *Arctic* 40.1 (1987): 1–15.

6. Firsov, Yury Georgievich. "Modern bathymetric survey in the Arctic ocean in the context of the extended continental shelf determination in Arctic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.

7. Kaminskii, V. D., ed. *Arkticheskii bassein (geologiya i morfologiya)*. SPb.: VNIIO-keangeologiya, 2017.

8. Piskarev, Alexey, Victor Poselov, and Valery Kaminsky, eds. *Geologic Structures of the Arctic Basin*. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-77742-9.

9. Jakobsson, Martin, Norman Cherkis, John Woodward, Ron Macnab, and Bernard Coakley. "New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers." *EOS, Transactions American Geophysical Union* 81.9 (2000): 89–96. DOI: 10.1029/00EO00059.

10. Jakobsson, Martin, Ron Macnab, Larry Mayer, Robert Anderson, Margo Edwards, Jorn Hatzky, Hans Werner Schenke, and Paul Johnson. "An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses." *Geophysical Research Letters* 35.7 (2008). L07602. DOI: 10.1029/2008GL033520.

11. Jakobsson, Martin, et al. "The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO) version 3.0." *Geophysical Research Letters* 39.12 (2012). L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.

12. Jakobsson, Martin, Larry Mayer, and David Monahan. "Arctic ocean bathymetry: A necessary geospatial framework." *Arctic* 68 (2015): 41–47. DOI: 10.14430/arctic4451.

13. *Centralnyj Arkticheskij bassejn. Masshtab 1:2 500 000, po paralleli 75°. Proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002. № 91115.

14. Glebovsky, V.Y. "New Russian bathymetry map of the central Arctic basin." *Bathymetric mapping of the North Polar seas: Report of a Workshop at the Hawaii Mapping Research Group*. University of Hawaii, 2002. 9–11.

15. Alekseev, A. S., A. F. Zen'kov, A. M. Sharkov, and V. I. Kovalenok. "Obnovlennaya karta Severnogo Ledovitogo okeana." *Rossiiskie polyarnye issledovaniya* 1(11) (2013): 44–46.

16. Firsov, Y., and S. Egorov. "The new bathymetric data base of the Russian arctic sector in the context of the Russian Federation revised submission in respect of the extended continental shelf in the Arctic ocean." *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedreniya: sbornik materialov II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izdatel'stvo «Politekhnik», 2017. 489–492.

17. Mayer, Larry A., and Andy Armstrong. *US Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the US Arctic Ocean Margin*. Center for Coastal and Ocean Mapping, 2011.

18. Heezen, B. C., and M. Tharp. *Arctic Ocean Floor (Bathymetric Compilers)*. National Geographic Society, 1971. Scale 1:9 757 000.

19. Heezen, B. C., M. Tharp, and M. Pinther. *Map of the Arctic Region*. 1975. World 1:5000000.

20. *Relief dna Severnogo Ledovitogo okeana. Masshtab 1:5 000 000, proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO, VNIIOkeangeologija, RAN, 1998.

21. Jokat, Wilfried, ed. *The expedition of the research vessel «Polarstern» to the Arctic in 2008 (ARK-XXIII/3)*. Deutschland: Helmholtz-Gemeinschaft, 2009.

22. Edwards, Margo H., and Bernard J. Coakley. "SCICEX investigations of the Arctic Ocean system." *Geochemistry* 63.4 (2003): 281–328. DOI: 10.1078/0009-2819-00039.

23. Björk, Göran, Martin Jakobsson, Bert Rudels, James H. Swift, Leif Anderson, Dennis A. Darby, Jan Backman, Bernard Coakley, Peter Winsor, Leonid Polyak, Margo Edwards. "Bathymetry and deep-water exchange across the central Lomonosov Ridge at 88–89 N." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 54.8 (2007): 1197–1208. DOI: 10.1016/j.dsr.2007.05.010.

24. Jakobsson, Martin, and Christian Marcussen. *Lomonosov Ridge off Greenland 2007 (LOMROG)-Cruise Report*. Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate and energy, 2009.

25. Björk, Göran, Martin Jakobsson, Karen Assmann, Leif G. Andersson, Johan Nilsson, Christian Stranne, and Larry Mayer. “Bathymetry and oceanic flow structure at two deep passages crossing the Lomonosov Ridge.” *Ocean Science* 14.1 (2018): 1–13. DOI: 10.5194/os-14-1-2018.

26. *Chastichnoe peresmotrennoe predstavlenie Rossiiskoi Federatsii v Komissiyu po granitsam kontinental'nogo shel'fa v otnoshenii kontinental'nogo shel'fa Rossiiskoi Federatsii v Severnom Ledovitom okeane*. 2015.

27. Poselov, V. A., V. D. Kaminsky, S. M. Zholondz, V. V. Butsenko, O. E. Smirnov, Yu. G. Firsov, and A. G. Zinchenko. “Proof of the legal shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean.” *Mineral resources of Russia. Economics and management* 3(166) (2019): 48–54.

28. Zinchenko, Anna G., and Yury G. Firsov. “Geomorphology of the Arctic ocean in the context of The United Nations Convension on the law of the sea 1982.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.

29. Firsov, Yury G., and Anna G. Zinchenko. “The problems of naming the plains and basins of the CentralArctic area of rises of the Arctic Ocean.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 315–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331.

30. Wöflf, Anne-Cathrin, Helen Snaith, Sam Amirebrahimi, Colin W. Devey, Boris Dorschel, Vicki Ferrini, Veerle A. I. Huvenne, Martin Jakobsson, Jennifer Jencks, Gordon Johnston, Geoffroy Lamarche, Larry Mayer, David Millar, Terje Haga Pedersen, Kim Picard, Anja Reitz, Thierry Schmitt, Martin Visbeck, Pauline Weatherall, and Rochelle Wigley. “Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry.” *Frontiers in Marine Science* 6 (2019). Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov, Yury G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2019 г.

Received: August 14, 2019.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-893-901

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HEATING TEMPERATURE OF THE POLYURETHANE SHOCK ABSORBER UNDER DYNAMIC LOADING

A. A. Chernykh¹, S. N. Yakovlev²

¹ — St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

² — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russian Federation

The rationale for the need to replace the traditional vibration insulation material - rubber with a more advanced polyurethane is given. The aim of the work is to obtain an empirical relationship to determine the heating temperature of the shock absorber depending on the loading conditions and the ratio of its geometric dimensions. The vibration damping mechanism using viscoelastic materials is described in the paper. Detailed description of the test bench for carrying out an experimental study to determine the heating temperature of a shock absorber depending on its loading conditions, as well as detailed description of the experimental research methodology and the rationale for choosing the dynamic loading frequency, are presented.

A polyurethane elastomer of three hardnesses of the Elast trademark of Synair company (United Kingdom) is chosen as an experimental material. The empirical relationship obtained in the work allows determining the heating temperature of the vibration-insulating shock absorber array, working under compression under dynamic loading, as a function of five variables: static compression strain, loading frequency, amplitude of forced oscillations, polyurethane hardness, and form factor of the vibration-insulating shock absorber array. The presented empirical dependence allows determining the operating temperature of the shock absorber at the design stage and, as a result, its durability. The obtained dependence indicates the additivity of heating the shock absorber from static and dynamic loading. More significant contribution to heating the shock absorber from the side of static deformation has been indicated. When exceeding 15% deformation, there is a significant decrease in the dissipative capacity of elastomeric materials, which leads to increased heating the vibration-insulating shock absorber array.

In conclusion, the prospective use of polyurethane elastomers as a vibration-proof shock absorbers material is justified. The indisputable advantage of polyurethanes compared with the rubber is indicated. The main advantage is a higher elastic modulus in the polyurethane compression compared with the rubber with the same hardness.

Keywords: polyurethane, shock absorber, heating temperature, rubber-metal block, form factor, heating additivity, shock absorber durability.

For citation:

Chernysh, Aleksandr A., and Stanislav N. Yakovlev. "Experimental determination of the heating temperature of the polyurethane shock absorber under dynamic loading." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 893–901. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-893-901.

УДК 62-752.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОЛИУРЕТАНОВОГО АМОРТИЗАТОРА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А. А. Черныш¹, С. Н. Яковлев²

¹ — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведено обоснование необходимости замены традиционного виброизоляционного материала — резины — на более совершенный материал — полиуретан. Целью работы являлось получение эмпирической

зависимости для определения температуры нагрева амортизатора в зависимости от условий нагружения и соотношения его геометрических размеров. В работе дано описание механизма демпфирования колебаний с использованием вязкоупругих материалов. Представлены подробные описания стенда для проведения экспериментального исследования по определению температуры нагрева амортизатора в зависимости от условий его нагружения, и методики экспериментального исследования, а также дано обоснование выбора частоты динамического нагружения. В качестве экспериментального материала выбран полиуретановый эластомер торговой марки Elast фирмы Synair (Великобритания) трех твердостей. Полученная в работе эмпирическая зависимость позволяет определить температуру нагрева виброизоляционного массива амортизатора, работающего на сжатие при динамическом нагружении как функцию пяти переменных: величины статической деформации сжатия, частоты нагружения, амплитуды вынужденных колебаний, твердости полиуретана и величины коэффициента формы виброизоляционного массива амортизатора. Представленная эмпирическая зависимость позволяет на стадии проектирования определить рабочую температуру амортизатора и как следствие его долговечность. Данная зависимость свидетельствует об аддитивности нагрева амортизатора от статического и динамического нагружения. Указано на более значительный вклад в нагрев амортизатора со стороны статической деформации. При превышении 15 % деформации происходит значительное снижение диссипативной возможности эластомерных материалов, что приводит к повышенному нагреву виброизоляционного массива амортизатора. Обоснована перспективность применения полиуретановых эластомеров в качестве виброизоляционного материала амортизаторов. Указано такое неоспоримое преимущество полиуретанов по сравнению с резинами, как более высокий модуль упругости при сжатии у полиуретана по сравнению с резинами при одинаковой твердости.

Ключевые слова: полиуретан, амортизатор, температура нагрева, блок резинометаллический, коэффициент формы, аддитивность нагрева, долговечность амортизатора.

Для цитирования:

Черныш А. А. Экспериментальное определение температуры нагрева полиуретанового амортизатора при динамическом нагружении / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 893–901. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-893-901.

Введение (Introduction)

В современном судостроении широкое распространение получили амортизаторы, применяемые для демпфирования (уменьшения) амплитуды вынужденных колебаний циклического или ударного воздействия от недостаточно уравновешенных агрегатов на корпус судна (активная изоляция) или уменьшения амплитуды передаваемых колебаний от вибрирующего корпуса судна к смонтированному на нем оборудованию (пассивная изоляция).

Демпфирование колебаний представляет собой процесс диссипации энергии внутри виброизоляционного массива амортизатора под воздействием динамических нагрузок. При этом механическая энергия колебаний преобразуется в тепловую. Количество рассеиваемой энергии является мерой уровня демпфирования материала. Демпфирующий виброизоляционный массив амортизатора изменяет частоту колебаний опорных пластин амортизатора и увеличивает потери энергии при прохождении колебаний внутри материала. Наиболее широкое распространение в качестве виброизоляционного материала получила резина. Помимо резины, для виброизоляционных целей используют войлок, пробку, минеральную вату и другие материалы.

В последнее время в качестве виброизоляционного материала при изготовлении амортизаторов начали применять полиуретановые эластомеры, обладающие рядом преимуществ по сравнению с резинами [1]–[3]. К ним относятся высокая прочность, эластичность и довольно широкий рабочий диапазон температур: от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Целью данной работы является получение эмпирической зависимости для определения температуры нагрева полиуретанового виброизоляционного массива амортизаторов в зависимости от условий нагружения и его геометрических размеров.

Полиуретановые эластомеры относятся к виброизоляционным материалам, которые имеют высокую эффективность гашения вибраций [4]. Эти свойства полиуретанам обеспечивают средние показатели модуля упругости при сжатии (для полиуретана твердостью 55 ShA начальный

модуль упругости при сжатии равен примерно 5 МПа) в сочетании с высокой поглощающей способностью.

Основой механизма демпфирования вибраций является вязкоупругое поведение полиуретановых эластомеров. Термин «вязкоупругий» означает, что демпфирующий материал обладает как вязкой, так и упругой составляющей поведения. Упругий материал — тот, который сохраняет энергию во время действия нагрузки и возвращает всю энергию после того как нагрузка будет удалена. Вязкий материал не возвращает энергию, так как часть энергии теряется на внутреннее трение (гистерезис). Таким образом, в вязкоупругом материале сохраняется часть энергии во время действия нагрузки, а затем большая часть преобразуется в тепло. При применении амортизаторов энергия колеблющегося тела поглощается виброизоляционным массивом и преобразуется в некоторое количество тепла. Такой процесс обычно называют *поглощением энергии*, или *гашением вибрации*, хотя речь идет о превращении кинетической энергии колеблющегося объекта в тепловую энергию в полном соответствии с законом сохранения энергии.

Температура нагрева виброизоляционного массива амортизатора постепенно повышается до тех пор, пока не наступит тепловой баланс между теплом выделяемым при деформации и теплом, уходящим в окружающее пространство. Нагрев полиуретанового виброизоляционного массива приводит к его размягчению (при нагреве до 40 °С модуль упругости полиуретана при сжатии снижается на 20 %) и появлению заметной нелинейности зависимости *сила – деформация*. Принимая во внимание все ранее изложенное, можно заключить, что основным критерием работоспособности амортизатора является температура нагрева виброизоляционного массива.

Опыт эксплуатации резиновых амортизаторов и имеющиеся данные о работе полиуретановых амортизаторов позволяют сделать вывод о том, что температура нагрева в основном определяет долговечность амортизатора. Поэтому необходимо получить экспериментальные данные о нагреве амортизатора в зависимости от условий нагружения, чтобы на этапе проектирования можно было определить рабочую температуру амортизатора и внести определенные изменения в его конструкцию, которые позволят уменьшить температуру нагрева виброизоляционного массива амортизатора.

При работе амортизатор испытывает два вида деформации:

- статическую деформацию — деформацию сжатия амортизатора до положения равновесия, чаще всего от веса амортизируемого объекта;
- динамическую деформацию — периодическое смещение центра тяжести амортизируемого объекта от положения статического равновесия под действием синусоидальной (гармонической) возмущающей силы.

Полиуретановые эластомеры в свободном (недеформированном) состоянии представляют собой аморфные вещества, у которых отсутствует кристаллическая решетка, при этом макромолекулы расположены в произвольном порядке, без какой-либо регулярности [5]. При приложении статической нагрузки макромолекулы полиуретанового эластомера частично выпрямляются, приходя в ориентированное состояние (рис. 1).

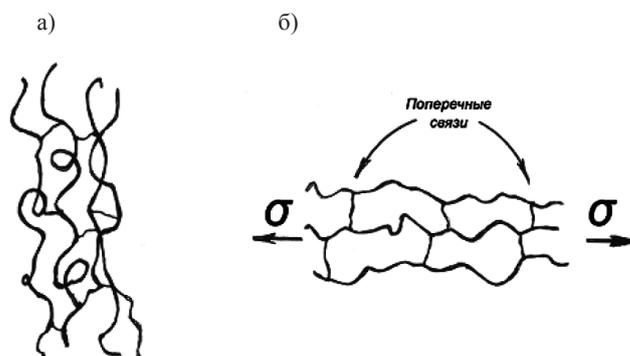


Рис. 1. Схема деформации макромолекул полиуретановых эластомеров, соединенных поперечными связями: а — эластомер в исходном недеформированном состоянии; б — состояние эластомера в процессе деформирования под действием приложенных напряжений

После снятия нагрузки макромолекулы полиуретанового эластомера возвращаются в исходное состояние.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С целью исследования вопросов нагрева амортизатора был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий моделировать нагружение амортизатора. Кинематическая схема стенда приведена на рис. 2.

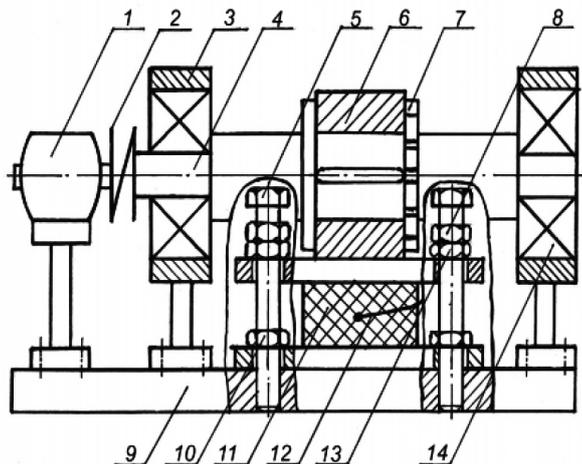


Рис. 2. Кинематическая схема стенда:

- 1 — электродвигатель; 2 — муфта; 3 — стойка; 4 — вал; 5 — винт;
6 — кулачок; 7 — гайка; 8 — контргайка; 9 — основание; 10 — прижимная гайка;
11 — виброизоляционный массив амортизатора; 12 — датчик температуры;
13 — нагружающая гайка; 14 — подшипник

Вращение вала 4, на котором установлен кулачок 6, осуществляется с помощью асинхронного электродвигателя 5АИ71В2 мощностью $P_{эл} = 1,1$ кВт. Частоту вращения вала, благодаря частотному преобразователю, можно регулировать в пределах от 400 об/мин до 3000 об/мин. Экспериментальный амортизатор приведен на рисунке в состоянии минимальной деформации, которая создается благодаря закручиванию нагружающих гаек 13.

Динамическая нагрузка моделируется с помощью кулачка, профиль которого соответствует синусоидальному закону нагружения. Схема, поясняющая картину нагружения амортизатора с помощью кулачка, представлена на рис. 3.

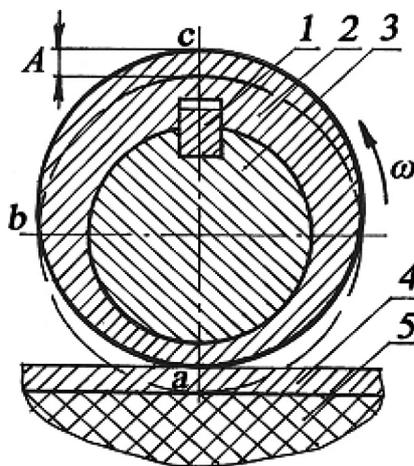


Рис. 3. Схема нагружения амортизатора: 1 — шпонка; 2 — кулачок; 3 — вал;
4 — верхняя пластина амортизатора; 5 — виброизоляционный массив амортизатора

Минимальной деформации амортизатора соответствует контакт точки *a* кулачка с верхней пластиной амортизатора. В дальнейшем при вращении кулачка в контакт вступает точка *b*. Это состояние соответствует средней деформации или статической. Максимальная деформация испытуемого амортизатора достигается во время контакта точки *c* кулачка с верхней пластиной амортизатора 4. Величина эксцентриситета *A* равна амплитуде колебаний амортизатора. Для моделирования колебаний современных судовых силовых агрегатов были изготовлены четыре кулачка с эксцентриситетом 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 мм.

Температура нагрева виброизоляционного массива амортизатора зависит от величины относительной деформации сжатия, от параметров динамического нагружения, таких как частота нагружения и амплитуда колебаний и твердости полиуретанового эластомера, т. е. температура нагрева является функцией четырех переменных. Однако неучтенным оказался такой параметр амортизатора, как соотношение его геометрических размеров, определяющее площадь теплоотдачи амортизатора. Для исключения этого недостатка были изготовлены три партии амортизаторов трех твердостей с высотой виброизоляционного массива, равной 40, 45, 50, 55 и 60 мм. В качестве аналога при изготовлении опытных амортизаторов был взят амортизатор БРМ102 (блок резино-металлический) с габаритными размерами виброизоляционного массива 250 × 50 × 50 мм. Данный амортизатор относится к типу КАС (корабельный амортизатор сварной), у которого резиновый виброизоляционный массив привулканизирован или приварен к металлическим пластинам.

Одной из важнейших расчетных характеристик амортизатора является жесткость, которая зависит от модуля упругости эластомера при сжатии, условий контактирования виброизоляционного массива с опорными пластинами и легкости деформирования боковой поверхности. Возможность деформирования эластомерного виброизоляционного массива амортизатора зависит от отношения площади опорной поверхности к площади боковой поверхности, способной к большим деформациям [6]. Характер деформации виброизоляционного массива амортизатора приведен на рис. 4.

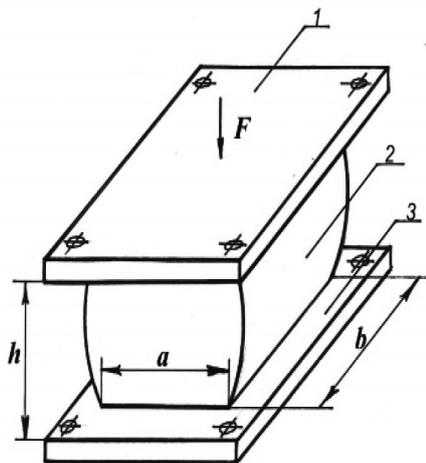


Рис. 4. Деформация виброизоляционного массива амортизатора:
 1 — верхняя пластина; 2 — виброизоляционный массив; 3 — нижняя пластина;
a — ширина массива; *b* — длина массива; *h* — высота массива

Деформативность эластомерных массивов принято оценивать коэффициентом формы Φ согласно выражению

$$\Phi = \frac{S_{\text{тор}}}{S_{\text{бок}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{тор}}$ — площадь одной опорной торцевой поверхности, мм²;
 $S_{\text{бок}}$ — площадь свободной боковой поверхности, мм².

Для виброизоляционных эластомерных массивов амортизаторов, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, коэффициент формы определяют по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)h}, \quad (2)$$

где a — ширина виброизоляционного массива амортизатора, мм;

b — длина виброизоляционного массива амортизатора, мм;

h — высота виброизоляционного массива амортизатора, мм.

В качестве экспериментального материала был выбран полиуретановый эластомер торговой марки Elast фирмы Synair (Великобритания) твердостью 45 ShA, 50 ShA и 55 ShA. Проведенные ранее сравнительные экспериментальные исследования по определению коэффициента поглощения энергии, модуля внутреннего трения и циклической прочности показали его высокие физико-механические свойства и перспективность использования данного эластомера в качестве виброизоляционного материала [7].

Методика экспериментального исследования включала следующий порядок действий.

1. Опытный амортизатор сжимали до относительной статической деформации 0,1ε (10 %) и включали вращение электродвигателя с частотой $f = 37$ Гц (2200 об/мин) с установленным на валу кулачком с эксцентриситетом $A = 0,6$ мм.

2. По прошествии некоторого времени (примерно 10 мин) рост температуры прекращался и ее окончательное значение записывали в протокол испытаний.

3. Затем устанавливали очередной амортизатор с другой высотой виброизоляционного массива и повторяли эксперимент.

4. Все испытания проводили для амортизаторов трех твердостей определенной высоты в количестве трех штук, при этом значения температуры, отличающиеся от среднего значения более чем на 10 %, в расчет не принимали.

5. Полученные данные были обработаны методами математической статистики и получили искомую эмпирическую зависимость влияния коэффициента формы виброизоляционного массива амортизатора на температуру нагрева.

Из широкого спектра частот вынужденных механических колебаний для моделирования нагружения амортизатора была выбрана частота 37 Гц, соответствующая частоте вращения 2200 об/мин вала силовых агрегатов. Данный выбор был осуществлен на основании многолетних наблюдений за эксплуатацией амортизаторов различных силовых агрегатов, в первую очередь двигателей внутреннего сгорания.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Проведенные экспериментальные исследования показали, что с ростом коэффициента формы Φ амортизатора температура нагрева растет по экспоненциальной зависимости. На рис. 5 представлена зависимость температуры нагрева виброизоляционного массива амортизатора от коэффициента формы Φ при относительной статической деформации 0,1ε (10 %), частоте нагружения $f = 37$ Гц и амплитуде колебаний $A = 0,6$ мм.

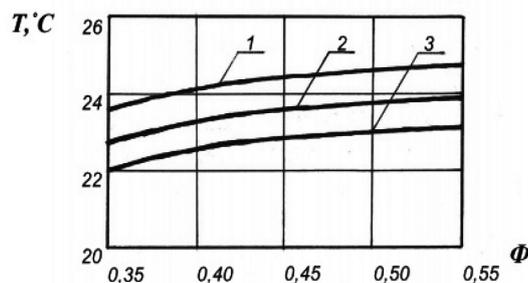


Рис. 5. Зависимость температуры нагрева амортизатора от коэффициента формы: 1 — полиуретан 55 ShA; 2 — полиуретан 50 ShA; 3 — полиуретан 45 ShA

Зависимости, представленные на рис. 5, показывают рост температуры нагрева полиуретана с уменьшением площади теплотдачи.

Окончательно выражение для определения температуры нагрева виброизоляционного массива амортизатора, работающего на сжатие при динамическом нагружении как функция пяти переменных, можно представить следующим образом:

$$T = T_b + \frac{95\varepsilon^{2,4-0,015ShA} + 39(2\pi fA)^{1,8-0,004ShA}}{2,1-0,016ShA} \frac{1}{1,28-\Phi^2}, \quad (3)$$

где T_b — температура окружающего воздуха, 20 °С;

ε — величина относительной деформации сжатия;

ShA — твердость полиуретана в единицах по Шору, шкала A;

f — частота нагружения, Гц;

A — амплитуда колебаний, мм;

Φ — коэффициент формы виброизоляционного массива амортизатора.

Полученные в ходе экспериментального исследования эмпирические зависимости по определению температуры нагрева виброизоляционного массива полиуретанового амортизатора позволяют на стадии проектирования определить рабочую температуру амортизатора в зависимости от условий его статического и динамического нагружения.

Температура нагрева виброизоляционного массива амортизатора при работе является важнейшей характеристикой, определяющей долговечность амортизатора.

Выводы (Summary)

1. Представленные в работе эмпирические зависимости свидетельствуют об аддитивности (суммировании соответствующих величин) нагрева амортизатора от статического и динамического нагружения, причем статическая деформация вносит более существенный вклад по сравнению с составляющей нагрева от динамического нагружения. Этот вывод можно сделать на основании анализа формулы (3), откуда видно, что показатель степени при статической деформации больше, чем аналогичный показатель при скорости.

2. При величине статической деформации более 15 %, вероятно, макромолекулы эластомеров переходят в ориентированное состояние, при котором происходит заметное снижение диссипативной возможности (рассеивание тепла вовне) виброизоляционного массива амортизатора.

3. Перспективность применения полиуретановых эластомеров в качестве виброизоляционного материала обоснована более высоким модулем упругости при сжатии, чем у резин [8]–[10]. При одинаковой твердости (в диапазоне 45–55 ShA) полиуретана и резины модуль упругости при сжатии полиуретана примерно на 30 % больше, чем резины [11]–[12]; на соответствующую величину уменьшается статическая деформация амортизатора, что приводит к уменьшению температуры нагрева при работе и увеличению долговечности амортизатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valero M. F. Preparation and properties of polyurethanes based on castor oil chemically modified with yucca starch glycoside / M. F. Valero, J. E. Pulido, J. C. Hernández, J. A. Posada, A. Ramírez, Z. Cheng // Journal of Elastomers & Plastics. — 2009. — Vol. 41. — Is. 3. — Pp. 223–244. DOI: 10.1177/0095244308091785.
2. Yakovlev S.N. Contact Temperature of a Cuff and a Rotating Shaft / S. N. Yakovlev, V. L. Mazurin // Russian Engineering Research. — 2019. — Vol. 39. — Is. 4. — Pp. 279–282. DOI: 10.3103/S1068798X19040191.
3. Schafer K. Investigation of the specific adhesion between polyurethane foams and thermoplastics to suited material selection in light weight structures / K. Schafer, S. Anders, S. Valentin, F. Helbig, J. Tröltzsch, I. Roth-Panke, D. Nestler, L. Kroll // Journal of Elastomers & Plastics. — 2018. — Vol. 50. — Is. 8. — Pp. 720–736. DOI: 10.1177/0095244318765040.
4. Kahraman H. Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt / H. Kahraman, E. Haberstroh // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2014. — No. 5. — Pp. 296–298.

5. Solota S. Harteproofung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren / S. Solota // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2016. — No. 7. — Pp. 26–31.
6. Yakovlev S. N. Vibroisoating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction / S. N. Yakovlev, V. L. Mazurin // Magazine of Civil Engineering. — 2017. — No. 6 (74). — Pp. 53–60.
7. Яковлев С. Н. Экспериментальное исследование виброизоляционных свойств современных конструкционных полиуретанов / С. Н. Яковлев, А. А. Черныш // Вопросы материаловедения. — 2019. — № 1 (97). — С. 120–127. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-120-127.
8. Oxley J.C. Rheological studies of functional polyurethane composite with solid additives: Part 2 — Rheology of polyurethane composite with solid additives (calcium iodate particles and aluminum flakes) / J. C. Oxley, J. L. Smith, S. I. Bakhtiyarov, P. M. Baldovi // Journal of Elastomers & Plastics. — 2018. — Vol. 50. — Is. 4. — Pp. 312–324. DOI: 10.1177/0095244317729558.
9. Li S. Effect of elastomer on flame retardancy, thermal degradation, and mechanical properties of intumescent flame-retardant polyethylene / S. Li, B. Li // Journal of Elastomers & Plastics. — 2011. — Vol. 43. — Is. 3. — Pp. 257–273. DOI: 10.1177/0095244311398638.
10. Neise E. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse / E. Neise, C. Zepp // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2013. — No. 1. — Pp. 23–30.
11. Oßwald K. Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe / K. Oßwald, K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, W. Grellmann // KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe. — 2017. — Vol. 70. — Is. 8. — Pp. 498–506.
12. Mizera K. Thermal properties of polyurethane elastomers from soybean oil-based polyol with a different isocyanate index / K. Mizera, J. Ryszkowska // Journal of Elastomers & Plastics. — 2019. — Vol. 51. — Is. 2. — Pp. 157–174. DOI: 10.1177/0095244318772323.

REFERENCES

1. Valero, Manuel F., Jorge E. Pulido, Jorge E. Pulido, José A. Posada, José A. Posada, and Zhengdong Cheng. “Preparation and Properties of Polyurethanes based on Castor Oil Chemically Modified with Yucca Starch Glycoside.” *Journal of Elastomers and Plastics* 41.3 (2009): 223–244. DOI: 10.1177/0095244308091785.
2. Yakovlev, S.N., and V.L. Mazurin. “Contact Temperature of a Cuff and a Rotating Shaft.” *Russian Engineering Research* 39.4 (2019): 279–282. DOI: 10.3103/S1068798X19040191.
3. Schäfer, Kay, Susann Anders, Stefan Valentin, Frank Helbig, Jürgen Tröltzsch, Isabelle Roth-Panke, Daisy Nestler, and Lothar Kroll. “Investigation of the specific adhesion between polyurethane foams and thermoplastics to suited material selection in lightweight structures.” *Journal of Elastomers & Plastics* 50.8 (2018): 720–736. DOI: 10.1177/0095244318765040.
4. Kahraman, Hart, and Ebel Haberstroh. “Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 5 (2014): 296–298.
5. Solota, Sante “Harteproofung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 7 (2016): 26–31.
6. Yakovlev, Stanislav Nikolaevich, and Valeriy Leonidovich Mazurin. “Vibroisoating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction.” *Magazine of Civil Engineering* 6(74) (2017): 53–60.
7. Yakovlev, S. N., and A. A. Chernysh. “Experimental study of vibroinsulating properties of modern structural polyurethane.” *Inorganic Materials: Applied Research* 1(97) (2019): 120–127. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-120-127.
8. Oxley, Jimmie C., James L. Smith, Sayavur I. Bakhtiyarov, and Philipp M. Baldovi. “Rheological studies of functional polyurethane composite with solid additives: Part 2—Rheology of polyurethane composite with solid additives (calcium iodate particles and aluminum flakes).” *Journal of Elastomers & Plastics* 50.4 (2018): 312–324. DOI: 10.1177/0095244317729558.
9. Li, Sheng, and Bin Li. “Effect of elastomer on flame retardancy, thermal degradation, and mechanical properties of intumescent flame-retardant polyethylene.” *Journal of Elastomers & Plastics* 43.3 (2011): 257–273. DOI: 10.1177/0095244311398638.
10. Neise, Zepp. “Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 1(2013): 23–30.
11. Oßwald, K., K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, and W. Grellmann. “Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe.” *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe* 70.8 (2017): 498–506.
12. Mizera, Kamila, and Joanna Ryszkowska. “Thermal properties of polyurethane elastomers from soybean oil-based polyol with a different isocyanate index.” *Journal of Elastomers & Plastics* 51.2 (2019): 157–174. DOI: 10.1177/0095244318772323.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черныш Александр Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГОАУ «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Лоцманская ул., 3
e-mail: a.chernysh1954@mail.ru
Яковлев Станислав Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 29
e-mail: stannik59@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernysh, Aleksandr A. —
PhD, associate professor
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lozmanskaya Str., St. Petersburg,
190121, Russian Federation
e-mail: a.chernysh1954@mail.ru
Yakovlev, Stanislav N. —
PhD, associate professor
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University (SPbPU)
29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg,
195251, Russian Federation
e-mail: stannik59@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2019 г.
Received: July 23, 2019.*

STUDYING THE PHYSICAL PROCESSES OF FORMING THE ADHESIVE STRENGTH OF BIMETALLIC BEARING FOR MARINE ENGINEERING

R. V. Kuznetsov¹, E. O. Olkhovik²

¹ — PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

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

The results of a metallographic analysis of a bimetallic bearing assembly for hull parts of marine engineering are presented in the paper. The adhesive properties at the Al-Fe metal boundary are poorly studied at present; the physical processes of strength formation are very heterogeneous and depend on the parameters of the technological process. The samples obtained by stamping a commercial liquid Al-Si-Mg alloy in the presence of powder bush from a pure iron with 15 percent volume porosity have been studied in the paper. Metallographic analysis is performed using a Carl Zeiss Axiovert 200 MAT motorized optical microscope equipped with a Thixomet Pro image analyzer. Samples with different levels of adhesive strength, from unsatisfactory to the highest values, are selected for the research. The strength value correlates well with technological parameters such as stamping pressure and the temperature of preheating of the forming rigging. However, it was found that the mechanisms of Al and Fe compound are different. At low stamping pressures and poor adhesion strength of the compound, the main reason for the lack of contact at the metal boundary is a strong temperature gradient and various rates of shrinkage processes that sever the contact zone. Under conditions of medium stamping pressures, liquid aluminum destroys the ferrite network of the powder bush and penetrates into free pores to a depth of 1-2 mm, forming a high-quality adhesive compound. The bimetal boundary zone has a high density, finely dispersed structure of aluminum without traces of graphite, and the powder bush contains all the signs of secondary crystallization in the form of network structure of a ferrite. Under conditions of high stamping pressures, liquid aluminum interacts with iron, forming metastable intermetallic phases at the metal interface, while aluminum also penetrates into the pores of the ferrite network. The presence of intermetallic compounds increases the adhesive strength of the compound. New physical principles aimed at finalizing the technology for obtaining the bimetallic bearing of marine engineering at the stage of obtaining a workpiece have been identified and disclosed.

Keywords: bimetallic bearing, metallographic analysis, marine engineering, adhesive strength.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olhovik. "Studying the physical processes of forming the adhesive strength of bimetallic bearing for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

УДК 621.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ДЛЯ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Р. В. Кузнецов¹, Е. О. Ольховик²

¹ — ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

В данном исследовании приводятся результаты металлографического анализа биметаллического подшипникового узла для корпусных деталей судового машиностроения. Отмечается, что в настоящее время адгезионные свойства на границе металлов Al-Fe слабо изучены, физические процессы формирования прочности весьма разнородны и зависят от параметров технологического процесса. В работе изучены

образцы, полученные методом штамповки коммерческого жидкого сплава АК9ч при наличии порошковой втулки из чистого железа с 15-процентной объемной пористостью. Металлографический анализ проводился с помощью моторизованного оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro. Для исследований были отобраны образцы с различным уровнем адгезионной прочности — от неудовлетворительной до самых высоких значений. Значение прочности хорошо коррелировалось с такими технологическими параметрами, как давление штамповки и температура предварительного нагрева формообразующей оснастки. Однако, как было установлено, механизмы соединения Al и Fe были различными. При низких давлениях штамповки и неудовлетворительной адгезионной прочности соединения основной причиной отсутствия контакта на границе металлов наблюдался сильный температурный градиент и различные скорости усадочных процессов, которые разорвали зону контакта. В условиях средних давлений штамповки жидкий алюминий разрушает ферритную сетку порошковой втулки, проникая в свободные поры на глубину в 1–2 мм, образуя при этом качественное адгезионное соединение. Зона границы биметаллов имеет высокую плотность, мелкодисперсное строение алюминия без следов графита, а порошковая втулка содержит все признаки вторичной кристаллизации в виде сеточной структуры феррита. В условиях высоких давлений штамповки жидкий алюминий взаимодействует с железом, образуя метастабильные интерметаллидные фазы на границе раздела металлов, при этом также происходит проникновение алюминия в поры ферритной сетки. Наличие интерметаллидов увеличивает адгезионную прочность соединения. В работе были выявлены и раскрыты новые физические принципы, направленные на доработку технологии получения биметаллического подшипника судового машиностроения на этапе заготовительного производства.

Ключевые слова: биметаллический подшипник, металлографический анализ, судовое машиностроение, адгезионная прочность.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Исследование физических процессов формирования адгезионной прочности биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

Введение (Introduction)

Согласно Указу Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 [1] «О стратегии научно-технологического развития РФ на долгосрочный период» приоритетами развития являются направления, которые позволят в ближайшем будущем получить новые научные и научно-технические результаты в области интеллектуальных производственных технологий, новых материалов и способов конструирования современных машин и механизмов.

Развитие современного судового машиностроения в ближайшие десятилетия будет определяться следующими факторами:

- развитие новых производственных технологий;
- развитие прикладных наук в области проектирования машин и механизмов;
- более широкое применение композиционных материалов.

В существующих изделиях судового машиностроения (насосы, клапаны, гидравлические установки, распределители и т. п., корпуса которых изготовлены из коммерческих алюминиевых сплавов), большая часть подшипников скольжения и втулок изготавливается из цветных сплавов, к которым относятся баббиты, бронзы, латуни или специальные сплавы на основе меди. Очевидно, что данные материалы «работают» на пределе своих эксплуатационных возможностей, а их наиболее актуальной альтернативой являются композиционные материалы, в том числе порошковые.

Постоянное расширение области применения и, как следствие, увеличение объема производимых биметаллических изделий, в значительной мере, становится возможным благодаря появлению новых технологий «сращивания» разнородных материалов. Соединения алюминия и железа известны в технике [2]–[4], в том числе металлургические или полученные в результате специальных способов сварки. Они обладают рядом технологических сложностей при производстве, а отдельные физические явления практически не изучены (например, воздействие механического давления в процессе затвердевания алюминия для увеличения свойств адгезии).

Ранее проведенные исследования, направленные на разработку экспериментальной установки [5], [6] и основ технологии [7], [8] штамповки жидкого алюминия при наличии порошковой втулки, показали работоспособность данной технологии [9], в результате чего был достигнут качественный результат в виде высоких адгезионных свойств на границе алюминий – порошковый материал. Однако поскольку непосредственно технологический процесс формирования адгезионной прочности и его физические составляющие не были подробно изучены, этому вопросу посвящена данная работа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данной работе в качестве материалов исследований использовались экспериментальные заготовки для биметаллического подшипникового узла, полученного методом штамповки жидкого алюминиевого сплава АК9ч (металл основы — табл. 1) и порошковой втулки из АНС100.29 (материал подшипника — табл. 2). Всего для исследований было отобрано пять образцов, полученных в различных технологических условиях, отличающихся значениями давления штамповки жидкого металла (рис. 1). При изготовлении порошковой втулки соблюдался следующий технологический режим: давление прессования — 300 МПа, температура спекания — $1150 \pm 10^\circ\text{C}$, величина объемной пористости — 15 % (определялась штамповой оснасткой).

Таблица 1

Химический состав сплава АК9ч (ГОСТ 1583–93)

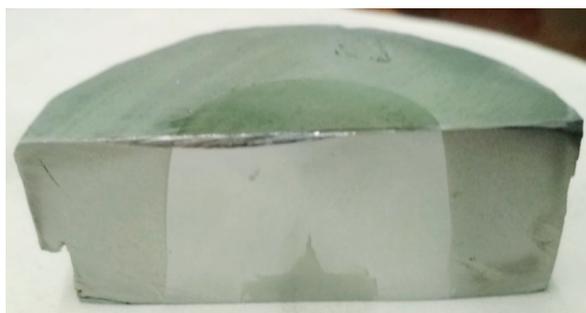
Al, %	Si, %	Mn, %	Mg, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %	Ni, %	Be, %	Pb, %	Sn, %	Примесей, %
86,94–91,63	8–10,5	0,2–0,5	0,17–0,3	до 1	до 0,3	до 0,3	до 0,1	до 0,1	до 0,05	до 0,01	всего 1,5

Таблица 2

Химический состав в % порошка АНС100.29

Fe, %	C, %	Окислы, %
Основной	0,024	0,17

а)



б)



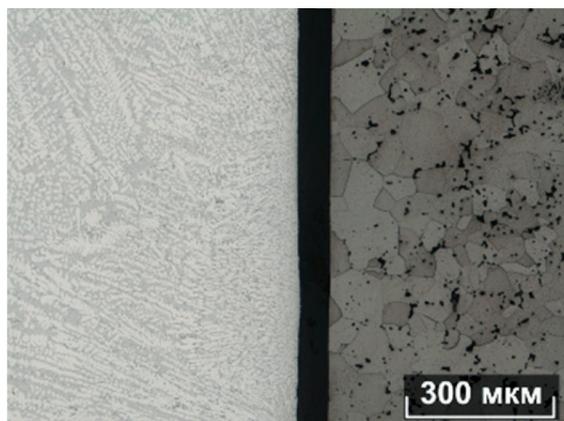
Рис. 1. Экспериментальный образец биметаллического подшипникового узла: а — давление штамповки 50 МПа; б — давление штамповки 90 МПа

Металлографический анализ проводился с помощью моторизованного оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro.

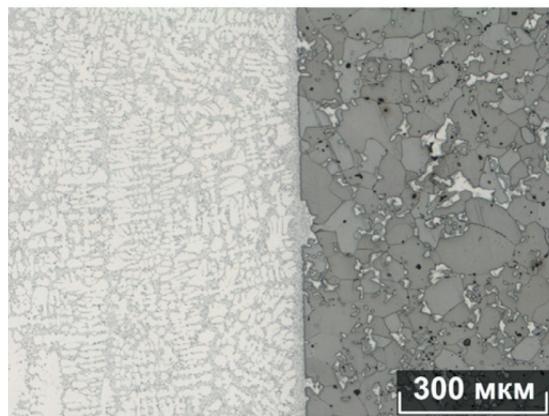
Результаты (Results)

По образцу № 1 (температура разогрева штамповой оснастки (500 ± 50) °С температура выпуска металла (АК9ч) из печи, температура заливки (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 17$ МПа), взаимодействие в зоне контакта отсутствует, адгезионная прочность неудовлетворительная (отсутствует) — рис. 2, а. Наблюдаются только частичные пятна контакта на границе Al – Fe. Из макростроения образца очевидно, что затвердевание алюминиевого сплава происходило отдельно, без взаимодействия с порошковым материалом.

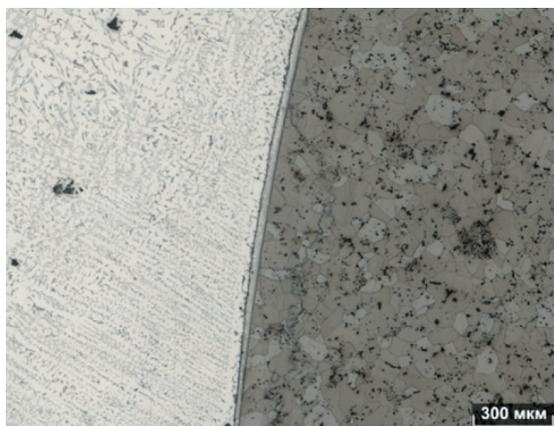
а)



б)



в)



г)

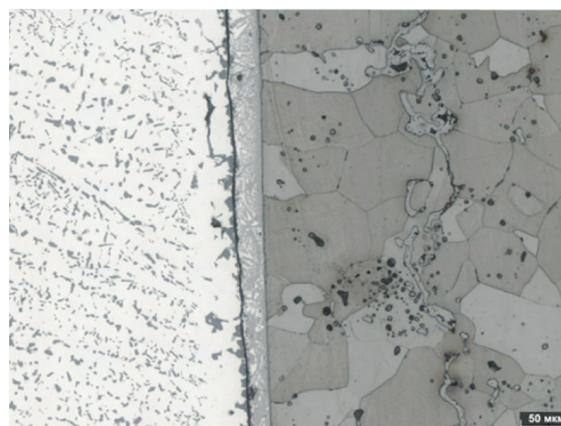


Рис. 2. Микроструктурный анализ экспериментальных образцов:

а — № 1 на границе Al-Fe; б — № 2 на границе Al-Fe; в — № 3 на границе Al-Fe (300 мкм);
 г — № 3 на границе Al-Fe (50 мкм)

Структура сплава АК9ч в окрестности зоны контакта с порошковым материалом АНС100.29 резко изменяется, переходя от плотной мелкодисперсной к более грубой. Дендриты твердого раствора столбчатые, их дисперсность повышается по мере приближения к зоне контакта, что свидетельствует о направленном характере затвердевания и существенном тепловом градиенте [10], без постоянного контакта двух материалов. Частицы эвтектического кремния в зоне контакта мелкодисперсные, сфероидизированные. По мере удаления от зоны контакта они незначительно огрубляются, присутствуют интерметаллиды железосодержащей β -фазы размером до 15 мкм.

Структура порошковой втулки представляет собой ферритное зерно, внутри и по границам которого располагаются поры диаметром до 50 мкм. Поверхность пор не окислена, следы проникновения силумина в них отсутствуют. Объемная доля пор снижается по мере приближения к поверхности основы. Данный образец является характерным для технологии гравитационного литья или литья под низким давлением. Отсутствие полного контакта на границе Al – Fe объясняется различной температурной усадкой материалов при недостатке давления штамповки жидкого металла.

По образцу № 2 (температура штамповой оснастки (500 ± 50) °С температура выпуска металла из печи (температура заливки) составляет (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 50$ МПа) — рис. 2, б. Присутствует ярко выраженное взаимодействие материала основы и порошкового материала, наблюдается проникновение алюминиевого сплава в поры на глубину свыше 1 мм.

Структура силумина в окрестности зоны контакта изменена. Дендриты в окрестности зоны контакта разориентированные, частицы эвтектического кремния мелкодисперсные, сфероидизированные, их размер непосредственно в зоне контакта субмикронный. По мере удаления от зоны контакта дендритная структура становится столбчатой, частицы кремния остаются сфероидизированными, но их размер повышается, отдельные частицы имеют размер 10–12 мкм. Железосодержащие интерметаллиды в алюминиевой основе практически отсутствуют.

Структура порошковой втулки также представляет собой ферритное зерно, внутри и по границам которого располагаются крупные поры размером более 200 мкм, создающие непрерывную сеть. Все крупные поры втулки полностью заполнены алюминием. Граница сталь–алюминий внутри пор полностью покрыта интерметаллидами, вероятно, системы AlFeSi. Объемная доля пор снижается по мере удаления от зоны контакта.

По образцу № 3 порошковая втулка была предварительно оцинкована горячим способом с толщиной покрытия цинка 3–6 мкм. Параметры технологического процесса жидкой штамповки: температура штамповой оснастки равна (700 ± 50) °С, температура выпуска металла из печи (температура заливки) составляет (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 100$ МПа [11], [12]. На границе контакта металлов (рис. 2, в и г) оксидные пленки отсутствуют, имеется ярко выраженный интерметаллидный слой, наблюдается хорошая смачиваемость. Для данного образца также был выявлен высокий уровень адгезионной прочности.

Структура силумина мелкодисперсная, плотная, так же, как и в образце № 2, наблюдается проникновение алюминия в поры ферритной сетки порошковой втулки, структура которой выглядит более деформированной, наблюдаются частицы эвтектического кремния. Толщина интерметаллидного слоя является равномерной по всей границе контакта и имеет четкую структуру как со стороны алюминия, так и со стороны железа.

Обсуждение (Discussion)

Сравнивая собственные результаты с данными, полученными из официальных источников, можно сделать вывод о том, что создание устойчивого адгезионного соединения Al-Fe при использовании традиционных технологий гравитационного литья или литья под низким давлением — весьма спорный вопрос, поскольку недостаток давления при наличии температурного градиента металла основы (алюминий) и порошкового материала (Fe) в любом случае приводит к различной объемной усадке материалов и, как следствие, к отсутствию контакта между ними. Возможно, что при использовании такого технологического приема, как разогрев штамповой оснастки и порошкового материала до температуры, близкой к температуре ликвидуса алюминиевого сплава, произойдет «схватывание» на границе Al-Fe, но, по нашему мнению, для этого требуется значительное время — несколько минут, что можно обеспечить только для заготовок массой в несколько килограмм. Механизм формирования адгезионной прочности в этом случае, по нашему мнению, будет близок к диффузионному.

В работе [13] авторами было обнаружено, что в области температур 250–350 °С формируется метастабильная фаза Al_6Fe , а при температуре 300–500 °С данная фаза распадается с образованием стабильной фазы Al_3Fe . Такой структурный механизм объясняется перенасыщенностью твердого α -раствора. В работе [14], где также рассматриваются результаты механического легирования при деформации сплавов $AlFe$, выявлено, что распад метастабильных интерметаллидов $AlFe$ при объемной деформации приводит к увеличению упругих свойств биметалла.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Создание избыточного давления штамповки основного металла является новым технологическим приемом для коммерческих сплавов АК9ч, позволяющим создать высокие адгезионные свойства с пористыми материалами на этапе заготовительного производства.
2. Основной физической процесс формирования высокой адгезионной прочности на границе Fe – Al — это проникновение жидкого алюминия в поры порошковых материалов (для железа — ферритной сетки) под действием давления.
3. Дополнительным фактором повышения адгезионной прочности биметалла является формирование интерметаллидных фаз Al_3Fe , образующихся при высоком давлении путем распада метастабильных перенасыщенных интерметаллидов.
4. Предварительное алитирование или горячее цинкование железных порошковых материалов также способствует формированию высоких адгезионных свойств на границе алюминий – железо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 29.09.2019).
2. Zhang X. M. Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding / X. M. Zhang, K. Sun, X. H. Gong, C. M. Jiang, J. Zhou, F. Xue // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 436. — Is. 1. — Pp. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/436/1/012019
3. Хромов В. Н. Технология и оснастка для изготовления биметаллического подшипника скольжения / В. Н. Хромов, В. Н. Корнев, А. Ю. Родичев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2010. — № 1 (279). — С. 45–49.
4. Жигулев И. О. Штамповка биметаллических изделий из сплавов на основе алюминия и железа в процессе кристаллизации алюминиевых сплавов: автореф... канд. техн. наук / Илья Олегович Жигулев. — Уфа, 2005. — 18 с.
5. Кузнецов Р. В. Штамповка биметаллических подшипников из жидкого алюминия и спеченных порошковых вкладышей / Р. В. Кузнецов, П. А. Кузнецов // Металлообработка. — 2019. — № 3 (111). — С. 27–31.
6. Кузнецов Р. В. Экспериментальный стенд для исследования совместной штамповки жидкого металла и спеченного материала / Р. В. Кузнецов, А. В. Гоциридзе, М. С. Литвинов // Тезисы научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ». — СПб., 2018. — С. 255–258.
7. Кузнецов Р. В. Технология получения антифрикционных биметаллических заготовок методом штамповки жидкого металла / Р. В. Кузнецов, М. М. Радкевич // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2016. — № 5. — С. 1142–1149. DOI: 10.1872/MMF-2016-105.
8. Кузнецов Р. В. Исследование технологических возможностей горячей объемной штамповки точной заготовки из литейных медных сплавов / Р. В. Кузнецов, П. А. Кузнецов, А. В. Гоциридзе, К. В. Мартынов // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. — СПб., 2015. — С. 205–208.
9. Пат. 2696164. Российская Федерация, МПК В22D 18/02, В32В 15/00. Способ получения биметаллических изделий штамповкой жидкого металла / Р. В. Кузнецов, М. М. Радкевич, П. А. Кузнецов; заяв. и патентообл. ФГАОУ ВО «СПбПУ». — № 2018143515; заявл. 08.12.2018; опубл. 31.07.2019, Бюл. № 22.

10. Wei M. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing / M. Wei, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, F. Xue // *Journal of Adhesion Science and Technology*. — 2018. — Vol. 32. — Is. 19. — С. 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.
11. Murray P. J. Hot isostatic pressing for the production of bimetallic fuel pump bearings: Diss. / P. J. Murray. — University of Birmingham, 2016.
12. Сосенушкин Е. Н. Технологические режимы жидкой штамповки алюминиевого сплава АК7 / Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, К. Н. Иванов, Т. А. Кинжаев // *Цветные металлы*. — 2018. — № 11. — С. 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12
13. Ташлыкова-Бушкевич И. И. Структурный и фазовый анализ быстрозатвердевших сплавов Al Fe / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Е. С. Гутько, В. Г. Шепелевич, С. М. Барайшук // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2008. — № 4. — С. 69–75.
14. Добромислов А. В. Структура сплавов системы Al-Fe, изготовленных разными методами, после интенсивной пластической деформации под давлением / А. В. Добромислов, Н. И. Талуц // *Физика металлов и металловедение*. — 2017. — Т. 118. — № 6. — С. 595–602. DOI: 10.7868/S001532301706002X.

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 01.12.2016 g. № 642 «O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii». Web. 29 Sept. 2019 <<http://kremlin.ru/acts/bank/41449>>.
2. Zhang, X. M., K. Sun, X. H. Gong, C. M. Jiang, J. Zhou, and F. Xue. “Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 436. No. 1. IOP Publishing, 2018. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/436/1/012019
3. Chromov, V. N., V. N. Korenev, and A. U. Rodichev. “Technology and equipment for manufacturing of the bimetallic friction bearing.” *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 1(279) (2010): 45–49.
4. Zhigulev, I. O. Shtampovka bimetallicheskiikh izdelii iz splavov na osnove alyuminiya i zheleza v protsesse kristallizatsii alyuminievyykh splavov. Abstract of PhD diss. Ufa, 2005.
5. Kuznetsov, Ruslan Valer'yevich, and Pavel Alekseevich Kuznetsov. “Stamping of bimetallic bearings from liquid aluminum and sintered powder deposits.” *Metalloobrabotka* 3(111) (2019): 27–31.
6. Kuznetsov, R. V., A. V. Gotsiridze, and M. S. Litvinov. “Eksperimental'nyi stend dlya issledovaniya sovmestnoi shtampovki zhidkogo metalla i spechennogo materiala.” *Tezisy nauchno-prakticheskoi konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem “Nedelya nauki SPbGPU”*. SPb., 2018. 255–258.
7. Kuznetsov, R. V., and M.M. Radkevich. “Tekhnologiya polucheniya antifriktsionnykh bimetallicheskiikh zagotovok metodom shtampovki zhidkogo metalla.” *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* 5 (2016): 1142–1149.
8. Kuznetsov, R. V., P. A. Kuznetsov, A. V. Gotsiridze, and K. V. Martynov. “Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei goryachei ob'emnoi shtampovki tochnoi zagotovki iz liteinykh mednykh splavov.” *Nedelya nauki SPbPU: Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem*. SPb., 2015. 205–208.
9. Kuznetsov, R. V., M. M. Radkevich, and P. A. Kuznetsov. RU 2 696 164 C1, IPC B22D 18/02, B32B 15/00. Sposob polucheniya bimetallicheskiikh izdelii shtampovkoi zhidkogo metalla. Russian Federation, assignee. Publ. 31 July 2019.
10. Wei, Mingzhen, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, and F. Xue. “Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing.” *Journal of Adhesion Science and Technology* 32.19 (2018): 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.
11. Murray, P. J. Hot isostatic pressing for the production of bimetallic fuel pump bearings. University of Birmingham, 2016.
12. Sosenushkin, E. N., E. A. Yanovskaya, K. N. Ivanov, and T. A. Kinzhaev. “Liquid forging regimes for AK7 aluminium alloy.” *Tsvetnye Metally* 11 (2018): 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12.
13. Tashlykova-Bushkevich, I.I., E. S. Gut'ko, V.G. Shepelevich, and S.M. Baraishuk. “Structure and Phase Analysis of Rapidly Solidified Al-Fe Alloys.” *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 4 (2008): 69–75.
14. Dobromyslov, A. V., and N. I. Taluts. “Structure of Al-Fe alloys prepared by different methods after severe plastic deformation under pressure.” *The Physics of Metals and Metallography* 118.6 (2017): 564–571. DOI: 10.1134/S0031918X17060023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Руслан Валерьевич —
заместитель главного металлурга
ПАО «Звезда»
192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Бабушкина, 123
e-mail: Spaun1605@rambler.ru
Ольховик Евгений Олегович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Ruslan V. —
Deputy Chief Metallurgist
PJSC, Zvezda
123 Babushkina Str., St. Petersburg, 192012,
Russian Federation
e-mail: Spaun1605@rambler.ru
Olhovik, Evgeniy O. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 18 октября 2019 г.
Received: October 18, 2019.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-910-919

RESEARCH TO DETERMINE THE MINIMIZATION AREA OF THE OPERATIONAL COEFFICIENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE SHIP

V. Ye. Leonov

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

The actual round voyage of the vessel “Warnow Dolphin” along the route Miami, USA – Manzanillo, Panama – Guayaquil, Ecuador – Callao, Peru is described in the paper. The goal of the paper is to minimize the Operational Energy Efficiency Ratio of the ship, and, accordingly, the consumption of ship fuel and carbon dioxide emissions depending on the parameters of the sea passage: vessel speed, mass of the transported cargo and the transition distance. For specifically chosen ship power plant (SPP), the parametric dependence of the ship’s speed and ship fuel consumption on the share of used power plant is determined by calculation. The Energy Efficiency Design Index (EEDI) is determined on the basis of the model given in Resolution MEPC.212 (63). The Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) is determined depending on the ship fuel consumption, the carbon concentration in the ship’s fuel with the main parameters adopted for the transition — the ship’s speed, the mass of transported cargo, the distance of sea passage. Calculation studies are carried out in a wide range of parameters of the sea passage with the transition distance ranging from 1,200 to 3,000 NM, the vessel speed ranging from 0.01 to 27.0 knots, the cargo mass ranging from 1,200 to 20,000 tons.

The purpose of the work is to determine the region of minimum values of the EEOI (the area of minimization of the EEOI), that is as close as possible to the EEDI of the vessel, depending on the changing parameters of the sea transition.

For the first time, it was found that the EEOI, depending on the ship’s speed, has four zones: the first zone is 0.01-0.08 knots, the EEOI value increases, the second zone is 0.08-1.8 knots, the value passes through the maximum, the third zone is 1, 8-21 knots, the EEOI value is reduced, with the sharpest decrease in the region of 1.8-7.0 knots, the fourth zone is 21-27 knots and above, where the EEOI value increases sharply. The dependence of EEOI on the cargo mass at the constant values of ship speed and distance of the sea transition can be described by hyperbole. With the mass of transported cargo in the range of 7 000–18 000 tons, the values of EEOI tend to the value of EEDI, and for the values of the load mass approaching zero, the values of EEOI tend to infinity.

The distance of the sea transition does not affect the value of the EEOI.

According to a specially developed technique, according to the data of the conducted research, the area of minimization of the EEOI is established.

Keywords: Energy Efficiency Design Index, Energy Efficiency Operational Indicator, coefficient, vessel, sea passage, speed, mass, distance, minimization, consumption, emission, marine fuel.

For citation:

Leonov, Valeriy Ye. “Research to determine the minimization area of the operational coefficient of the energy efficiency of the ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 910–919. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-910-919.

УДК 656.61.052(075.8)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЛАСТИ МИНИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

В. Е. Леонов

Херсонская Государственная морская академия, Херсон, Украина

Рассмотрен реальный переход судна «Warnow Dolphin» по маршруту Майами, США – Манзанилло, Панама – Гуаякиль, Эквадор – Каллао, Перу и обратно. Цель работы — минимизировать операционный коэффициент энергетической эффективности судна и, соответственно, расход судового топлива и эмиссию диоксида углерода в зависимости от параметров морского перехода: скорость судна, масса перевозимого груза, дистанция перехода. Для конкретно выбранной судовой энергетической установки расчетным путем определена параметрическая зависимость скорости судна и расхода судового топлива от доли используемой мощности СЭУ. Конструктивный коэффициент энергетической эффективности судна определяется по модели, приведенной в Резолюции МЕРС.212(63). Операционный коэффициент энергетической эффективности судна рассчитывался в зависимости от расхода судового топлива, концентрации углерода в судовом топливе при принятых на переход основных параметрах: скорости судна, массы перевозимого груза, дистанции морского перехода. Расчетные исследования проводились в широком диапазоне параметров морского перехода — дистанция перехода в пределах 1 200–3 000 морских миль, скорость судна 0,01–27,0 уз, масса груза в пределах 1 200–20 000 т.

Определена область минимальных значений операционного коэффициента энергетической эффективности судна (область минимизации), максимально приближающихся к конструктивному коэффициенту энергетической эффективности судна, в зависимости от изменяющихся параметров морского перехода. Впервые установлено, что операционный коэффициент энергетической эффективности судна в зависимости от скорости судна имеет четыре зоны: первая зона 0,01–0,08 уз — значение операционного коэффициента энергетической эффективности судна увеличивается, вторая зона 0,08–1,8 уз — значение проходит через максимум, третья зона 1,8–21 уз — значение снижается, причем наиболее резко в области 1,8–7,0 уз, четвертая зона в области от 21–27 уз и выше — происходит резкое увеличение значения этого коэффициента. Зависимость операционного коэффициента энергетической эффективности судна от массы груза при постоянных значениях скорости судна и дистанции морского перехода может быть описана гиперболой. Установлено, что при массе перевозимого груза в пределах 7 000–18 000 т значения операционного коэффициента энергетической эффективности судна стремятся к величине конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна, а при значениях массы груза, приближающихся к нулю, — к бесконечности. Дистанция морского перехода не оказывает влияние на значение операционного коэффициента энергетической эффективности судна. По данным проведенных исследований, установлена область минимальных значений операционного коэффициента энергетической эффективности судна и область его минимизации.

Ключевые слова: конструктивный операционный коэффициент, энергетическая эффективность судна, тип судна, морской переход, скорость, масса, дистанция, минимизация, расход, эмиссия, судовое топливо.

Для цитирования:

Леонов В. Е. Исследования по определению области минимизации операционного коэффициента энергетической эффективности судна / В. Е. Леонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 910–919. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-910-919.

Введение (Introduction)

До последнего времени морские грузоперевозки осуществлялись по принципу доставки груза заказчику в сжатые сроки, не учитывая расход судового топлива и загрязнение морской, окружающей среды. В последнее время Международной морской организацией (ММО) приняты Резолюции, направленные на снижение расхода судового топлива — эмиссии диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов [1]–[5], а также снижение выбросов сернистых соединений с отработанными газами судовых энергетических установок [6], [7]. Активно ведутся научно-исследовательские и опытные работы по очистке отработанных газов судовых энергетических установок, которые можно разделить на два направления:

- 1) скрубберная очистка [8]–[12];
- 2) каталитическая нейтрализация [13], [14], а также каталитическая очистка в сочетании с утилизацией теплоты отработанных газов СЭУ [15], [16].

В работах [17], [18] в условиях реального морского (трансокеанского) перехода установлена параметрическая связь операционного коэффициента энергетической эффективности судна (ОКЭЭС) от скорости судна, массы перевозимого груза и дистанции перехода. В работе [19] спектр типов судов был значительно расширен и показано, что независимо от типов судов

ОКЭЭС в зависимости от скорости, массы груза и дистанции перехода описывается одинаковыми закономерностями. Однако в литературе до настоящего времени отсутствует такой важный аспект, как определение минимального значения ОКЭЭС при одновременном изменении параметров перехода: скорости судна, массы перевозимого груза, дистанции перехода, гидрометеорологических условий.

Целью настоящей работы является определение минимальных значений ОКЭЭС (области минимизации ОКЭЭС) при одновременном изменении параметров перехода: скорости судна, массы перевозимого груза, дистанции перехода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрен реальный переход в районе Атлантического и Тихого океана в Северной и Южной Америке: Майами, США (27.09.2018) – Манзанилло, Панама (03.10.2018) – Гуаякиль, Эквадор (06.10.2018) – Каллао, Перу (08.10.2018) – Гуаякиль, Эквадор (12.10.2018) – Манзанилло, Панама (15.10.2018) – Майами, США (18.10.2018). Характеристика судна приведена в следующей таблице.

Характеристика судна «Warnow Dolphin»

Название судна	Warnow Dolphin
Флаг	Кипр
Порт регистрации	Лимассол, Кипр
Позывной сигнал	5BTW3
Официальный номер	9395070
Номер ММО	9395070
Классификация	GERMAN LLOYD (GL NO. 111774)
Класс	GL 100 A5 E Container Ship, NAV-O, IW,BWM-F
Владелец судна	MARLOW SHIPMANAGMENT DEUTSHLAND
Год, место постройки	2007, Zhoushan, China
Мощность основного двигателя, кВт	11200 kW
Тип основного двигателя	MAN B&W
Пропеллер (винт)	Controllable Pitch Propeller
Сервисная скорость, уз	19,4 knots
Тип судового топлива	IFO 380\ M 60
Водоизмещение, т	25252.7 metric tons
Дедвейт, т	18,275.5 metric tons
Общий тоннаж, т	15,375 GRT
Чистый тоннаж	5983 GRT
Балластные воды, м ³	Total capacity 6070 m ³
Общая длина, м	166,15 m (LBP — 155,08 m)
Расстояние между перпендикулярами, м	146,6 m
Ширина судна, м	19,5 m
Тип судна	CONTAINER VESSEL
Экипаж	21
Наибольшая глубина, м	14,2 m
Максимальная осадка, м	9,5 m

При выходе судна из порта Майами атмосферное давление составляло 1024 ГПа, сила ветра по шкале Бофорта — пять баллов, направление ветра — юго-восточное, температура возду-

ха — 30 °С, облачность умеренная (2/8), вследствие чего хорошая видимость (на расстоянии более пяти морских миль), состояние моря — слабое волнение (2 балла).

При подходе к порту Манзанилло сила ветра составила пять баллов, наблюдались ливневые осадки на протяжении нескольких часов. Небо было полностью покрыто облаками, видимость ухудшилась, атмосферное давление понизилось до 1017 ГПа. Независимо от этого маршрут не был изменен, скорость судна не была снижена и рейс продолжался в запланированном режиме. На остальной части перехода температура воздуха изменялась в пределах 23–34 °С, сила ветра по шкале Бофорта не превышала 5 баллов, давление повысилось до 1022 ГПа. Облачность была несплошной, осадков не было.

Скорость судна и дистанция морского перехода измерялись с помощью доплер-лага Naviknot 400 Type 4718-DA. Объем загруженного при бункеровке судового топлива определялся с помощью расходомеров, а расход топлива на конкретный переход — по изменению уровня судового топлива в танке.

Результаты (Results)

Изменение скорости судна и, соответственно, расхода судового топлива в зависимости от доли используемой мощности судовой энергетической установки (СЭУ) приведено на рис. 1.

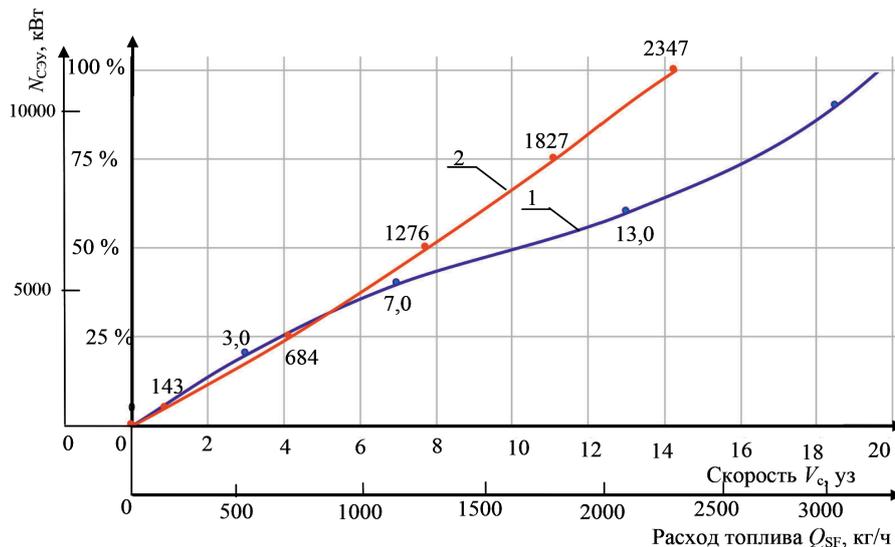


Рис. 1. Изменение скорости судна (кривая 1) и расхода судового топлива (кривая 2) в зависимости от доли используемой мощности СЭУ

Согласно Резолюции ММО МЕРС 65/ INF [2], основным критерием снижения расхода судового топлива и эмиссии диоксида углерода является ОКЭЭС, который определяется отношением массы эмиссии диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов, образующегося при сжигании топлива за переход, к дистанции перехода и массе перевозимого груза.

Расчетные исследования проводились в широком диапазоне параметров морского перехода — дистанция перехода в пределах 1 200–3 000 морских миль, скорость судна — 0,01–1,0 уз и 1,0–27,0 уз (в разных масштабах скорости по оси абсцисс), масса груза в пределах 1 200–20 000 т.

Согласно зависимости, приведенной на рис. 1, при любой скорости судна определяли долю использованной мощности СЭУ и, соответственно, расход судового топлива, который использовался при расчетах ОКЭЭС. Конструктивный коэффициент энергетической эффективности судна

(ККЭЭС) определяли по уравнению: $ККЭЭС = \frac{(1-X)}{100} ab^{-c}$, приведенному в работе [20]. Расчетными исследованиями было установлено, что изменение дистанции морского перехода при неизменных скорости судна и массе груза не оказывает влияния на величину ОКЭЭС.

Зависимость ОКЭЭС от скорости судна и массы перевозимого груза приведена на рис. 2, а, где масса груза увеличивалась от 0 до 20 000 т по оси абсцисс, на рис. 2, б масса груза уменьшалась от 20 000 т до нуля по оси абсцисс. Для того чтобы проследить характер зависимости ОКЭЭС от скорости судна, был принят довольно широкий диапазон скоростей — 1,0–27,0 уз и даже нерелевантный для морской практики судовождения диапазон 0,01–0,09 уз. При этих расчетах дистанция перехода и масса груза оставались постоянными. При увеличении скорости судна от 0,01 уз до 1,0 уз и от 1,0 до 27,0 уз были определены четыре зоны: первая зона — 0,01–0,08 уз — значение ОКЭЭС увеличивается; вторая зона — 0,08–1,8 уз — значение ОКЭЭС проходит через максимум; третья зона — 1,8–21 уз — значение ОКЭЭС снижается, причем наиболее резко в области 1,8–7,0 уз; четвертая зона — в области от 21–27 уз и выше происходит резкое увеличение значения ОКЭЭС.

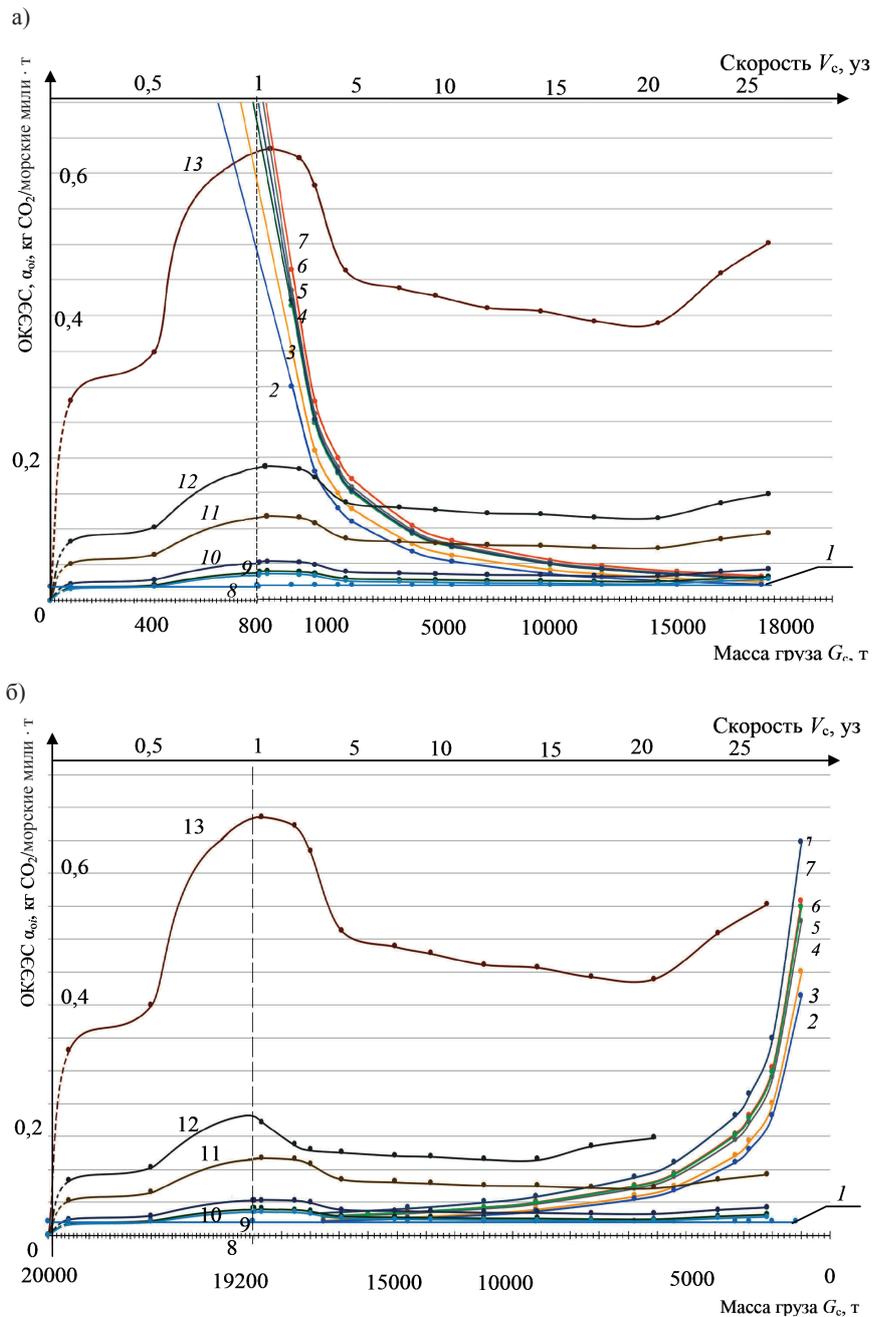


Рис. 2. Зависимость ОКЭЭС от скорости судна, уз: а — кривые 2 — 1,6; 3 — 5,2; 4 — 8,2; 5 — 18,0; 6 — 24,0; 7 — 26,9 уз и массы перевозимого груза, т: кривые 8 — 18 000; 9 — 16 000; 10 — 12 000; 11 — 5420; 12 — 3400; 13 — 1 000 т; б — кривые 2 — 2,5; 3 — 6,1; 4 — 12; 5 — 22; 6 — 24,5; 7 — 28,2 уз и массы перевозимого груза, т: кривые 8 — 18 000; 9 — 16 000; 10 — 12 000; 11 — 5420; 12 — 3400; 13 — 1 000 т; линия 1 — ККЭЭС

Зависимость ОКЭЭС от массы груза при постоянных значениях скорости судна и дистанции морского перехода может быть описана гиперболой (см. рис. 2, б). При максимальных массах перевозимого груза (7 000–18 000 метрических тонн) значения ОКЭЭС стремятся к ККЭЭС, а при значениях массы груза, приближающихся к нулю — к бесконечности. На основании данных, приведенных на рис. 2, б, были построены зависимости суммарных значений ОКЭЭС при одновременном изменении скорости и массы груза (рис. 3).

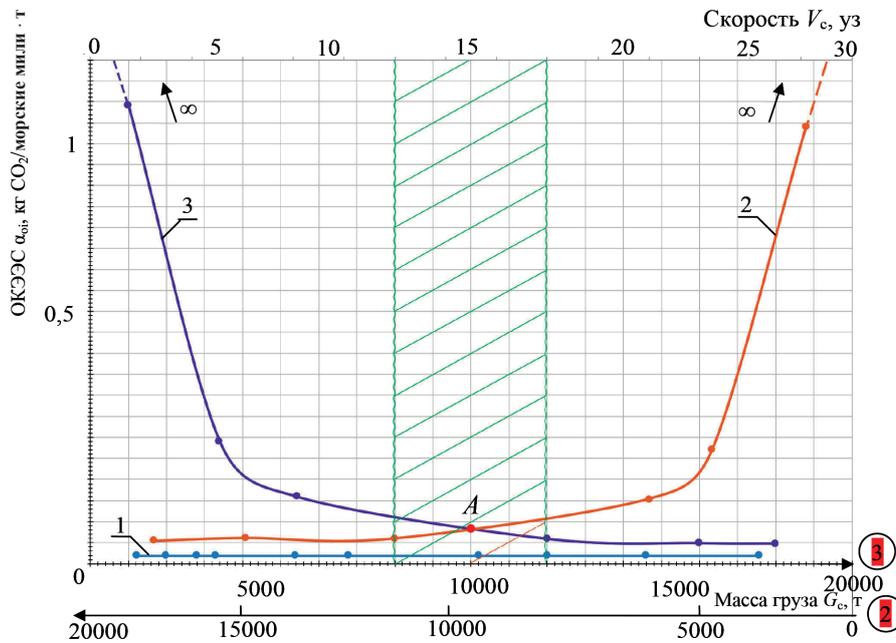


Рис. 3. Область минимизации ОКЭЭС (заштрихованная область А)

Значения точек кривых 2 и 3 (см. рис. 3) представляют собой сумму ОКЭЭС, зависящих отдельно от скорости судна и отдельно от массы перевозимого груза — кривая 2 при изменении массы груза от нуля до 20 000 т (справа налево), кривая 3 — от нуля до 20 000 т (слева направо), линия 1 — ККЭЭС. В указанную сумму не включен ОКЭЭС в зависимости от дистанции перехода, поскольку ранее было установлено, что дистанция перехода не оказывает влияния на величину ОКЭЭС. В точке А пересечения кривых 2 и 3 определяется минимальное значение ОКЭЭС, характеризующее конкретный морской переход для принятого проекта судна и параметров морского перехода. Для практического использования полученных с помощью минимизации ОКЭЭС результатов зону минимизации по оси абсцисс для массы груза (слева направо и наоборот, справа налево) увеличили условно на 20 % (вправо — на 10 % и влево — на 10 %) от точки А, в результате чего получили область минимизации ОКЭЭС для конкретного исследованного морского перехода (см. рис. 3 заштрихованная область А). В качестве практических рекомендаций по результатам выполненных исследований были установлены параметры морского перехода, при которых достигаются минимальные значения ОКЭЭС, а именно: скорость судна — в пределах 12–18 уз, масса перевозимого груза — в пределах 8 000–12 000 т (см. рис. 3).

Обсуждение (Discussion)

На основании проведенных исследований можно сделать важный вывод: в морской практике нельзя допускать балластных переходов, поскольку при массе груза, стремящейся к нулю, значение ОКЭЭС стремится к бесконечности (∞), что оказывает крайне отрицательное влияние на экономические и экологические показатели морского перехода — происходит повышение расхода судового топлива и эмиссии диоксида углерода. В научно-технической литературе имеются весьма ограниченные сведения о комплексных судах, способных осуществлять морские перевозки различных

по физико-химическим свойствам грузов, что исключает балластные невыгодные перевозки. Рассмотрим некоторых их них.

В работе [21] описано судно «OBO–Oil–Bulk–Ore Cargo Vessel», предназначенное для перевозки грузов в жидком и твердом состоянии. Суда типа ОВО являются более гибкими по сравнению с однопрофильными судами, удовлетворяют рыночным условиям и способствуют увеличению прибыли морских грузоперевозок. Суда ОВО были популярны в 1955–1980 гг. Наибольшее судно для указанного периода — M/V «Derbyshire» дедвейтом 180 000 т. Эксплуатация этих судов в течение 25 лет обеспечивала морской индустрии прибыль и эти суда свою роль, безусловно, выполнили. Со временем начали все более ощутимо проявляться недостатки этих судов, особенно в условиях резкого увеличения масштаба и тоннажа морских грузоперевозок. В итоге суда типа ОВО стали непопулярны и в настоящее время на морском флоте функционирует небольшое их количество.

В работе [22] описано судно «PROBO carrier–Product–Ore—Bulk–Oil», которое было первым судном, построенным в 1985 г. южнокорейской компанией «Хюндай», и представляло собой интегральный комплекс, включающий систему автоматизации, компьютерную технику и спутниковые навигационные системы. Эти суда были предназначены для транспортировки широкой номенклатуры грузов, таких как сырая нефть, очищенные и неочищенные продукты, пшеница, уголь, алюминий, цемент, зерно, каустическая сода, лесоматериалы, контейнеры, а также свыше семи разновидностей грузов в жидком состоянии. Основные характеристики этих судов: длина 182,8 м, длина между перпендикулярами 175 м, ширина 31,95 м, дедвейт 49 070 метрических тонн, осадка 13,09 м, грузоподъемность: по зернистым материалам 50 940 м³, по сырой нефти 51 935 м³, 954 TEUs. Судно укомплектовано главным двигателем Hyundai Band W L80 MCE мощностью 12 800 л. с. при оборотах валенчатого вала 83 мин⁻¹, конструкторская сервисная скорость судна 15,3 уз при мощности СЭУ 10 880 л. с. С учетом требований ММО, предъявляемых к снижению расхода судового топлива в данной работе, достигается экономическая эффективность морских грузоперевозок, а параллельно и экологическая — снижение эмиссии диоксида углерода.

В качестве рекомендаций в работе [19, с. 248] предлагается следующее:

«1. На существующих судах необходимо:

- 1.1. Определить и обеспечить минимальные значения ОКЭЭС морских грузоперевозок;
- 1.2. Исключить балластные морские переходы.

2. Подготовить техническую и экономическую базу для разработки многопрофильных многоцелевых судов и их реализации на флоте».

На танкерах и химогазовозах трудно решить пп. 1.2, вместе с тем в данном исследовании проработан вопрос применительно к танкерному флоту в части реализации встречных морских грузоперевозок: «нефть, нефтепродукты ↔ природная пресная вода» для регионов, обладающих, с одной стороны, значительными запасами углеводородного сырья, а с другой — испытывающих существенный дефицит природной и пресной воды.

Заключение (Conclusion)

Главная задача исследования, целью которого является определение области минимальных значений ОКЭЭС реального морского перехода в зависимости от основных параметров, изменяющихся в процессе этого перехода, — решена. Основные направления дальнейших исследований могут быть сфокусированы в следующих областях:

- 1) расширение спектра исследований разных типов судов и морских переходов;
- 2) исследование влияния параметров гидрометеорологических условий на изменение ОКЭЭС;
- 3) проведение технико-экономических обоснований по созданию многопрофильных, многоцелевых судов.

В экспериментальной части работы принимал участие курсант Херсонской Государственной морской академии А. Д. Сердюк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI). — London: IMO, 2009. — 75 p.
2. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. — London: World Maritime University, 2013. — 61 p.
3. Пивоваров Л. А. Разработка плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭЭС) для танкеров / Л. А. Пивоваров // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте». — MINTT-2013. — Херсон: ИЦ ХГМА, 2013. — Т. 1. — С. 73–77.
4. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators. — London: Lloyd's Register, 2012. — 12 p.
5. Rehmatulla N. The Implementation of Technical Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Measures in Shipping / N. Rehmatulla, J. Calleya, T. Smith // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 139. — Pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.
6. Winnes H. Reducing GHG emissions from ships in port areas / H. Winnes, L. Styhre, E. Fridell // Research in Transportation Business & Management. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.
7. MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols. — London: CPI Group (UK) Ltd, 2011. — 448 p.
8. Paulsrud H. M.J. A Practical Guide to Wärtsilä Scrubber Systems / H. M.J. Paulsrud // Journal of the JIME. — 2015. — Vol. 50. — Is. 3. — Pp. 40–42. DOI: 10.5988/jime.50.315.
9. Tran T. A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships / T. A. Tran // Journal of Marine Science: Research & Development. — 2017. — Vol. 7. — Is. 6. — Pp. 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.
10. Carnival Corporation's Exhaust Gas Cleaning Technology installed on 60 percent of fleet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.prnewswire.com/news-releases/carnival-corporations-exhaust-gas-cleaning-technology-installed-on-60-percent-of-fleet-300413964.html> (дата обращения: 20.04.2018).
11. Carnival Corporation & PLC. Sustainability [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.carnivalcorp.com/phoenix.zhtml?c=140690&p=irol-sustainability> (дата обращения: 20.04.2018).
12. Carnival committed to EGCS as its 2020 compliance solution [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ibia.net/carnival-committed-to-egcs-as-its-2020-compliance-solution/> (дата обращения: 20.04.2018).
13. Laursen A. Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts / A. Laursen, J. Sehested, Ib. Chorkendorff, P. C. K. Vesborg // Chinese Journal of Catalysis. — 2018. — Vol. 39. — Pp. 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6.
14. Леонов В. Е. Каталитическая очистка отработанных газов в судовых энергетических установках / В. Е. Леонов, А. Д. Сердюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1015–1024. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024.
15. Леонов В. Е. Пути повышения энергетической эффективности и экологической безопасности морских грузоперевозок / В. Е. Леонов, М. В. Чепок, Р. А. Дробитко / XI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». — Болгария, Варна: Technical University, 2015. — Vol. 2. — Pp. 87–93.
16. Леонов В. Е. Исследование и разработка эффективной технологии защиты воздушного бассейна при эксплуатации судов / В. Е. Леонов, А. Д. Сердюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 770–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.
17. Леонов В. Е. Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности судна / В. Е. Леонов, В. В. Тимошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.
18. Zhmur V. N. Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight / V. N. Zhmur, V. Ye. Leonov // American Scientific Journal. — 2018. — Vol. 19. — Pp. 15–21.
19. Леонов В. Е. Пути повышения эффективности морских грузоперевозок: монография / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М.: Моркнига, 2019. — 299 с.

20. Леонов В. Е. Современные информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование: монография / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев, О. М. Безбах, А. А. Гуров, В. Б. Сус, В. Ф. Ходаковский; под ред. проф. В. Е. Леонова. — Херсон: ИЦ ХГМА, 2014. — 324 с.

21. Anand N. Ontology-based multi-agent system for urban freight transportation / N. Anand, R. van Duin, L. Tavasszy // *International Journal of Urban Sciences*. — 2014. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 133–153. DOI: 10.1080/12265934.2014.920696

22. Bhusiri N. The trade-off between fixed vehicle costs and time-dependent arrival penalties in a routing problem / N. Bhusiri, A. G. Qureshi, E. Taniguchi // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2014. — Vol. 62. — Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.003.

REFERENCES

1. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI)*. London: IMO, 2009.
2. *MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships*. London: World Maritime University, 2013.

3. Pivovarov, L. A. “Razrabotka plana upravleniya energoeffektivnost’yu sudna (PUEES) dlya tankerov.” *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii na transporte» — MINTT-2013*. Vol. 1. Kherson: ITs KhGMA, 2013. 73–77.

4. *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators*. London: Lloyd’s Register, 2012.

5. Rehmatulla, Nishatabbas, John Calleya, and Tristan Smith. “The implementation of technical energy efficiency and CO2 emission reduction measures in shipping.” *Ocean Engineering* 139 (2017): 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.

6. Winnes, Hulda, Linda Styhre, and Erik Fridell. “Reducing GHG emissions from ships in port areas.” *Research in Transportation Business & Management* 17 (2015): 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.

7. *MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols*. London: CPI Group (UK) Ltd, 2011.

8. Paulsrud, Heidi MJ. “A Practical Guide to Wärtsilä Scrubber Systems.” *Journal of the JIME* 50.3 (2015): 40–42. DOI: 10.5988/jime.50.315.

9. Tran, T. A. “Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships.” *Journal of Marine Science: Research & Development* 7.6 (2017): 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.

10. Carnival Corporation’s Exhaust Gas Cleaning Technology installed on 60 percent of fleet. Web. 20 April 2018 <<https://www.prnewswire.com/news-releases/carnival-corporations-exhaust-gas-cleaning-technology-installed-on-60-percent-of-fleet-300413964.html>>.

11. Carnival Corporation & PLC. Sustainability. Web. 20 April 2018 <<http://www.carnivalcorp.com/phoenix.zhtml?c=140690&p=irol-sustainability>>.

12. Carnival committed to EGCS as its 2020 compliance solution. Web. 20 April 2018 <<https://ibia.net/carnival-committed-to-egcs-as-its-2020-compliance-solution/>>.

13. Laursen, Anders B. “Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts.” *Chinese Journal of Catalysis* 39 (2018): 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6

14. Leonov, Valeriy Ye., and Alexander D. Serdyuk. “The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1015–1024. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024.

15. Leonov, V. Ye., M. V. Chepok, and R. A. Drobitko. “Puti povysheniya ehnergeticheskoy ehffektivnosti i ehkologicheskoy bezopasnosti morskikh gruzoperevozok.” *XI Mezhdunarodnaya konferenciya «Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii»*. Vol. 2. Bolgariya, Varna: Technical University, 2015. 87–93.

16. Leonov, Valeriy Ye., and Alexander D. Serdyuk. “Research and development of effective technology for air basin protection while ship operation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 770–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.

17. Leonov, Valery Ye., and Vladislav V. Timoshenko. “Investigation of the impact of marine transition parameters on the operational coefficient of energy efficiency of the ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

18. Zhmur, V. N., and V. Ye. Leonov. "Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight." *American Scientific Journal* 19 (2018): 15–21.

19. Leonov, V. E., and V. I. Dmitriev. *Puti povysheniya effektivnosti morskikh gruzoperevozok. Monografiya*. M.: MORKNIGA, 2019.

20. Leonov, V. E., V. I. Dmitriev, O. M. Bezbakh, A. A. Gurov, V. B. Sys, and V. F. Khodakovskii. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti su-dokhodstva i ikh kompleksnoe ispol'zovanie: Monografiya*. Edited by V. E. Leonov. Kherson: ITs KhGMA, 2014.

21. Anand, Nilesh, Ron van Duin, and Lori Tavasszy. "Ontology-based multi-agent system for urban freight transportation." *International Journal of Urban Sciences* 18.2 (2014): 133–153. DOI: 10.1080/12265934.2014.920696.

22. Bhusiri, Narath, Ali Gul Qureshi, and Eiichi Taniguchi. "The trade-off between fixed vehicle costs and time-dependent arrival penalties in a routing problem." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 62 (2014): 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: Leonov_V_E@i.ua

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Leonov, Valeriy Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Avenue, Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: leonov_v_e@i.ua

Статья поступила в редакцию 2 августа 2019 г.

Received: August 2, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931

DEVELOPMENT OF A STRUCTURALLY INTEGRATED ELECTRIC DRIVE OF JACK FOR CARGO OPERATIONS AT ONSHORE FACILITIES

S. A. Popov, V. E. Nechesov, S. V. Popova

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

The solution to the serious transport problems of lifting, fixing and lowering cargo, hull elements, scaffolding during construction and installation works performed by screw jacks at shipbuilding and ship repair enterprises, in ship docks is considered. Such disadvantages of hydraulic jacks as the inability to work at low and ultra-low temperatures, constant monitoring of the oil level, the tightness of oil seals and valves, transportation and storage only in an upright position, low operability, as well as the disadvantages of screw jacks such as the low starting torque of an asynchronous electric drive motor with the cylindrical stator bore, the lack of the ability to accurately position the load at height, led to the development of a hoist design which is characterized by increased carrying capacity, achieved by an additional increase in the torque transmitted to the nut of the structurally integrated electric drive of jack. Increasing the lifting capacity of the jack due to the built-in two-stage transmission, which reduces the rotation frequency, but at the same time increases the torque transmitted from the rotor to the nut, is researched. The ability to accurately fix the load at a height commensurate with the height of the prefabricated motor housing is achieved through an integrated braking device, which is activated after the supply voltage of the drive axial asynchronous electric motor is disconnected. This design will allow smooth lifting and lowering the load with its increased carrying capacity and precise fixation of the actuator, which allows to use it for multi-tiered construction of retractable closures, during inspection, repair, installation works and centering the assembly units of ships, as well as carry out work on lifting and lowering transshipment equipment in the port sector without using the additional expensive mounting equipment.

The developed calculation methods allow at the design stage to determine the stock of its carrying capacity and the dependence of the jack efficiency on the parameters of a two-stage transmission.

Keywords: screw hoist, jack, electric drive, structurally integrated, carrying capacity, axial asynchronous electric motor, two-stage transmission, efficiency.

For citation:

Popov, Sergey A., Vladimir E. Nechesov, and Svetlana V. Popova. "Development of a structurally integrated electric drive of jack for cargo operations at onshore facilities." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 920–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931.

УДК 621.313

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДОМКРАТА ДЛЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТАХ

С. А. Попов, В. Е. Нечесов, С. В. Попова

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,
Краснодар, Российская Федерация

Рассмотрено решение серьезной проблемы транспортных задач по подъему, фиксации и опусканию груза, элементов корпуса, строительных лесов при проведении строительных и монтажных работ, выполняемых винтовыми домкратами на судостроительных и судоремонтных предприятиях, в корабельных и судовых доках. Такие недостатки гидравлических домкратов, как отсутствие возможности работы при низких и сверхнизких температурах, постоянный контроль уровня масла, герметичности сальников и клапанов, транспортировка и хранение только в вертикальном положении, малооперативность, а также недостатки винтовых домкратов, такие как малый пусковой момент приводного асинхронного электродвигателя с цилиндрической расточкой статора, отсутствие возможности точного позиционирования груза на высоте, привели к разработке конструкции подъемника, которая отличается повышенной грузоподъемностью, достигаемой за счет дополнительного увеличения крутящего момента передаваемого на гайку конструктивно-интегрированного электропривода домкрата. Исследовано повышение грузоподъемности домкрата, реализуемое за счет встро-

енной двухступенчатой передачи, понижающей частоту вращения, но одновременно увеличивающей вращающий момент, передаваемый от ротора к гайке. Отмечается, что возможность точной фиксации груза на высоте, соизмеримой с высотой сборного корпуса электродвигателя, достигается за счет интегрированного тормозного устройства, срабатывающего после отключения питающего напряжения приводного аксиального асинхронного электродвигателя. Данная конструкция позволит осуществлять плавный подъем и опускание груза при его повышенной грузоподъемности и точной фиксации исполнительного органа электропривода, что дает возможность применять его для работы в многоярусной конструкции откатываемых закрытий, при осмотре, инспекции, ремонте, монтажных работах и центрировании сборочно-монтажных единиц кораблей и судов, а также выполнять работы по поднятию и опусканию перегрузочной техники в портовом хозяйстве без использования дополнительного дорогостоящего монтажного оборудования. Разработанные методики расчета позволяют на этапе проектирования определить запас его грузоподъемности и зависимость коэффициента полезного действия домкрата от параметров двухступенчатой передачи.

Ключевые слова: винтовой подъемник, домкрат, электропривод, конструктивно – интегрированный, грузоподъемность, аксиальный асинхронный электродвигатель, двухступенчатая передача, КПД.

Для цитирования:

Попов С. А. Разработка конструктивно–интегрированного электропривода домкрата для грузовых операций на береговых объектах / С. А. Попов, В. Е. Нечесов, С. В. Попова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 920–931. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-920-931.

Введение (Introduction)

Современный мир невозможно представить без усовершенствования способов подъема и транспортировки различных грузов. Подъемно-транспортные установки, в частности домкраты, активно применяемые в большинстве производств [1]–[4], предназначены для подъема грузов на небольшую высоту и нашли широкое применение при монтажных работах — подъемах с фиксацией как отдельных частей, так и целых сооружений и судов [5], [6]. Домкраты активно применяются на всех предприятиях, в том числе судостроительных и судоремонтных, а также в портовом хозяйстве.

На судах домкраты используют в многоярусной конструкции откатываемых закрытий, выполненных из двух секций, каждая из которых с их помощью может быть приподнята, при этом вторая подкатывается под нее, открывая половину люка. Для перемещения двигателя внутреннего сгорания в процессе его центровки к валопроводу и приводному механизму формируется технологическое оборудование, состоящее из винтовых и гидравлических домкратов, прокладок, такелажного оборудования и т. д. При центрировании сборочно-монтажных единиц в качестве отжимных механизмов используют гидравлические домкраты с обеспечением установки ограничительных упоров с противоположной стороны изделия на расчетном расстоянии [7].

В портовом хозяйстве домкраты используются при ремонте перегрузочной техники и контейнеров, а также смене колесной пары грузовых железнодорожных вагонов. Использование данного оборудования в большей степени определяет эффективность современного промышленного производства, так как уровень механизации производства является показателем совершенства производственного исполнения и производительности предприятия.

В каждой конструкции подъемника существуют свои достоинства и недостатки, при этом конструктивная особенность напрямую влияет на массогабаритные параметры и КПД установки. Перспективными направлениями улучшения конструкций домкратов являются:

- увеличение нагрузочной способности;
- снижение себестоимости;
- повышение КПД;
- сокращение времени поднятия и опускания груза;
- увеличение точности позиционирования.

К основным мероприятиям по повышению эффективности подъемно-транспортных установок относится совершенствование как энергетической части (применение новых конструкций приводных электродвигателей с улучшенными энергетическими, стоимостными и массогабаритными характеристиками), так и механической части путем применения новых типов передач.

В большинстве случаев, как в портовом хозяйстве, так и на судах, активно применяются гидравлические домкраты. Это вызвано рядом преимуществ, таких как высокий КПД и большая грузоподъемность. Однако имеется ряд существенных недостатков, а именно: отсутствие возможности работы при низких, сверхнизких температурах и точного регулирования высоты опускания груза, постоянный контроль уровня масла, герметичности сальников и клапанов, транспортировка и хранение данного оборудования должна происходить исключительно в вертикальном положении, во избежание вытекания гидравлической жидкости из резервуара. Кроме того, один цикл работы насоса соответствует относительно малой высоте подъема, в связи с чем гидравлические домкраты являются относительно малооперативным оборудованием. В основе предлагаемой разработки принята конструкция винтового домкрата с передачей *винт – гайка*. Преимуществами данной конструкции являются ее простота, высокая прочность при ударных нагрузках, возможность самоторможения и высокая кинематическая точность. Наиболее распространенные винтовые домкраты различных производителей приведены на рис. 1.

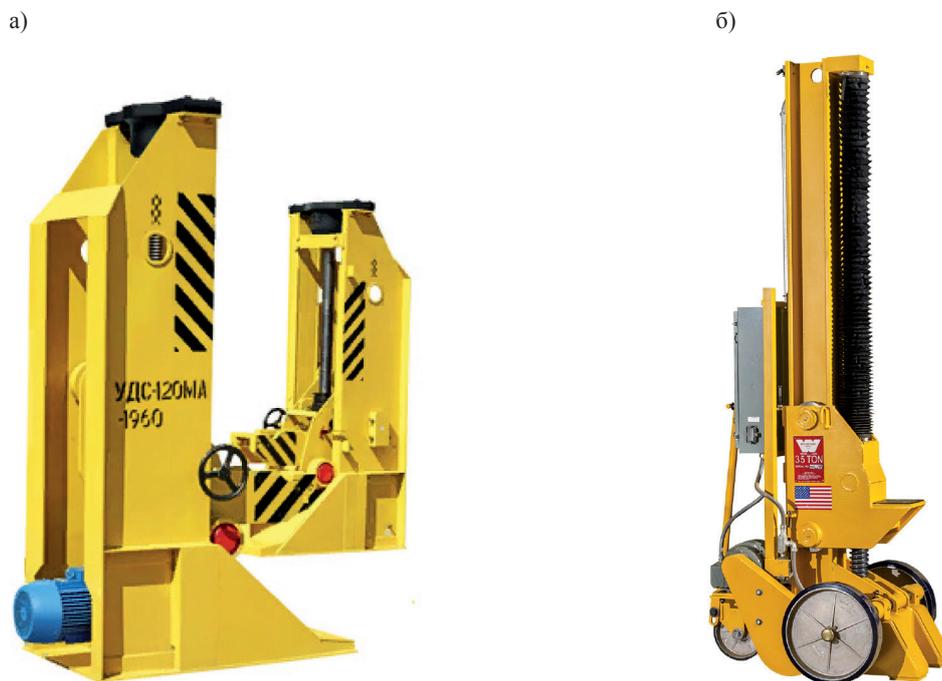


Рис. 1. Винтовые домкраты производителей:
а — Кубаньжелдормаш (Россия); б — Whiting corporation, Monee (Illinois, USA)

Кинематическая схема винтовых домкратов приведена на рис. 2.

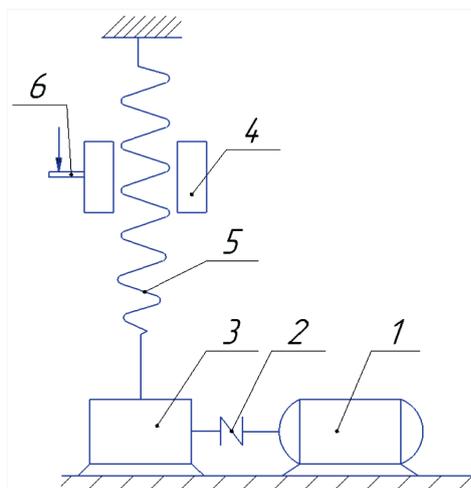


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода подъемника

Согласно этой схеме, сопряженная с винтом 5 гайка установлена в подвижную каретку 4 с подвижной опорой 6. За счет передачи крутящего момента от приводного электродвигателя 1 с помощью муфты 2 червячному редуктору 3 нижний конец винта получает вращательное движение от глобоидного червячного редуктора. На кинематической схеме электропривода подъемника показано, что снижение КПД происходит в местах передачи *гайка – винт* в зонах контакта роликов подвижной каретки с направляющими, в местах соединения винта с редуктором, в редукторе, а также муфте.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Практика использования имеющихся подъемно-транспортных установок показала их основные недостатки:

1. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором цилиндрической конструкции, используемые в качестве приводного электродвигателя, обладают относительно малым пусковым моментом, что снижает нагрузочную способность домкрата, требуя установки двигателей повышенной мощности, и ведет к увеличению габаритов электропривода и его стоимостных показателей.

2. Отсутствие эффективной системы охлаждения ведет к снижению КПД двигателя, сокращению срока эксплуатации изоляции обмоток, что влечет за собой уменьшение надежности и скорый выход из строя приводного электродвигателя подъемно-транспортных установок.

3. Отсутствие в конструкции тормозного устройства уменьшает точность позиционирования груза на высоте.

4. Пониженный КПД за счет увеличенного числа передаточных механизмов.

Разработанная конструкция, представленная на рис. 3, позволяет повысить функциональные возможности домкрата, увеличить его грузоподъемность и расширить сферу применения [8].

Конструктивно-интегрированный электропривод (КИЭ) домкрата содержит аксиальный асинхронный двигатель (ААД), сборный корпус, состоящий из нижнего несущего щита 1 и верхнего несущего щита 2, закрепленных неподвижно между собой и образующих внутреннюю кольцевую полость 3 посредством болтового соединения 4. ААД выполнен в виде асинхронного одно-статорного однороторного аксиального электродвигателя. Магнитопровод статора 5 с обмоткой возбуждения 6 закреплен с внутренней торцевой стороны нижнего несущего щита 4. Ротор 7 выполнен в форме стакана, в котором расположено симметричное относительно осевой линии сквозное отверстие 8, при этом основание в нижней части стакана ротора 7 дополнительно сопрягается с гайкой 9 посредством радиально-упорного подшипника 10, внутреннее кольцо которого расположено в уступе 11 гайки 9, а внешнее находится в уступе 12, выполненном во внутренней нижней части диска 13. В верхней внешней части диска 13 расположен уступ 14, на внешнюю боковую поверхность которого надета пружина 15, одним концом упирающаяся в верхнюю поверхность уступа 14 в верхней внешней части диска 13, а другим — в нижнюю поверхность уступа 16 ротора 7. При этом, расстояние между нижней поверхностью уступа 16 ротора 7 и верхней торцевой поверхностью диска 13 выполнено с учетом того, что при отсутствии питания на обмотке возбуждения 6, расстояние между торцевой поверхностью магнитопровода статора 5 и нижней торцевой поверхностью основания ротора 7 должно быть равно суммарной величине рабочего воздушного зазора δ и аксиального перемещения Δ ротора вдоль внешней поверхности диска 14. С внутренней торцевой стороны верхнего несущего щита 2 неподвижно установлен тормозной диск 17 тормозного устройства, на котором неподвижно закреплена тормозная накладка 18. На верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7 закреплена пластина 19 при помощи винтового соединения 20. Гайка 9 позиционируется в нижнем несущем щите 1 и верхнем несущем щите 2 при помощи радиально-упорных подшипников 21, 24.

Во внутренней полости стакана ротора 7 расположена двухступенчатая передача, объединяющая в себе большое центральное зубчатое колесо 23 с внутренними зубьями, двухвенцовые сателлиты 24, малое центральное зубчатое колесо 25 с внешними зубьями, закрепленное неподвижно на гайке 9 при помощи шпонки 26, причем двухвенцовые сателлиты 24 позиционируются в верхнем

несущем щите 2 при помощи болтов 27. Винт 28 сопряжен с внутренней полостью гайки 9 посредством резьбового соединения 29. В верхней части винта 28 изготовлена головка 30 для принятия нагрузки.

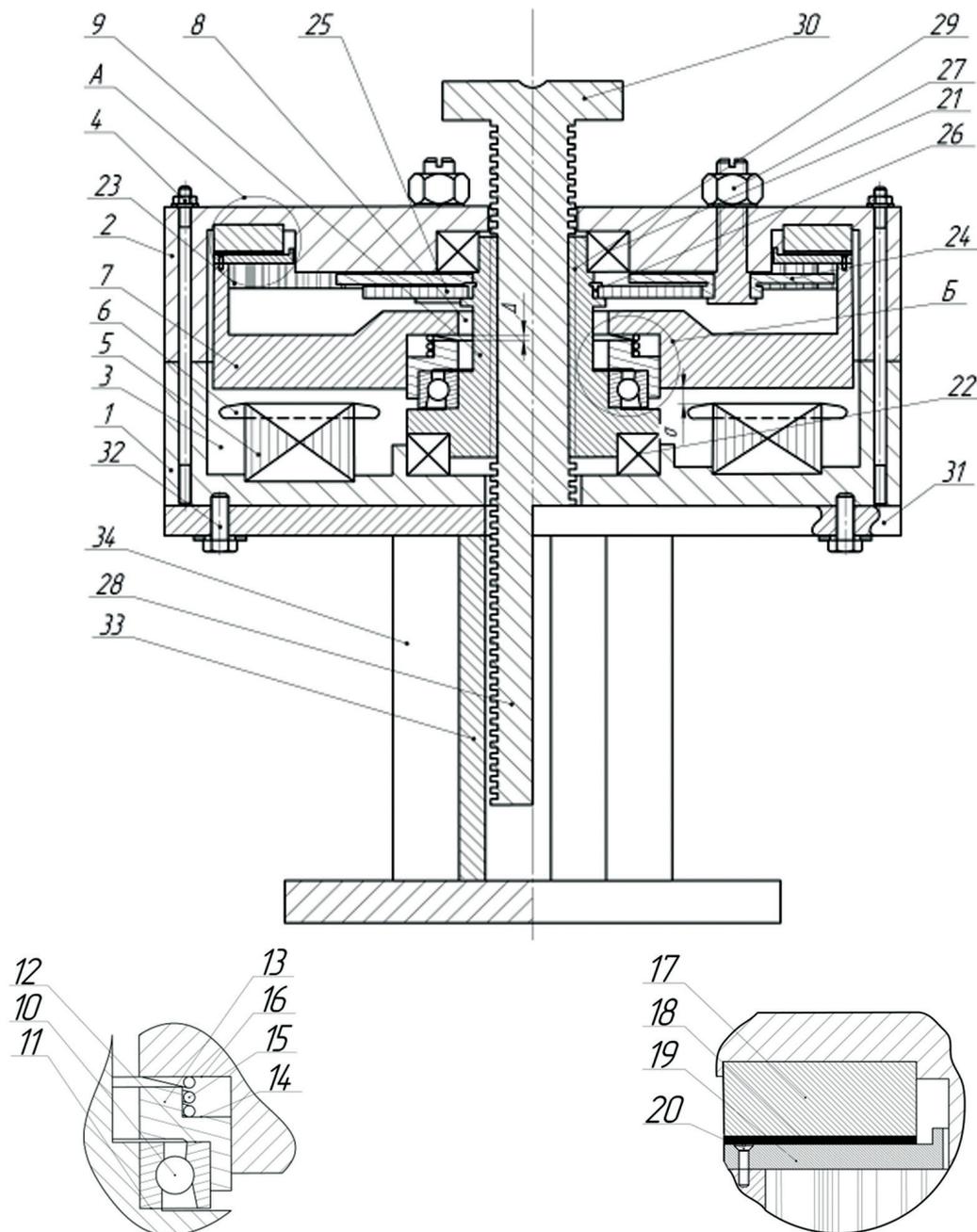


Рис 3. Конструктивно-интегрированный электропривод домкрата

Нижний несущий щит 1 и верхний несущий щит 2 образуют сборную конструкцию, расположенную на площадке 31, которая соединена с нижним несущим щитом 1 болтовым соединением 32, цилиндрической полую стойкой 33 и радиальными кронштейнами 34, усиливающими как цилиндрическую полую стойку 33, так и площадку 34.

Принцип работы домкрата

В качестве источника питания КИЭ домкрата может служить как источник синусоидального напряжения промышленной частоты, так и частотно-регулируемый источник, который является целесообразным при необходимости регулирования скорости подъема / опускания груза

и использовании винта 28 малой высоты. При подключении переменного синусоидального напряжения на обмотку возбуждения 6 магнитопровода статора 5, расположенного на внутренней торцевой стороне нижнего несущего щита 1, возникает пусковой ток, превышающий номинальный ток рабочего режима машины, вследствие чего возникает электромагнитное поле, под воздействием аксиального электромагнитного усилия которого кольцевой диск ротора 7 со сквозным отверстием 8 совершает аксиальное смещение вдоль гайки 9. При этом пружина 15, расположенная в уступе 14 верхней внешней части диска 13, одним концом упирающаяся в верхнюю поверхность уступа 14 в верхней внешней части диска 13, а другим — в нижнюю поверхность уступа 16 ротора 7, получит дополнительное сжатие, а зазор между нижней поверхностью уступа 16 ротора 7 и верхней торцевой поверхностью диска 13 будет уменьшаться. Между тормозной накладкой 18, закрепленной на тормозном диске 17, и пластиной 19, зафиксированной винтовым соединением 20 на верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7, образуется воздушный зазор, равный величине Δ , а между аксиальными рабочими поверхностями магнитопровода статора 5 и нижней торцевой поверхностью основания ротора 7 устанавливается рабочий зазор δ .

В это время во внутренней кольцевой полости 3 вращающееся магнитное поле приводит в движение стакан ротора 7 за счет того, что гайка 9 сопрягается со стаканом ротора 7 через радиально-упорный подшипник 10, внутреннее кольцо которого расположено в уступе 11 гайки 9, а внешнее находится в уступе 12, выполненном во внутренней нижней части диска 14. При этом центральное зубчатое колесо 23, расположенное во внутренней полости стакана ротора 7, через двухвенцовые сателлиты 24, закрепленные в верхнем несущем щите 2 при помощи болтов 27, приводит в движение малое центральное зубчатое колесо 25, закрепленное неподвижно на гайке 9 при помощи шпонки 26, увеличивая крутящий момент и уменьшая угловую частоту. Так как малое центральное зубчатое колесо 25 сопряжено неподвижно с гайкой 9 при помощи шпонки 26, крутящий момент будет передаваться гайке 9 и вращать ее в радиально-упорных подшипниках 21 и 24. При этом гайка 9 связана с винтом 28 посредством резьбового соединения 29 и при заторможенном винте 28 или нахождении груза на головке винта 30, вращающаяся гайка 9 будет поднимать или опускать винт 28. При этом нижний несущий щит 1 соединен неподвижно с верхним несущим щитом 2 посредством болтового соединения 4, и вся конструкция фиксируется на площадке 31 при помощи болтового соединения 34. Вес груза при этом будет действовать от нижнего несущего щита 1 через площадку 31, соединенную с цилиндрической полый стойкой 33, усиленной радиальными кронштейнами 34.

При отключении напряжения от обмотки возбуждения 6 исчезает магнитный поток, удерживающий кольцевой диск ротора 7 в рабочем положении. Вследствие этого тормозная пружина 15 вызывает обратное аксиальное смещение ротора 7 вдоль гайки 9. При этом тормозная накладка 18, закрепленная на тормозном диске 17, входит в контакт с пластиной 19, зафиксированной винтовым соединением 20 на верхней торцевой поверхности кольцевого диска ротора 7. В результате трения происходит остановка кольцевого диска ротора 7 и гайки 9. Это приводит к остановке винта 28 с автоматической фиксации его положения, что повышает безопасность эксплуатации при работе с грузами. Применение самотормозящейся конструкции позволяет более точно позиционировать положение винта 28 после отключения напряжения от обмотки возбуждения 6 за счет ускоренного гашения накопленной энергии (электромагнитного поля и энергии вращения диска ротора) посредством тормозного устройства.

Увеличение грузоподъемности КИЭ домкрата (по сравнению с данными источника [9]) при установленной мощности приводного электродвигателя достигается за счет дополнительно увеличения крутящего момента, передаваемого на гайку. Это реализуется за счет встроенной двухступенчатой передачи, понижающей частоту вращения и одновременно увеличивающей вращающий момент, передаваемый от ротора к гайке. На основе разработанной конструкции изготовлен экспериментальный образец домкрата (рис. 4).

а)



б)



Рис. 4. Экспериментальный образец КИЭ винтового домкрата:
а — внешний вид; б — подготовка прибора к работе

Кинематическая схема экспериментального образца с параметрами двухступенчатой передачи приведена на рис. 5.

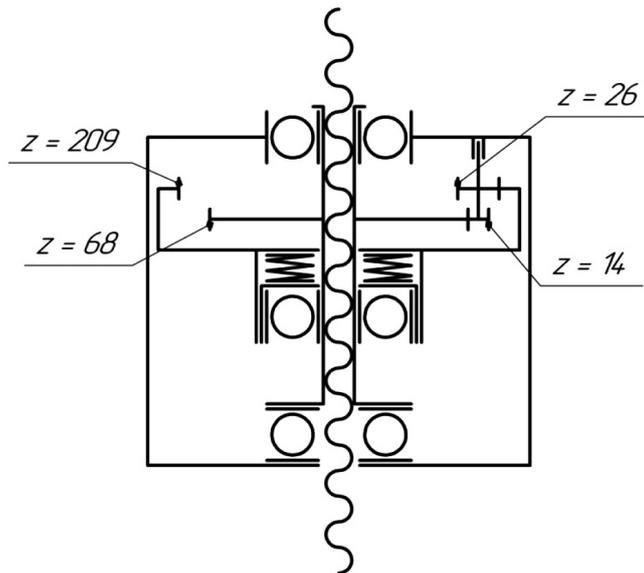


Рис. 5. Кинематическая схема КИЭ винтового домкрата
с аксиальным электродвигателем

Согласно источнику [10] и кинематической схеме, передаточное число

$$U_{\text{общ}} = \frac{Z_1 Z_4}{Z_2 Z_3} = \frac{26 \cdot 68}{209 \cdot 14} = 0,6, \quad (1)$$

где Z_1 — число зубьев шестерни большего диаметра двухвенцовых сателлитов;
 Z_2 — число зубьев центрального зубчатого колеса;
 Z_3 — число зубьев шестерни меньшего диаметра двухвенцовых сателлитов;
 Z_4 — число зубьев малого центрального зубчатого колеса.

За один оборот ротора, выполненного в виде стакана, малое центральное зубчатое колесо делает 0,6 оборота, т. е. происходит необходимое уменьшение частоты вращения и увеличение крутящего момента, действующего на гайку, что ведет к увеличению грузоподъемности домкрата с расширением его сферы применения и функциональных возможностей при работе на высоте, соизмеримой с высотой сборного корпуса электродвигателя.

Результаты (Results)

Подъемное усилие является основной характеристикой самотормозящегося винтового домкрата с аксиальным электродвигателем во время подъема и опускания груза. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя в общем случае, в соответствии с источником [11],

$$M_M = M_T + M_B, \quad (2)$$

где M_T — тормозной момент, Н·м; M_B — полезный тормозной момент на валу, Н·м.

Тормозной момент M_T будет пропорционален механическим, вентиляционным и добавочным потерям в электродвигателе. Домкрат работает в кратковременном и повторно-кратковременном режиме, следовательно, вентиляционными и добавочными потерями можно пренебречь. Таким образом, получим

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi n}. \quad (3)$$

В конструкции КИЭ домкрата применяется двухступенчатая передача *гайка – винт* с увеличенным крутящим моментом, передаваемым на гайку (по сравнению с конструкцией [9]), а также с компактностью и плавностью хода [12].

Поступательное перемещение S гайки:

$$S = \frac{\varphi p_r k}{2\pi}, \quad (4)$$

где φ — угол поворота винта; p_r — шаг резьбы; k — число заходов резьбы.

Вращающий момент

$$M = F_c \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho_c), \quad (5)$$

где $F_c = F_t \operatorname{tg} \alpha$ — сила, приложенная к поступательно движущемуся винту и, соответственно, к поднимаемому грузу, Н; d_{cp} — средний диаметр резьбы, мм; ψ — угол подъема винтовой линии; ρ_c — приведенный угол трения скольжения.

Выражение (4) можно записать в виде

$$M = \frac{F_t \operatorname{tg} \alpha d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho_c), \quad (6)$$

где F_t — осевая сила центрального зубчатого колеса и сателлита.

В целях определения параметров аксиального электродвигателя используем выражение для машинной постоянной аксиальных электрических машин [13]:

$$D_{cp}^2 l_\delta = \frac{6,1 \cdot 10^5 P'}{\alpha_\delta k_\delta k_{o\delta} A B_\delta n'}, \quad (7)$$

где D_{cp} — средний диаметр активной поверхности, м; l_δ — активная длина, м; $P' = P_{эм}$ — расчетная мощность, кВт; A — линейная нагрузка на среднем диаметре, А/м; B_δ — амплитуда индукции в зазоре, Тл; α_δ — коэффициент уплощения; k_δ — коэффициент формы кривой поля; $k_{o\delta}$ — обмоточный коэффициент.

Из формулы (5) с учетом выражения (6) имеем

$$M_B = \frac{1}{2 \cdot 6,1 \cdot 10^5} \alpha_\delta k_\delta k_{o\delta} A B_\delta n'. \quad (8)$$

Используя выражение (5) и (7), определим подъемную силу передачи двухступенчатая передача *гайка – винт* самотормозящегося винтового домкрата:

$$F_t = \frac{\alpha_\delta k_\delta k_{об} AB_\delta D_{cp} l_\delta}{6,1 \cdot 10^5 \pi \cdot \text{tg } \alpha \cdot d_{cp} \cdot \text{tg}(\psi + \rho_c)} \quad (9)$$

Полученное выражение показывает, что расчетное осевое усилие, необходимое для подъема и опускания груза самотормозящегося винтового домкрата с аксиальным электродвигателем, зависит прямо пропорционально от выбранных электромагнитных нагрузок, объема активных материалов магнитопровода и обратно пропорционально от типа и профиля резьбы, а также силы, возникающей в передаче *сателлит – центральное зубчатое колесо*, которое неподвижно закреплено на гайке.

Баланс мощности конструктивно-интегрированного электропривода домкрата представим в виде равенства (10) согласно рис. 6:

$$P_c = P_{\text{раб.орг}} + J\omega \frac{d\omega}{dt} + c\varphi \frac{d\varphi}{dt} + Li \frac{di}{dt} + m_{гр} g \frac{dh}{dt} h_{гр} + \Delta P_\Sigma, \quad (10)$$

где P_c — мощность, поступающая из сети на вход электропривода.

Мощность, расходуемая на реализацию движения рабочего органа с преодолением сил статического сопротивления, определяется следующим образом:

$$P_{\text{раб.орг}} = M_{\text{раб.орг}} \omega_{\text{раб.орг}} \quad (11)$$

Мощность $P_{\text{раб.орг}}$ полностью идет на увеличение потенциальной энергии поднимаемого груза: $m_{гр} g \frac{dh}{dt} h_{гр}$. В случае конструктивно-интегрированного электропривода домкрата присутствуют элементы, способные запасать энергию, где $J\omega \frac{d\omega}{dt}$ — мощность, направленная на изменение кинетической энергии в движущихся элементах электромеханической части (двухступенчатая передача), $c\varphi \frac{d\varphi}{dt}$ — мощность, расходуемая на изменение потенциальной энергии деформируемого элемента электропривода (тормозная пружина). Изменение энергии в индуктивном элементе электропривода определяется как $Li \frac{di}{dt}$. При работе электропривода часть энергии ΔP_Σ определяется как сумма потерь на нагрев в обмотках ААД и на трение в механической части.

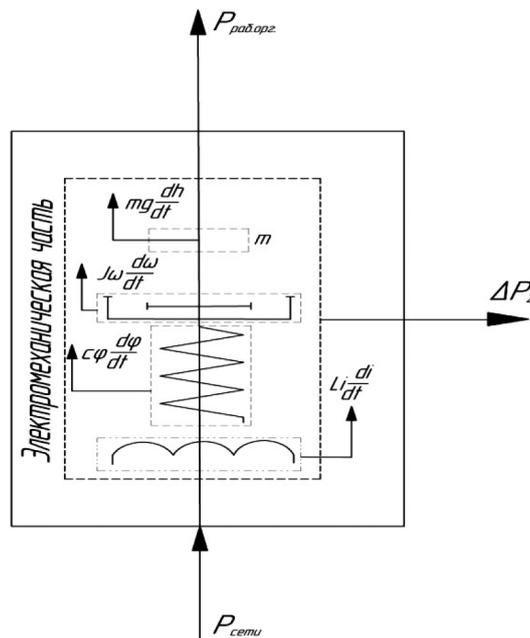


Рис. 6. Баланс мощности в конструктивно-интегрированном электроприводе

КПД конструктивно-интегрированного электропривода представим в виде следующего выражения:

$$\eta_{\text{КИЭ}} = \eta_{\text{э.п.}} \cdot \eta_{\text{мех.ч.}} \quad (12)$$

КПД электромеханического преобразователя:

$$\eta_{\text{э.п.}} = \frac{P_{\text{элмаг}}}{P_{\text{эм.п.}}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{элмаг}}$ — электромагнитная механическая мощность; $P_{\text{эм.п.}}$ — мощность на входе электромеханической части.

КПД механической части привода:

$$\eta_{\text{мех.ч.}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{U_{13}^H}\right) \cdot (1 - \eta_{13}^H), \quad (14)$$

где U_{13}^H — передаточное число двухступенчатой передачи; η_{13}^H — КПД ступеней передачи при остановленном водиле.

С учетом выражений (13) и (14) КПД конструктивно-интегрированного электропривода домкрата:

$$\eta_{\text{КИЭ}} = \frac{P_{\text{элмаг}}}{P_{\text{эм.п.}}} \cdot 1 - \left(1 - \frac{1}{U_{13}^H}\right) \cdot (1 - \eta_{13}^H). \quad (15)$$

Из выражения (15) видно, что КПД конструктивно-интегрированного электропривода домкрата обратно пропорционален передаточному числу передачи.

Выводы (Summary)

На основе проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Усовершенствован механизм и предложен конструктивно-интегрированный электропривод винтового домкрата, позволяющий осуществлять плавный подъем и опускание груза при его повышенной грузоподъемности и точной фиксации исполнительного органа электропривода, что позволяет применять его для работы многоярусной конструкции откатываемых закрытий, осмотра, инспекции, ремонта, монтажных работ и центрировании сборочно-монтажных единиц кораблей и судов, а также выполнять работы по поднятию и опусканию при ремонте перегрузочной техники и контейнеров в портовом хозяйстве быстро и просто, без использования дополнительного монтажного и дорогостоящего оборудования в любых температурных режимах.

2. Разработанные методики расчета конструктивно-интегрированного электропривода домкрата позволяют на этапе проектирования определять запас грузоподъемности домкрата и его электромеханические свойства.

3. Сделан вывод о необходимости усовершенствования не только конструктивных особенностей механизмов, но и снижения их себестоимости, что сделает продукт конкурентоспособным на современном рынке и обеспечит поддержку отечественного производителя не только на российском, но и на международном уровне.

Коллектив авторов благодарит СКИБ «Энергия будущего» ФГБОУ ВО «КубГТУ» за оказанную помощь в разработке предложенного проекта и подготовке материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Dwyer K. Interpretation of pipe-jacking and lubrication records for drives in silty soil / K. G. O'Dwyer, B. A. McCabe, B. B. Sheil // *Underground Space*. — 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.04.001.
2. Ополькин А. П. Классификация грузоподъемных машин / А. П. Ополькин // *Проблемы науки*. — 2016. — № 8 (9). — С. 23–24.

3. Николаева Н. Д. Анализ домкратов и программный расчет основных параметров / Н. Д. Николаева, О. В. Мушкин, В. М. Труханов // Научное обозрение. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 75–77.
4. Трифонов Г. И. Исследование подъемных механизмов средств наземного обслуживания общего применения и прогнозирование их износа / Г. И. Трифонов, С. Ю. Жачкин, С. В. Лазарев // Воздушно–космические силы. Теория и практика. — 2018. — № 7 (7). — С. 102–108.
5. Асминин В. В. Комплекс технических средств судоподъема, основанный на применении гидравлических тросовых домкратов / В. В. Асминин, А. В. Краморенко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № S1. — С. 30–35. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-30-35.
6. Zhang D. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study / D. Zhang, B. Liu, Y. Qin // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2016. — Vol. 60. — Pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.009.
7. Герасимов Н. И. К вопросу центрирования тяжеловесных сборочно – монтажных единиц судового оборудования / Н. И. Герасимов, И. В. Грачев // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 2-2 (40). — С. 40–46.
8. Заявка на выдачу патента на изобретение № 2018147704. Самотормозящийся винтовой домкрат с аксиальным электродвигателем / С. А. Попов, В. Е. Нечесов, Н.В. Ладенко; заявл. 28.12.2018.
9. Пат. 2601996 Российская Федерация, МПК В66F 1/06, В66F 3/08, В66F 3/44. Самотормозящийся винтовой домкрат с аксиальным электродвигателем / С. А. Попов, Т. Б. Гайтова, Н. В. Ладенко, П. Ю. Пономарев, В. С. Спичак; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «КубГТУ». — № 2015119724/11; заявл. 25.05.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.
10. Бильдюк Н. А. Детали машин / Н. А. Бильдюк, С. И. Каратушин, Г. Д. Малышев. — СПб.: Политехника, 2015. — 695 с.
11. Москаленко В. В. Электрические машины и приводы / В. В. Москаленко. — М.: Академия, 2018. — 128 с.
12. Попель О. Е. К вопросу снижения энергопотребления винтовыми электродомкратами типа ДТ-40 / О. Е. Попель, О. В. Олещук // Подъемно–транспортная техника. — 2014. — № 4 (44). — С. 53–60.
13. Григорьев М. А. Оптимизация геометрии электромеханических преобразователей / М. А. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. — Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью «Апробация», 2015. — С. 32–36.

REFERENCES

1. O'Dwyer, Kevin G., Bryan A. McCabe, and Brian B. Sheil. "Interpretation of pipe-jacking and lubrication records for drives in silty soil." *Underground Space* (2019). DOI: 10.1016/j.undsp.2019.04.001
2. Opol'kin, A. P. "Klassifikatsiya gruzopod'emnykh mashin." *Problemy Nauki* 8(9) (2016): 23–24.
3. Nikolaeva, N. D., O. V. Mushkin, and V.M. Trukhanov. "Analysis of jacks and software calculation of the main parameters." *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* 3 (2016): 75–77.
4. Trifonov, G. I., S. Yu. Zhachkin, and S. V. Lazarev. "Lifting mechanisms investigation of ground service equipment for general use and forecasting their wear." *Vozdushno–kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* 7(7) (2018): 102–108.
5. Asminin, V., and A. Kramorenko. "Ship salvage complex using hydraulic strand jacks." *Transactions of the Krylov State Research Centre S1* (2018): 30–35.
6. Zhang, Dingwen, Bo Liu, and Yujun Qin. "Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study." *Tunnelling and Underground Space Technology* 60 (2016): 151–164. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.009
7. Gerasimov, Nikolay I., and Ivan V. Grachev. "Centering of heavy-weight assembly and installation units of ship equipment." *Marine intelligent technologies* 2-2(40) (2018): 40–46.
8. Popov, S. A., V. E. Nechesov, and N. V. Ladenko. Self-braking screw jack with axial motor. Application for the invention; No. 2018147704. 28 Dec. 2018.
9. Popov, S. A., T. B. Gaitova, N. V. Ladenko, P. Yu. Ponomarev, and V. S. Spichak. RU 2 601 996 C2, IPC B66F 1/06, B66F 3/08, B66F 3/44. Samotormozyashchiysya vintovoi domkrat s aksial'nym elektrodvigatелем. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Nov. 2016.
10. Bil'dyuk, N. A., S. I. Karatushin, and G.D. Malyshev. *Detali mashin*. SPb.: Politekhnik, 2015.

11. Moskalenko, V. V. *Elektricheskie mashiny i privody*. M.: Akademiya, 2018.
12. Popel', O. E., and O. V. Oleshchuk. "K voprosu snizheniya energopotrebleniya vintovymi elektrodomkratami tipa DT-40." *Pod'emno-transportnaya tekhnika* 4(44) (2014): 53–60.
13. Grigor'ev, M. A., A. N. Shishkov, E. V. Belousov, D. A. Sychev, N. I. Naumovich, and E. S. Khayatov. "Optimizatsiya geometrii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei." *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki v 21 veke: Sbornik materialov VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Makhachkala: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu «Aprobatsiya», 2015. 32–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: sa_popov@inbox.ru

Нечесов Владимир Евгеньевич — аспирант
Научный руководитель:
Попов Сергей Анатольевич
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: vlad.nechosov@mail.ru

Попова Светлана Валентиновна — аспирант
Научный руководитель:
Попов Сергей Анатольевич
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет
350072, Российская Федерация, г. Краснодар,
ул. Московская, 2
e-mail: s.sv.23@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Popov, Sergey A. —
PhD, associate professor
Kuban State Technological University
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: sa_popov@inbox.ru

Nechesov, Vladimir E. — Postgraduate
Supervisor:
Popov, Sergey A.
Kuban State Technological University
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: vlad.nechosov@mail.ru

Popova, Svetlana V. — Postgraduate
Supervisor:
Popov, Sergey A.
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya Str.,
Krasnodar, 350072,
Russian Federation
e-mail: s.sv.23@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 8 августа 2019 г.
Received: August 8, 2019.*

DIFFERENTIATED DETERMINATION OF SCATTERING RESISTANCE OF TRANSFORMER

I. P. Popov

Kurgan Regional Creative Union of Authors in the Field of Science and Technology,
Kurgan, Russian Federation

The total scattering reactance of the transformer with concentric cylindrical windings depends on the coils thickness and the gap between them. Existing methods do not allow measuring reactance of scattering for each winding of a transformer separately, therefore, for simplicity they are often considered equal to each other. The case when they are not substantially equal is considered in the paper. In fact, the calculation of the flux linkage of the external winding shows that its reactive resistance of scattering is greater than the total resistance of scattering of both windings. Two circumstances follow from this. Firstly, the internal winding of the transformer absorbs magnetic flux to a greater extent than it scatters (scatters its magnetic flux, absorbs from the external winding). Secondly, its (equivalent) reactance of scattering is capacitive. The purpose of the study is to justify the possibility of experimental determination of the scattering reactance for each transformer winding separately. The relevance of the work is due to the widespread distribution of transformers. The scattering reactance of each winding of the transformer individually can be determined by at least three experimental methods that give satisfactory agreement between the results. An almost paradoxical result is the capacitive nature of the scattering resistance of the inner winding of the transformer obtained only for concentric cylindrical windings. It should not be generalized with other types of windings. The presented experimental methods are not related to the nature of the reactivity of scattering resistances. They are universal and they can be used with any type of windings. The obtained results are recommended for use in the design and study of transformers.

Keywords: transformer, winding, scattering, inductive nature of the resistance, capacitive nature of the resistance, flux linkage, magnetic flux.

For citation:

Popov, Igor P. "Differentiated determination of scattering resistance of transformer." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-932-940.

УДК 621.314.21.042.52

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЙЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

И. П. Попов

Курганский областной творческий союз авторов в области науки и техники,
Курган, Российская Федерация

Изучено суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками, которое зависит от толщины катушек и величины зазора между ними. Поскольку существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, часто для простоты их полагают равными друг другу. В данной работе рассмотрен случай, когда они существенно не равны. Выполненный расчет потокоцепления внешней обмотки показывает, что ее реактивное сопротивление рассеяния больше суммарного сопротивления рассеяния обеих обмоток. Из этого вытекают два обстоятельства: первое — внутренняя обмотка трансформатора поглощает магнитный поток в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой магнитный поток, поглощает от внешней обмотки); второе — ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным. Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки в отдельности для любых видов трансформаторов. Трансформаторы находят широкое применение на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта. Отмечается, что реактивное

сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов. Парадоксальным является то, что для концентрических цилиндрических обмоток трансформатора установлен емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки. Обобщать его с другими типами обмоток не следует. Представленные экспериментальные методы не связаны с характером реактивности сопротивлений рассеяния, они являются универсальными — их можно использовать при любых типах обмоток. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный характер сопротивления, емкостный характер сопротивления, потокосцепление, магнитный поток.

Для цитирования:

Попов И. П. Дифференцированное определение сопротивлений рассеяния трансформатора / И. П. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-932-940.

Введение (Introduction)

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками [1]:

$$x = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{3} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right), \quad (1)$$

где ω — циклическая частота тока; μ_0 — постоянная магнитная; D — средний диаметр обмотки; w — число витков (приведенное); l — высота обмотки; a_0 — зазор между катушками; a_1, a_2 — толщины катушек.

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными половине от x . Применительно к рассматриваемому случаю они существенно не равны.

Потокосцепление внешней обмотки [2]:

$$\Psi_2 = \frac{\mu_0 \pi D}{l} \left(\int_0^{a_1} w_2 i \frac{w_1}{a_1} x dx + \int_0^{a_0} w_2 i w_2 dx + \int_0^{a_2} w_2 x \frac{w_2}{a_2} x dx \right) = \frac{i \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right),$$

где i — приведенный ток; $w_1 = w_2 = w$ (индексы приведены для наглядности интегрирования).

Отсюда реактивное сопротивление рассеяния внешней обмотки

$$x_2 = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right). \quad (2)$$

Вычитание реактивного сопротивления рассеяния внешней обмотки из выражения (1) дает реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки:

$$x_1 = - \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \frac{a_1}{6}. \quad (3)$$

Этот результат был получен Е. Г. Марквардтом [2], который, однако, не имел признания из-за отсутствия экспериментальной проверки. Знак «−» в выражении (3) указывает на два обстоятельства: первое — внутренняя обмотка поглощает магнитный поток [3] в большей степени, чем рассеивает; второе — ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным. Из выражений (2) и (3) следует:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right); \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{6l}{\omega^2 \mu_0 \pi D w^2 a_1}. \quad (5)$$

Целью исследования является обоснование возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности, в частности верификация выражений (2)–(5).

Трансформаторы находят широкое применение на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта [4]–[6]. С экспериментальным определением активных сопротивлений r_1 и r_2 обмоток проблем не существует.

Реактивное сопротивление рассеяния любой обмотки можно определить из формулы

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Полное сопротивление z , казалось бы, можно определить в соответствии с законом Ома для участка цепи. Однако при коротком замыкании, когда принято измерять реактивное сопротивление рассеяния, напряжение на вторичной обмотке равно нулю. Это и является причиной, которая не позволяет раздельно измерять рассеяния обмоток. Вместе с тем данную проблему можно решить, причем несколькими способами, что и является задачей настоящего исследования.

Методы и результаты исследования (Methods and Results of Research)

В данном исследовании используются общенаучные и математические методы, а также электротехнические расчеты. Существующие измерительные комплексы позволяют измерять действующие значения электрических величин и фазные сдвиги между ними практически с любой заданной точностью. Однако при поочередных измерениях величин высокая точность каждого измерения мало что дает, поскольку сами измеряемые величины нестабильны. Так как в целях определения реактивных сопротивлений важны не столько значения токов и напряжений, сколько соотношения между ними, проблема с их нестабильностью решена одномоментной регистрацией необходимых параметров, осуществляемой процессором. Это обеспечивает точность вычисляемых величин, сопоставимую с точностью единичного измерения.

Высокоточный метод холостого хода (XX)

Из схемы замещения трансформатора [7]–[9] (рис. 1) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0.$$

Отсюда

$$\dot{U}_{z1} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 z_1;$$

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1}. \quad (6)$$

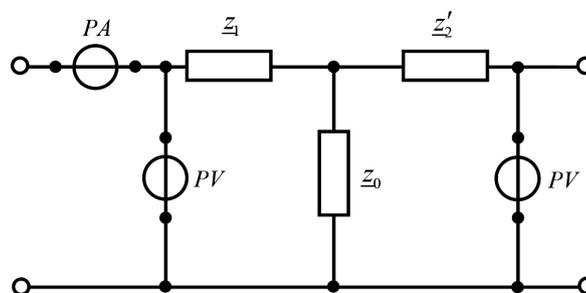


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Из обратимости трансформатора [10]–[12] следует

$$z_2' = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}'_1}{\dot{I}'_2}.$$

Здесь и далее верхний левый индекс «2» указывает, что величина получена во втором (обратимом) эксперименте.

Способ экспериментального определения параметров трансформатора ХХ

Порядок действий:

1. Измеряют и «приводят» величины: $\dot{U}_1, \dot{U}'_2, \dot{I}_1, {}^2\dot{U}'_2, {}^2\dot{U}_1, \dot{I}'_2, r_1, r'_2$.
2. В соответствии с выражением (6) определяют z_1 .
3. Определяют x_1, C_1 .
4. В соответствии с выражением (7) определяют z'_2 .
5. Определяют x'_2, L'_2 .

Пример 1. Определить сопротивления рассеяния для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 219,138$ В; $\dot{U}'_2 = 219,054e^{j0,23^\circ}$ В; $\dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ}$ А; ${}^2\dot{U}'_2 = 218,825$ В; ${}^2\dot{U}_1 = 2189,343e^{j0,02^\circ}$ В; $\dot{I}'_2 = 0,817e^{-j80,32^\circ}$ А.

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1} = \frac{219,138 - 219,054e^{j0,23^\circ}}{0,819e^{-j80,12^\circ}} = 1,075e^{-j4,33^\circ} \text{ Ом;}$$

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом;}$$

$$x_1 = -0,081 \text{ Ом;}$$

$$C_1 = -\frac{1}{2\pi f x_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,081} = 0,039 \text{ Ф;}$$

$$z'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}'_2} = \frac{218,825 - 218,343e^{j0,02^\circ}}{0,817e^{-j80,32^\circ}} = 0,601e^{j69,39^\circ} \text{ Ом;}$$

$$r'_2 = 0,211 \text{ Ом;}$$

$$x'_2 = 0,562 \text{ Ом;}$$

$$L'_2 = \frac{x'_2}{2\pi f} = \frac{0,562}{2\pi \cdot 50} = 1,790 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Таким образом, экспериментальное определение реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки трансформатора высокоточным методом холостого хода подтверждает достоверность выражений (2)–(5).

Высокоточный метод короткого замыкания (КЗ)

Из схемы замещения трансформатора следует:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0 = \dot{I}'_2 z'_2;$$

$$z_0 = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_0} z'_2.$$

Полное сопротивление при КЗ:

$$z = z_1 + \frac{z_0 z'_2}{z_0 + z'_2} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z_0 z'_2}{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z'_2 + z'_2} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_0} z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}'_1 - \dot{I}'_2} z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1} z'_2;$$

$$z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1} z'_2.$$

Отсюда следует, что

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1} z'_2.$$

Из обратимости трансформатора следует:

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}'_1}{{}^2\dot{I}'_2} \underline{z}'_1;$$

$$\underline{z}'_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \left(\frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}'_1}{{}^2\dot{I}'_2} \underline{z}'_1 \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}_1} + \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} \frac{{}^2\dot{I}'_1}{\dot{I}_1} \underline{z}'_1;$$

$$\underline{z}'_1 \left(1 - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} \frac{{}^2\dot{I}'_1}{\dot{I}_1} \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}_1};$$

$$\underline{z}'_1 = \frac{\dot{U}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \cdot {}^2\dot{I}'_1}; \quad (8)$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_1}{\dot{I}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \cdot {}^2\dot{I}'_1}. \quad (9)$$

Способ экспериментального определения параметров трансформатора (КЗ)

Порядок действий:

1. Измеряют и «приводят» величины: $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{I}'_2, {}^2\dot{U}'_2, {}^2\dot{I}'_2, {}^2\dot{I}'_1, r_1, r'_2$.
2. В соответствии с выражением (8) определяют \underline{z}'_1 .
3. Определяют x_1 .
4. В соответствии с выражением (9) определяют \underline{z}'_2 .
5. Определяют x'_2 .

Пример 2. Трансформатор ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 5,513 \text{ В}; \dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50^\circ} \text{ А}; \dot{I}'_2 = 4,016e^{-j20,48^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{U}'_2 = 5,572 \text{ В}; {}^2\dot{I}'_2 = 4,061e^{j20,71^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{I}'_1 = 5,660e^{-j19,29^\circ} \text{ А};$

$$\underline{z}'_1 = \frac{\dot{U}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \cdot {}^2\dot{I}'_1} =$$

$$= \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 1,072e^{-j4,29^\circ} \text{ Ом};$$

$$r_1 = 1,069 \text{ Ом};$$

$$x_1 = -0,080 \text{ Ом};$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_1}{\dot{I}_1 \cdot {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \cdot {}^2\dot{I}'_1} =$$

$$= \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50^\circ} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 0,597e^{j69,42^\circ} \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0,210 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,559 \text{ Ом}.$$

Таким образом, экспериментальное определение реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки трансформатора высокоточным методом короткого замыкания практически равнозначно высокоточному методу холостого хода.

Приближенный метод короткого замыкания при последовательном соединении

У двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются как первичные, так и вторичные обмотки. В результате схема принимает вид, представленный на рис. 2.

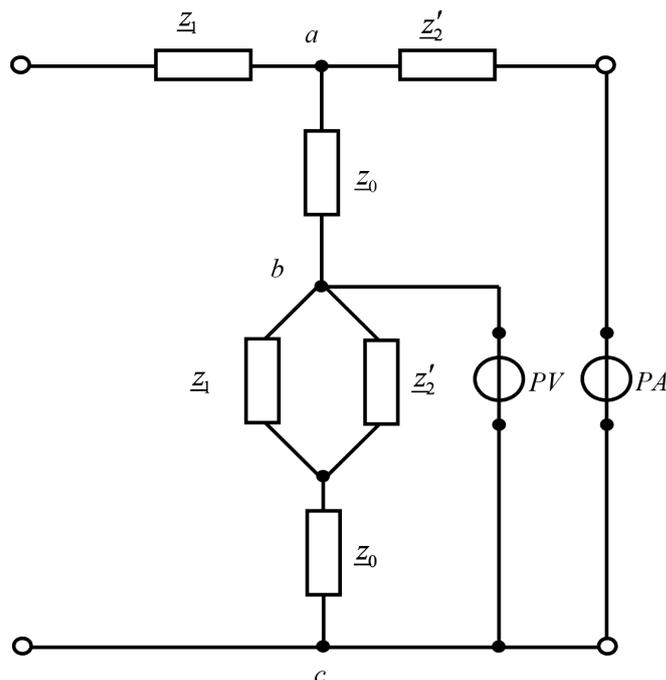


Рис. 2. Схема замещения для последовательного соединения

Ввиду того, что величины z_1 и z_2 значительно меньше z_0 , справедливо соотношение

$$U_{bc} \approx 0,5U_{ac}.$$

Однако $U_{ac} = U_{z_2'}$, следовательно,

$$z_2' = \frac{2U_{bc}}{I_2'} \quad (10)$$

Величины $r_1, r_2, x_k = x_1 + x_2$ определяются известными экспериментальными методами:

$$x_2 = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2};$$

$$x_1 = x_k - x_2. \quad (11)$$

Кроме того, последний результат может быть получен с использованием обратимости трансформатора:

$$z_1 = \frac{2^2 U_{bc}}{2 I_1},$$

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}.$$

Способ экспериментального определения параметров трансформатора (КЗ)

Используют следующий алгоритм действий:

1. Два идентичных трансформатора соединяют по схеме в соответствии с рис. 2.
2. Измеряют и «приводят» величины: $U_{bc}, I_2', r_1, r_2', x_k$.
3. В соответствии с выражением (10) определяют z_2' .
3. Определяют x_2' .
4. В соответствии с выражением (11) определяют x_1 .

Пример 3. Два идентичных трансформатора ОСМ-1,00 соединены по схеме в соответствии с рис. 2. Измеренные величины: $U_{bc} = 1,2$ В; $I_2' = 3,9$ А; $r_1 = 1,1$ Ом; $r_2' = 0,2$ Ом; $x_k = 0,52$ Ом.

$$z'_2 = \frac{2U_{bc}}{I'_2} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = \sqrt{z'^2_2 - r'^2_2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ Ом};$$

$$x_1 = x_k - x'_2 = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ Ом}.$$

Недостатком приближенного метода короткого замыкания при последовательном соединении по сравнению с высокоточными методами является необходимость наличия двух идентичных трансформаторов, а его сравнительным достоинством — простота экспериментов.

Оценка точности полученных результатов

Соотношение реактивных сопротивлений обмоток, в соответствии с выражениями (2) и (3),

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a_1/2 + a_0 + a_2/3}{a_1/6}.$$

Пусть $a_1 = 3a_0 = a_2 = a$. Тогда $\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a/2 + a/3 + a/3}{a/6} = 7$.

Это соотношение, в соответствии с результатами примера 1, можно представить в виде —

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,562 \text{ Ом}}{0,081 \text{ Ом}} = -6,938, \text{ в соответствии с результатами примера 2 — } \frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,559 \text{ Ом}}{0,080 \text{ Ом}} = -6,987, \text{ в со-}$$

ответствии с результатами примера 3 — $\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,59 \text{ Ом}}{0,07 \text{ Ом}} = -8,429$. Разброс значений небольшой.

Обсуждение (Discussion)

Парадоксальный результат — емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Этот результат не является беспрецедентным [2], [13], [14]. Индуктивная электрическая машина — синхронный компенсатор — в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер [1].

Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния, они являются универсальными — их можно использовать при любых типах обмоток.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов.
2. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов, в том числе для применения их на водном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 360 с.
2. Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии / Е. Г. Марквардт // Электричество. — 1935. — № 9. — С. 44–51.
3. Попов И. П. Комбинированные векторы и магнитный заряд / И.П. Попов // Прикладная физика и математика. — 2018. — № 6. — С. 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329.
4. Jahromi A. An approach to power transformer asset management using health index / A. N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, W. Fan // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2009. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 20–34. DOI: 10.1109/MEI.2009.4802595.

5. Chatterjee A. Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method / A. Chatterjee, P. Bhattacharjee, N. K. Roy, P. Kumbhakar // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2013. — Vol. 45. — Is. 1. — Pp. 137–141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.08.044.
6. Abu-Elanien A. E. B. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic / A.E.B. Abu-Elanien, M.M.A. Salama, M. Ibrahim // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2012. — Vol. 27. — Is. 4. — Pp. 2029–2036. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
7. Diwyacitta K. Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer / K. Diwyacitta, R. A. Prasojo // *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — Is. 3. — Pp. 585–602.
8. Husain Z. Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers / Z. Husain // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2018. — Vol. 10. — No. 2. — Pp. 300–317. DOI: 10.15676/ijeei.2018.10.2.8.
9. Ranga C. Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers / C. Ranga, A.K. Chandel // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — No. 4. — Pp. 850–865. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.4.16.
10. Ranga C. Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers / C. Ranga, A. K. Chandel, R. Chandel // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — No. 2. — Pp. 394–406. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.2.13.
11. Rahmati A. Protection of power transformer using multi criteria decision-making / A. Rahmati, M. Sanaye-Pasand // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2015. — Vol. 68. — Pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.073.
12. Ghoneim S. S. M. A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis / S. S. M. Ghoneim, I. B. M. Taha // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2016. — Vol. 81. — Pp. 265–274. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.02.018.
13. Попов И. П. Емкостно-инертное устройство / И. П. Попов // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. — 2015. — № 2. — С. 43–45.
14. Попов И. П. Вращательные инертно-емкостные устройства / И. П. Попов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. — 2011. — № 3 (31). — С. 187–192.

REFERENCES

1. Kopylov, I. P. *Elektricheskiye mashiny*. М.: Energoatomizdat, 1986.
2. Markvardt Ye. G. “Ob elektromagnitnom rasseyanii.” *Elektrichestvo* 9 (1935): 44–51.
3. Popov, Igor Pavlovich. “Combined vectors and magnetic charge.” *Prikladnaya fizika i matematika* 6 (2018): 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329.
4. Jahromi, A., R. Piercy, S. Cress, and W. Fan. “An approach to power transformer asset management using health index.” *IEEE Electrical Insulation Magazine* 25.2 (2009): 20–34. DOI: 10.1109/MEI.2009.4802595.
5. Chatterjee, Anjali, Partha Bhattacharjee, N.K. Roy, and P. Kumbhakar. “Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 45.1 (2013): 137–141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.08.044.
6. Abu-Elanien, Ahmed EB, M.M.A. Salama, and M. Ibrahim. “Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic.” *IEEE Transactions on Power Delivery* 27.4 (2012): 2029–2036. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
7. Diwyacitta, Karunika, and Rahman Azis Prasojo. “Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer.” *International Journal on Electrical Engineering & Informatics* 9.3 (2017): 585–602.
8. Husain, Zakir. “Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers.” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 10.2 (2018): 300–317. DOI: 10.15676/ijeei.2018.10.2.8.
9. Ranga, Chilaka, and Ashwani Kumar Chandel. “Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers.” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 9.4 (2017): 850–865. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.4.16.

10. Ranga, Chilaka, Ashwani Kumar Chandel, and Rajeevan Chandel. “Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers.” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 9.2 (2017): 394. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.2.13.

11. Rahmati, A., and M. Sanaye-Pasand. “Protection of power transformer using multi criteria decision-making.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 68 (2015): 294–303. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.073.

12. Ghoneim, Sherif SM, and Ibrahim BM Taha. “A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 81 (2016): 265–274. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.02.018.

13. Popov, Igor Pavlovich. “Capacitive-inert device.” *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 2 (2015): 43–45.

14. Popov, Igor P. “Rotational inert-capacitive devices.” *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series* 3(31) (2011): 187–192.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Попов Игорь Павлович —
главный специалист
Курганский областной творческий союз авторов
в области науки и техники
640015, Российская Федерация, Курган,
ул. Парижской Коммуны, 33
e-mail: ip.popow@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Popov, Igor P. —
Chief Specialist
Kurgan Regional Creative Union of Authors
in the Field of Science and Technology
33, Parizhskoy Kommuny Str., Kurgan, 640015,
Russian Federation
e-mail: ip.popow@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 20 августа 2019 г.
Received: August 20, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-941-950

TECHNOLOGY OF FUELS MAGNETIC PROCESSING FOR DIESEL ENGINES OF FISHING AND TRANSPORT VESSELS

N. A. Pivovarova, A. F. Dorokhov, R. Velez Parra

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Priority task when using ship motor fuel is reduction of its consumption and reduction of harmful emissions into the environment. For the fishery fleet the share of fuel costs in the prime cost structure of extracted fish often exceeds 40%. Exhaust fumes contain products of uncomplete combustion of fuel: carbon monoxide, unburned hydrocarbons, soot particles.

Along with traditionally used physical and chemical methods of fuel preparation wave influences are also applied. One of the most effective, available and inexpensive methods of wave effects of processing is magnetic processing, i.e. exposure to a moving fluid flow by a constant magnetic field.

The purpose of this work is to reduce fuel consumption and carbon monoxide concentrations in exhaust gases by means of constant magnetic field action on the diesel fuel flow in the interval of magnetic field induction of 0.10 - 0.25 T and a linear flow velocity of 0.15-1.1 m/s at triple intersection of active zones by fuel.

The results of experimental studies of influencing the magnetic processing of diesel fuel on engine operation indicators carried out on a test bench on the full-size diesel engine are considered. Magnetic processing is carried out in a three-section magnetic tunnel.

The method of mathematical planning of experiment according to the scheme of the orthogonal plan of the second order has been applied to determine the optimal parameters of magnetic processing. It has been established that fuel consumption under optimal conditions corresponds to 5% of fuel economy compared with the raw fuel consumption, at the same time the carbon monoxide content in the exhaust gases decreases by 1.7 times. Values of the varied parameters make 0.18 T and 0.7 m/s.

Observed effects are explained by the fact that the influence of constant magnetic field on moving fuel flow is resulted by change of its disperse structure that leads to reduction of viscosity, density, superficial tension, flash temperature and other indicators. This, in turn, contributes to the formation a highly dispersed fuel-air mixture and a more complete combustion of hydrocarbons, as a result of which the fuel consumption and the content of carbon monoxide in the exhaust gases are reduced.

Keywords: ship fuel, diesel fuel, fuel consumption, exhaust gases, magnetic processing.

For citation:

Pivovarova, Nadezhda A., Aleksandr F. Dorokhov, and Rikardo Velez Parra. "Technology of fuels magnetic processing for diesel engines of fishing and transport vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-941-950.

УДК 665.753.4.004.18:[621.436]

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ТОПЛИВ ДЛЯ ДИЗЕЛЕЙ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

Н. А. Пивоварова, А. Ф. Дорохов, Р. Велес Парра

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Отмечается, что приоритетной задачей при использовании судового моторного топлива является уменьшение его расхода и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Для рыбопромыслового флота доля затрат на топливо в структуре себестоимости добываемой рыбы зачастую превышает 40 %. Выхлопные газы содержат продукты неполного сгорания топлива: монооксид углерода, несгоревшие углеводороды и сажевые частицы. Наряду с традиционно используемыми физическими и химическими методами подготовки топлива применяют волновые воздействия. Одним из наиболее эффективных,

доступных и недорогих методов волновых воздействий обработки является магнитная обработка, т. е. воздействие постоянным магнитным полем на поток движущейся жидкости.

Целью настоящей работы является снижение расхода топлива и концентрации монооксида углерода в отработавших газах посредством воздействия постоянного магнитного поля на поток дизельного топлива в интервале индукции магнитного поля 0,10–0,25 Тл и линейной скорости потока 0,15–1,1 м/с при трехкратном пересечении топливом активных зон. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния магнитной обработки дизельного топлива на показатели работы двигателя, проведенных на испытательном стенде. Предварительная магнитная обработка была проведена в трехсекционном магнитном туннеле. Для определения оптимальных параметров магнитной обработки был применен метод математического планирования эксперимента по схеме ортогонального плана второго порядка. Установлено, что расход топлива при оптимальных условиях соответствует 5 % экономии топлива по сравнению с расходом необработанного топлива, при этом содержание монооксида углерода в отработавших газах уменьшается в 1,7 раза. Значение варьируемых параметров составляет 0,18 Тл и 0,7 м/с. Доказано, что наблюдаемые эффекты объясняются тем, что в результате воздействия постоянного магнитного поля на движущийся поток топлива происходит изменение его дисперсной структуры, что ведет к уменьшению вязкости, плотности, поверхностного натяжения, температуры вспышки и других показателей, а это, в свою очередь, способствует образованию высокодисперсной топливо-воздушной смеси и более полному горению углеводородов, в результате снижается расход топлива и содержание монооксида углерода в отработавших газах.

Ключевые слова: судовое топливо, дизельное топливо, расход топлива, выхлопные газы, магнитная обработка.

Для цитирования:

Пивоварова Н. А. Технология магнитной обработки топлив для дизелей рыбопромысловых и транспортных судов / Н. А. Пивоварова, А. Ф. Дорохов, Р. Велес Парра // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-941-950.

Введение (Introduction)

Приоритетной задачей при использовании судового моторного топлива является уменьшение его расхода и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Отработавшие газы содержат несгоревшие углеводороды и продукты поликонденсации ароматических структур, которые обладают канцерогенным действием, сажевые частицы, монооксид углерода и др. Топливо также может содержать механические примеси, загрязняющие его в процессе хранения, транспортировки, слива-налива и в других случаях, способных вызвать эрозию, абразивный износ и нестабильную работу двигателя.

Высокий расход топлива ухудшает экономические показатели работы двигателя, увеличивает транспортные расходы и, соответственно, приводит к удорожанию всех работ, связанных с эксплуатацией транспорта. Для рыбопромыслового флота доля затрат на топливо в структуре себестоимости добываемой рыбы достигает 43 % [1]. Поэтому совершенствование топливосберегающих технологий в судовых энергетических установках имеет значительный экономический и социальный эффект. Для улучшения работы дизельного двигателя используют различные химические и физические методы. Химические методы заключаются во введении в топливо присадок на том или ином этапе производства или эксплуатации. Разработаны присадки с различными функциями, которые снижают испаряемость, улучшают низкотемпературные свойства топлива, интенсифицируют процесс сгорания, а также снижают выбросы экологически опасных веществ. Многие из них вводят на стадии производства топлив, некоторые — непосредственно перед подачей топлива к двигателю, например, антикоррозионные, диспергирующие и др. Наряду с очевидными преимуществами химического метода, обнаружены и его недостатки. Стоимость присадок весьма высока, их взаимодействие с топливом может иметь побочные эффекты, так же, как и образование новых продуктов сгорания.

Физические методы являются безреагентными и заключаются в отстаивании, центрифугировании и фильтровании топлив, которые позволяют избавиться от взвешенных частиц механических примесей и воды. Наряду с традиционно используемыми физическими методами подготовки

топлива применяют волновые воздействия. Одним из наиболее эффективных, доступных и недорогих методов волновых воздействий обработки является *магнитная обработка*, представляющая воздействие постоянным магнитным полем на поток движущейся жидкости. В литературе наряду с термином «магнитная обработка» встречаются также такие, как «омагничивание», «активация», «кондиционирование», «индуцирование» и др. Прибор, создающий магнитное поле, называют магнетизатором, магнитным устройством, магнитным активатором, магнитным кондиционером, магнетоном и даже катализатором, хотя последнее определение, скорее, образное.

Проводятся многочисленные исследования по поиску оптимальных режимов, конструкций, комбинаций воздействия постоянным магнитным полем на топлива, используемые на автотранспорте и судовых дизелях, в частности на дистиллятные дизельные топлива. Так, воздействие постоянным магнитным полем на дизельное топливо привело к уменьшению его расхода на 2–20 % [2]–[17] и увеличению тепловой эффективности двигателя на 5 % [3], [4]. Авторы работы [3] отмечают, что эффект от магнитной обработки увеличивается по мере роста магнитной индукции от 0,8 – 1,1 Тл, причем наибольший эффект достигается при невысоких нагрузках мотора. Интересные результаты получены в источнике [6] при исследовании магнитной обработки смешанного биодизельного топлива: при прочих равных условиях, по мере увеличения доли биодизеля в смеси от 0 до 20 % эффект от обработки возрос в несколько раз.

Плотность отработавших газов уменьшается на 15 % [3]. В многочисленных источниках [2]–[14] отмечается, что в составе отработавших газов содержание монооксида углерода уменьшается на 4–30 %, несгоревших углеводородов — на 27–30 %. В описании эффектов «индукционного катализатора» [15] эти величины еще больше — в 3–4 раза соответственно, а данные по количеству окислов азота расходятся принципиально. Так, результаты исследований [2], [4] показали, что содержание окислов азота в составе отработавших газов возросло на 18–20 %, авторы источника [9] отмечают отсутствие изменений в концентрации NO_x , а в работах [5], [6] приведены данные об их уменьшении на 1,5–5 %, в то время как авторами работ [8], [15] обнаружено более резкое снижение окислов азота — на 25–28 %. Как показано в работах [10], [11], в зависимости от нагрузки двигателя и места установки магнитного устройства содержание оксидов азота в топливе может изменяться как в сторону увеличения, так и уменьшения. Такой разброс в эффектах магнитной обработки объясняется тем, что подходы, терминология, методы и критерии оценки зачастую значительно отличаются, а некоторые исследования дублируются из-за недостаточной осведомленности их авторов об уже представленных в научной литературе результатах. Строгое сравнение результатов затруднительно, так как об условиях проведения экспериментов в открытых источниках приводится отрывочная информация.

Целью настоящей работы является снижение расхода дизельного топлива и концентрации монооксида углерода в отработавших газах посредством воздействия постоянного магнитного поля на поток топлива в интервале индукции магнитного поля 0,10–0,25 Тл и линейной скорости потока 0,15–1,1 м/с при трехкратном пересечении топливом активных зон.

Методы и материалы (Methods and materials)

Основными параметрами воздействия постоянного магнитного поля на поток жидкости (магнитной обработки), оказывающими влияние на ее эффективность, являются: магнитная индукция, скорость потока в активной зоне, количество пересечений магнитного поля, величина активного зазора, а также температура среды. На практике значение магнитной индукции изменяют от 0,05 Тл до 1,3 Тл. Величина зазора колеблется от 3 до 20 мм, количество активных зон — от 2 до 4. Скорость пересечения жидкости активного зазора составляет от десятых до сотых доли метра до нескольких метров в секунду. Соответственно время пребывания в активном зазоре может изменяться от долей секунд, до нескольких минут. Важным моментом является условие перпендикулярного пересечения линий магнитного поля и направления потока жидкости.

В настоящее время, ввиду дефицита современных отечественных судовых дизелей, получила распространение практика конвертирования автотракторных дизелей в судовые, в том числе

двигателей КАМАЗ. Конвертирование производится на судоремонтных заводах по технологии, одобренной Российским морским регистром судоходства и Российским речным регистром. Экспериментальные исследования влияния магнитной обработки дизельного топлива на показатели работы двигателя проводили на испытательном стенде КИ-5540 М, оборудованном двигателем КАМАЗ-740 при следующих условиях: скорость вращения коленчатого вала 2200–2300 мин⁻¹, нагрузка на двигатель 386,9–369,1 Н·м. Физико-химические свойства дизельного топлива приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства дизельного топлива

№ п. п.	Наименование	Значение
1	Плотность, кг/м ³	849
2	Температура воспламенения, °С	72
3	Цетановое число	54
4	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,22
5	Фракционный состав, выкипает при, °С:	
	Начало кипения	184
	10 % об.	218
	20 % об.	238
	50 % об.	284
	96 % об.	357
	Конец кипения	362
6	Кислотность, мг/ КОН на 100 см ³ топлива	3,2
7	Коксуемость 10 % остатка, % мас.	0,028
8	Содержание серы, % мас.	0,44
9	Цвет в единицах ЦНТ	2,0

Для магнитной обработки использовали трехсекционный магнетизатор — электромагнитный туннель [18], который был установлен на входе в насос высокого давления. Индукцию магнитного поля изменяли путем регулирования силы тока через обмотку электромагнитного туннеля, линейную скорость потока в активном зазоре — изменением сечения диаметра топливопровода.

Для определения оптимальных параметров магнитной обработки был применен *метод математического планирования эксперимента по схеме ортогонального плана второго порядка*. Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования приведены в табл. 2, в табл. 3 приведена матрица планирования ортогонального плана второго порядка.

В качестве параметров оптимизации были выбраны расход топлива и содержание монооксида углерода в выхлопных газах. Расход топлива измеряли объемный методом, с точностью до одной сотой дм³/ч. Содержание монооксида углерода в отработавших газах определяли с помощью газоанализатора Автотест-02.02.П с погрешностью измерения 3 % отн. Каждое измерение проводили не менее трех раз. Результат определяли как среднее арифметическое трех измерений.

Таблица 2

Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования

Факторы	Индукция магнитного поля, Тл	Скорость потока через магнитное поле, м/с
Обозначение в безразмерной системе координат X_i	X_i	X_2
Нижний уровень (-1)	0,10	0,15
Основной уровень (0)	0,175	0,61
Верхний уровень (+1)	0,25	1,08
Интервал варьирования ΔX_i	0,075	0,465

Таблица 3

Матрица планирования ортогонального плана второго порядка

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$X_1^2-2/3$	$X_2^2-2/3$
1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3
2	+1	+1	-1	-1	1/3	1/3
3	+1	-1	+1	-1	1/3	1/3
4	+1	+1	+1	+1	1/3	1/3
5	+1	+1	0	0	1/3	-2/3
6	+1	-1	0	0	1/3	-2/3
7	+1	0	+1	0	-2/3	1/3
8	+1	0	-1	0	-2/3	1/3
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3

Результаты (Results)

Экспериментальные исследования влияния параметров магнитной обработки (магнитной индукции и линейной скорости потока через активный зазор) в соответствии с планом (см. табл. 3) показали результаты, приведенные в табл. 4. После отсева незначимых коэффициентов по критерию Стьюдента получили уравнение регрессии второго порядка:

$$Y_p = 26,56 - 0,15X_2 - 0,14X_1X_2 + 0,28X_1^2 + 0,53X_2^2. \quad (1)$$

Для определения условий минимального значения расхода топлива (Y_{\min}) был найден центр поверхности отклика. Координаты центра S следующие:

$$\partial Y_p / \partial X_1 = -0,14X_2 + 0,56X_1 = 0; \quad (2)$$

$$\partial Y_p / \partial X_2 = -0,15 - 0,14X_1 + 1,06X_2 = 0. \quad (3)$$

Таким образом, $X_{1S} = 0,037$ и $X_{2S} = 0,146$.

Таблица 4

Результаты экспериментов по оптимизации режима магнитной обработки по критерию расхода топлива

Номер опыта	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	Y_{icp}	Y_{ip}	$(Y_{icp} - Y_{ip})^2$
1	27,3	27,1	27,3	27,2	27,4	0,023
2	27,8	27,8	28,0	27,9	27,5	0,044
3	27,1	27,1	27,3	27,2	27,4	0,032
4	27,2	27,3	27,3	27,3	27,1	0,032
5	26,6	26,7	26,7	26,7	26,8	0,036
6	26,8	27,0	27,2	27,0	26,8	0,023
7	26,9	27,0	26,9	27,0	26,9	0,000
8	26,9	27,1	27,5	27,2	27,2	0,003
9	26,7	26,5	26,7	26,6	26,6	0,004

$Y_{i1}-Y_{i3}$ — результаты параллельных определений расхода топлива, $dm^3/ч$;

Y_{icp} — среднее арифметические значения расхода топлива, $dm^3/ч$;

Y_{ip} — расчетные значения расхода топлива, $dm^3/ч$.

Поверхность отклика — это эллиптический параболоид с минимумом в точке S . В сечениях поверхности плоскостями $Y = const$ наблюдаются эллипсы (изолинии расхода топлива) с поворотом осей координат вследствие наличия эффекта взаимодействия X_1X_2 (рис. 1).

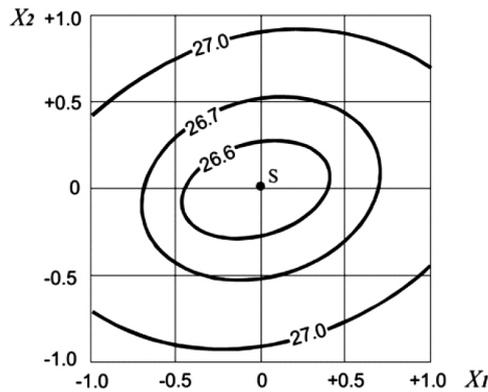


Рис. 1. Изолинии расхода дизельного топлива:
 X_1 — фактор магнитной индукции;
 X_2 — фактор скорости потока через магнитное поле

Расход топлива при оптимальных условиях ($Y_{pS} = 26,6$ дм³/ч) соответствует 5 % экономии топлива по сравнению с расходом необработанного топлива. Значение исследуемых факторов в натуральном масштабе составляет 0,18 Тл и 0,7 м/с. Аналогичным образом изучено влияние указанных факторов магнитной обработки на содержание СО в отработавших газах (параметр оптимизации). В табл. 2, 3 и 5 приведены, соответственно, основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования, матрица планирования ортогонального плана второго порядка и результаты экспериментов. Содержание монооксида углерода в отработавших газах необработанного дизельного топлива составило 1,71 % об.

Таблица 5

Результаты экспериментов по оптимизации режима магнитной обработки по критерию содержания монооксида углерода в отработавших газах

Номер опыта	Z_{i1}	Z_{i2}	Z_{i3}	Z_{cpi}	Z_{pi}	$(Z_{cpi} - Z_{pi})^2$
1	1,62	1,54	1,42	1,53	1,61	0,0068
2	1,81	1,98	1,77	1,85	1,76	0,0091
3	1,64	1,43	1,49	1,52	1,60	0,0067
4	1,44	1,69	1,52	1,55	1,45	0,0093
5	1,25	1,04	1,15	1,15	1,24	0,0094
6	1,21	1,30	1,43	1,31	1,24	0,0049
7	1,38	1,17	1,25	1,27	1,28	0,0002
8	1,53	1,31	1,43	1,42	1,44	0,0002
9	1,01	0,92	1,13	1,02	1,00	0,0007

После отсева незначимых коэффициентов по критерию Стьюдента получили уравнение регрессии второго порядка:

$$Z_{cp} = 0,998 - 0,078X_2 - 0,074X_1X_2 + 0,247X_1^2 + 0,362X_2^2. \quad (4)$$

Для определения условия минимального значения расхода топлива ($Z_{мин}$) был найден центр поверхности отклика (рис. 2). Координаты центра S следующие:

$$\partial Z_p / \partial X_1 = -0,074X_2 + 0,494X_1 = 0; \quad (5)$$

$$\partial Z_p / \partial X_2 = -0,078 - 0,074X_1 + 0,724X_2 = 0. \quad (6)$$

Таким образом, $X_{1S} = 0,026$ и $X_{2S} = 0,174$.

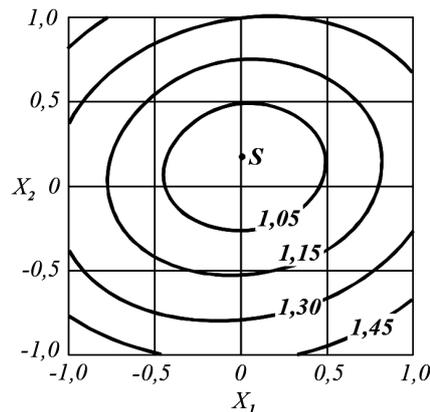


Рис. 2. Изолинии содержания монооксида углерода в выхлопных газах:

X_1 — фактор магнитной индукции;
 X_2 — фактор скорости потока через магнитное поле

Как и в предыдущем случае, поверхность отклика является эллиптическим параболоидом с минимумом в точке S с поворотом осей координат вследствие наличия эффекта взаимодействия X_1X_2 (см. рис. 2). При оптимальных условиях магнитной обработки ($Z_{pS} = 1,00$ % об.) содержание монооксида углерода снижается в 1,7 раза по сравнению с тем же показателем для необработанного топлива. Значение исследуемых факторов в натуральном масштабе составляет 0,18 Тл и 0,7 м/с.

Обсуждение (Discussion)

Для объяснения влияния постоянного магнитного поля на нефтяные системы и, в частности, на топливо, существует практически единая точка зрения: магнитная обработка снижает плотность, вязкость, поверхностное натяжение и увеличивает степень дисперсности дизельного топлива. Так, например, авторы публикации [2] наблюдали снижение плотности топлива после магнитной обработки с 826,44 до 824,67 кг/м³, а теплота сгорания увеличивалась с 42223,52 до 42408,55 кДж/кг. Уменьшение поверхностного натяжения достигает 10 % [15], что, в свою очередь, приводит к образованию более мелких капель в топливовоздушной смеси, облегчает процессы распада топливных струй, испарения капель топлива, их смесеобразование с горячей и движущейся газовой средой, способствуя более полному горению топливно-воздушной смеси. В результате снижаются расход топлива и выброс продуктов неполного сжигания: монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

При рассмотрении механизма действия постоянного магнитного поля основное противоречие заключается в том, что в одних работах нефтепродукты рассматриваются как зарядовые коллоидные системы, в других — как нефтяные дисперсные системы (НДС), где межмолекулярные взаимодействия (ММВ) определяются обменными взаимодействиями между нейтральными частицами-радикалами или радикалполяризованными частицами. Так, например, полярно-зарядовый подход использован в работе, авторы которой [16] считают, что в дизельном топливе имеются полярные компоненты, подверженные при движении в постоянном магнитном поле силе Лоренца. Действие этой силы, как известно, направлено перпендикулярно вектору движения заряженной частицы по правилу Ленца. В результате плотные группы молекул (кластеры) разделяются на более мелкие и упорядоченные фрагменты. Явлением ионизации топлива объясняют в работах [3], [17] повышение эффективности сжигания топлива, его экономию и снижение выбросов в окружающую среду. Однако известно, что нефтепродукты, в частности дизельные топлива, состоят из углеводородных молекул, преимущественно содержащих длинные алифатические цепи. Эти молекулы нейтральны, а связи в них являются ковалентными, а не ионными, т. е. не имеющими зарядов. Отсутствие ионов или зарядово-полярных молекул в нефтяных системах доказано прямыми измерениями диэлектрической проницаемости и опытам по электрофорезу [19]. Таким

образом, постоянное магнитное поле в интервале применяемых магнитных индукций не влияет на молекулы топлива через силу Лоренца и не разрывает их на ионы.

Более обоснован механизм, согласно которому нефтяные топлива представляют собой сложную многокомпонентную нефтяную систему, проявляющую коллоидно-дисперсные свойства. Дисперсная фаза такой системы состоит из ядра, содержащего высокомолекулярные парафины и парамагнитные молекулы смол, адсорбированные на их поверхности. Парамагнетизм молекул обусловлен нескомпенсированными спинами электронов, что, в свою очередь, делает эти молекулы «чувствительными» к внешнему магнитному полю. Для средних нефтяных дистиллятов число парамагнитных центров оценивается в интервале 10^{15} – 10^{16} спин/г, наличие гетероатомов и микроэлементов усиливает квантово-механические эффекты, так как большинство из них имеют значительное количество неспаренных электронов. Ядро дисперсной фазы окружено оболочкой, слои которой, по мере удаления от ядра, становятся менее парамагнитными, а силы межмолекулярного взаимодействия с ядром дисперсной частицы ослабевают. Дисперсионная среда образована из диамагнитных молекул [19].

Парамагнитные молекулы (их неспаренные спины) ориентируются во внешнем магнитном поле в направлении вектора поля. В постоянном магнитном поле это приводит к изменению взаимного расположения молекул из-за поворотов, деформации ассоциатов дисперсной фазы с потерей части внешних слоев и перехода их в дисперсионную среду. В результате такой перестройки возникает более упорядоченная сильно коррелированная организация дисперсной структуры с меньшими размерами частиц дисперсной фазы. Воздействие постоянного магнитного поля «фиксирует» новую структуру НДС, характеризующуюся большей гомогенностью и парамагнитной активностью, меньшей вязкостью и поверхностным натяжением.

Заключение (Conclusion)

На основе экспериментальных исследований воздействия постоянным магнитным полем на поток дизельного топлива (0,1–0,25 Тл и 0,5–1,08 м/с) на стандартном стендовом двигателе с целью уменьшения расхода топлива и содержания монооксида углерода в отработавших газах получены следующие результаты:

1. Установлены оптимальные параметры магнитной обработки топлива перед подачей в дизельный двигатель по критериям минимального расхода топлива и содержания монооксида углерода в отработавших газах: индукция магнитного поля — 0,18 Тл, скорость потока в активном зазоре — 0,7 м/с.
2. Показано, что в результате магнитной обработки дизельного топлива при оптимальных условиях расход топлива уменьшается на 5 %, концентрация монооксида углерода в отработавших газах — в 1,7 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каленченко М. М. Экономическая эффективность использования российского рыбопромыслового флота в Баренцевом море / М. М. Каленченко, А. Н. Козловский, В. В. Шевченко; под ред. Е. Д. Красновой, В. А. Спиридонова и К. А. Згуровского. — М., 2007. — 53 с.
2. Ugare V. Performance of internal combustion (CI) engine under the influence of strong permanent magnetic field / V. Ugare, A. Dhoble, S. Lutade, K. Mudafale // Journal of Mechanical and Civil Engineering. — 2014. — Vol. 3. — Pp. 11–17.
3. Srinivas P. S. L. D. Performance and emission analysis of VCR diesel engine through fuel ionization under the influence of magnetic field / P. S.L.D Srinivas, A. R. Krishna, N. B. Dunna, A. S. V. Prasad // International journal of research. — 2018. — Vol. 7. — Is. VI. — Pp. 106–114.
4. Bhurat S. S. Magnetization of Diesel fuel for Compression Ignition Engine to Enhance Efficiency and Emissions / S. S. Bhurat, H. Sharma, A. K. Jha, K. K., Dixit, P. Shukla, R. Kunwer // International Journal of Applied Engineering Research. — 2018. — Vol. 13. — № 6. — Pp. 341–347.
5. Kurji H. J. Magnetic field effect on compression ignition engine performance / H. J. Kurji, M. S. Imran // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2018. — Vol. 13. — No. 12. — Pp. 3943–3949.
6. Gad M. S. Influence of magnetized waste cooking oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine / M. S. Gad // International Journal of ChemTech Research. — 2018. — Vol. 11. — No. 11. — Pp. 255–267.

7. Jain S. Experimental investigation of magnetic fuel conditioner (MFC) in IC engine / S. Jain, S. Deshmukh // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). — 2012. — Vol. 2. — Is. 7. — Pp. 27–31.
8. Asthana A. Performance Evaluation of Sustainable Flow Motor stems Magnets on Fuel Consumption and Engine Emissions in IC Engines / A. Asthana. — Sheffield Hallam University, 2017. — 13 p.
9. Patel P. M. Effect of magnetic field on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine / P. M. Patel, G. P. Rathod, T. M. Patel // IOSR Journal of Engineering. — 2014. — Vol. 4. — Is. 5. — Pp. 28–34.
10. Arias Gilart R. Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible / R. Arias Gilart, M. Berenguer Ungaro, V. Nigorenko, A. José, Y. Silveira Font, C. E. Alfaro Rodríguez // Centro Azúcar. — 2018. — Vol. 45. — No. 1. — Pp. 21–31.
11. Arias Gilart R. Effect of different treatments with static magnetic fields on diésel fuel combustion / R. Arias Gilart, U. M. Berenguer, R. C. Alfaro, H. J. Falcón, S. M. Campos // 63-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 25-летию Астраханского государственного технического университета; 22–26 апреля 2019 года [Электронный ресурс] № ГР 0321902695 Секции: «Химия и химическая технология» astu.org>Content/Page/5833.
12. Пивоварова Н. А. Магнитные технологии добычи и переработки углеводородного сырья / Н. А. Пивоварова. — М.: ООО «Газпромэкспо», 2009. — 120 с.
13. Пивоварова Н. А. Эффективные магнитные технологии для промышленной подготовки и транспортировки нефти и газа / Н. А. Пивоварова // Нефть. Газ, Новации. — 2018. — № 5. — С. 13–18.
14. Ciobanu R. System with permanent magnets used for magnetic treatment of fuel fluids / R. Ciobanu, O. Dontu, G. Gheorghe, Iu. Avarvarei, D. Besnea // Proceedings of International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development – MECANITECH'11. — 2011. — Vol. 3. — Pp. 211–214.
15. Магнитная обработка углеводородного топлива. Индукционный катализатор [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://wl-tech.ru/?page_id=10 (дата обращения: 01.09.2019).
16. Погорлецкий Д. С. Перспективы магнитной обработки углеводородных топлив на автотранспорте / Д. С. Погорлецкий, А. Б. Малыгин, А. В. Котыло // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. — 2013. — № 3. — С. 58–65.
17. Pat. 5271369 US, IPC F02B51/04; F02B77/04; F02M27/04. Fuel conditioning system for internal combustion engines / J.V. Melendrez. — № US19920820410; appl. 26.07.1990; publ. 21.12.1993.
18. Пат. 2167824 Российская Федерация, МПК C02F1/48. Магнитный туннель / Р. Велес Парра, Н. А. Пивоварова; заяв. и патентообл. Астраханский государственный технический университет. — № 98104229/12; завл. 05.03.1998; опубл. 27.05.2001, Бюл. №15.
19. Унгер Ф. Г. Фундаментальные и прикладные результаты исследования нефтяных дисперсных систем / Ф. Г. Унгер. — Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2011. — 264 с.

REFERENCES

1. Kalenchenko, M. M., A. N. Kozlovskiy, and V. V. Shevchenko. *Ekonomicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya rossiyskogo rybopro-myslovogo flota v Barentsevom more*. Edited by Ye.D. Krasnovoy, V.A. Spiridonova, and K.A. Zgurovskogo. M., 2007.
2. Ugare, Vivek, Ashwin Dhoble, Sandeep Lutade, and Krunal Mudafale. “Performance of internal combustion (CI) engine under the influence of strong permanent magnetic field.” *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 3 (2014): 11–17.
3. Srinivas, Pitchuka SLD, A. Rama Krishna, Narendra Babu Dunna, and Adina S V Prasad. “Performance and emission analysis of VCR diesel engine through fuel ionization under the influence of magnetic field.” *International journal of research* 7.VI (2018): 106–114.
4. Bhurat, Swapnil Sureshchandra, Himanshu Sharma, Amrit Kumar Jha, Krishna Kant Dixit, Prashant Shukla, and Ram Kunwer. “Magnetization of Diesel fuel for Compression Ignition Engine to Enhance Efficiency and Emissions.” *International Journal of Applied Engineering Research* 13.6 (2018): 341–347.
5. Kurji, Hayder J., and Murtdha S. Imran. “Magnetic field effect on compression ignition engine performance.” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 13.12 (2018): 3943–3949.
6. Gad, M. S. “Influence of magnetized waste cooking oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine.” *International Journal of ChemTech Research* 11.11 (2018): 255–267.

7. Jain, Shweta, and Suhas Deshmukh. "Experimental investigation of magnetic fuel conditioner (MFC) in IC engine." *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)* 2.7 (2012): 27–31.
8. Abhishek, Asthana. *Performance Evaluation of Sustainable Flow Motor stems Magnets on Fuel Consumption and Engine Emissions in IC Engines*. Sheffield Hallam University, 2017.
9. Patel, Piyush M., Gaurav P. Rathod, and Tushar M. Patel. "Effect of magnetic field on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine." *IOSR Journal of Engineering* 4.5 (2014): 28–34.
10. Arias Gilart, Ramón, Mónica Berenguer Ungaro, José A. Vázquez Nigorenko, Yadira Silveira Font, and Carlos E. Alfaro Rodríguez. "Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible." *Centro Azúcar* 45.1 (2018): 21–31.
11. Arias Gilart, R., U. M. Berenguer, R. C. Alfaro, H. J. Falcón, and S. M. Campos. "Effect of different treatments with static magnetic fields on diesel fuel combustion." *63-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, posvyashchennaya 25-letiyu Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Astrakhan', 2019.
12. Pivovarova, N. A. *Magnetic technologies of extraction and processing of hydrocarbon raw materials*. M.: OOO Gazpromexpo, 2009.
13. Pivovarova, N. A. "Effective Magnetic Procedures for In-field Oil and Gas Treatment and Transportation." *OIL. GAZ. Novation* 5 (2018): 13–18.
14. Ciobanu, Robert, Octavin Dontu, Gheorghe Gheorghe, Iulian Avarvarei, and Daniel Besnea. "System with permanent magnets used for magnetic treatment of fuel fluids." *Proceedings of International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development – МЕСАHITECH'II*. Vol 3. 2011. 211–214.
15. Russian New Innovative Company, Ltd. Web. 1 Sept. 2019 <http://wl-tech.ru/?page_id=10>.
16. Pogorletskiy, D. S., A. B. Malygin, and A. V. Kotylo. "Perspektivy magnitnoy obrabotki uglevodorodnykh topliv na avtotransporte." *Visnik Donets'koi akademii avtomobil'nogo transportu* 3 (2013): 58–65.
17. Melendrez, Julian B. US5271369, IPC F02B51/04; F02B77/04; F02M27/04. Fuel conditioning system for internal combustion engines. US, assignee. Publ. 21 December 1993.
18. Veles Parra, R., and N.A. Pivovarova. RU 2 167 824 C02, IPC C02F1/48. Magnitnyy tunnel. Russian Federation, assignee. Publ. 27 May 2001.
19. Unger, F. G. *Fundamental'nye i prikladnye rezul'taty issledovaniya neftyanykh dispersnykh sistem*. Ufa: Izd-vo GUP INKHP RB, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пивоварова Надежда Анатольевна —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: nadpivov@live.ru

Дорохов Александр Фёдорович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: dorokhovaf@rambler.ru

Велес Парра Рикардо —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: ric_velez@hotmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pivovarova, Nadezhda A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414025,
Russian Federation
e-mail: nadpivov@live.ru

Dorokhov, Aleksandr F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414025,
Russian Federation
e-mail: dorokhovaf@rambler.ru

Velez Parra, Rikardo —
PhD
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414025,
Russian Federation
e-mail: ric_velez@hotmail.com

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2019 г.
Received: September 3, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958

SHIP COMBINED PROPULSION PLANTS: PURPOSE, COMPOSITION, CLASSIFICATION

A. V. Grigoryev^{1,2}, S. M. Malyshev^{2,3}, R. R. Zaynullin³

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

Combined propulsion plants that are widely used on the modern ships of foreign and domestic construction are considered. A distinctive feature of such plants is that the energy inside them for the ship movement is generated in two (or more) different types of ship engines – heat engines and electric motors, working for a common propulsor. Such plants are complex electromechanical systems designed to provide movement in the various modes of the ship operation and the electric energy production in the mode of economic speed or in the harbor mode. Combined propulsion plants conjoin the advantages of traditional propulsion systems with heat main engines and electric propulsion plants. Modern combined propulsion plants are characterized by a wide variety of schematic solutions, types of equipment and operating modes. Nowadays there is no definition of a combined propulsion plant in Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships of Russian Maritime Register of Shipping and in the other normative documents. Therefore a new task to define the requirements to their composition and to introduce new principles of their classification has appeared. Comparative analysis of terms and definitions, schematic solutions and equipment composition of ship propulsion plants including combined ones is carried out in the paper. New term for combined propulsion plants and their classification by the method of torque transfer to propeller are offered in the paper. It is shown that one of the main features by which the plants should be classified is the method of transmitting torque to the propeller. According to the type of torque transmission to the propeller, combined propulsion plants can be divided into plants with direct transmission of torque to the propeller, plants with a drop reduction gear and plants with azimuth thrusters.

Keywords: combined propulsion plant, heat main engine, electric propulsion motor, electric propulsion plant, reduction gear, shaft line, propeller, propulsor, operating mode.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.

УДК 621.315:621.3.025

СУДОВЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОПУЛЬСИВНЫЕ УСТАНОВКИ: НАЗНАЧЕНИЕ, СОСТАВ, КЛАССИФИКАЦИЯ

А. В. Григорьев^{1,2}, С. М. Малышев^{2,3}, Р. Р. Зайнуллин³

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — АО «НПП «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены комбинированные пропульсивные установки, которые находят все более широкое применение на современных судах зарубежной и отечественной постройки. Отличительной особенностью таких установок является то, что энергия для движения судна в них вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических, работающих на общий движитель.

Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения в различных режимах эксплуатации судна и производства электроэнергии в режиме экономичного хода или при стоянке. Комбинированные пропульсивные установки сочетают в себе достоинства традиционных пропульсивных установок с тепловыми главными двигателями и гребных электрических установок. Современные комбинированные пропульсивные установки характеризуются большим многообразием схмотехнических решений, типов оборудования и режимов эксплуатации. В настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства и другой нормативной документации определение комбинированных пропульсивных установок отсутствует. В связи с этим появляется задача определения требований к их составу и введения принципов классификации. В статье выполнен сравнительный анализ имеющихся терминов и определений, схмотехнических решений и состава оборудования судовых пропульсивных установок, включая комбинированные. Предложен новый термин для комбинированных пропульсивных установок. Показано, что одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт. По типу передачи вращающего момента на движитель комбинированные пропульсивные установки можно разделить на установки с прямой передачей вращающего момента на гребной винт, установки с понижающим редуктором и установки с винто-рулевыми колонками.

Ключевые слова: комбинированная пропульсивная установка, тепловой главный двигатель, гребной электродвигатель, гребная электрическая установка, редуктор, валопровод, гребной винт, движитель, режим эксплуатации.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав, классификация / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.

Введение (Introduction)

Комбинированные пропульсивные установки (КПУ) находят все более широкое применение на судах российской и зарубежной постройки различного назначения [1], [2]. Они сочетают в себе достоинства пропульсивных установок на базе тепловых главных двигателей и гребных электрических установок (ГЭУ), что позволяет судну работать с высокими технико-экономическими показателями в различных режимах эксплуатации [3], [4].

КПУ является установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух или более разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических. Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения в различных режимах эксплуатации судна и производства электроэнергии в режиме экономичного хода или при стоянке. КПУ отличает большое многообразие схмотехнических решений, состава оборудования и режимов работы. В связи с тем, что в настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» (далее — Правила Регистра) Российского морского регистра судоходства (РМРС) и другой нормативной документации отсутствует определение КПУ [5]–[8], необходимо дать определение этих установок, определить их состав и ввести классификацию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пропульсивной установкой (ПУ) называют комплекс механизмов и устройств, предназначенный для обеспечения движения судна. Судовая ПУ состоит из движителя, валопровода, главных судовых передач, главных тепловых или гребных электрических двигателей. На судах находят применение ПУ различных типов. Наибольшее распространение в настоящее время находят пропульсивные установки с главными тепловыми двигателями. Широкое распространение получили судовые системы электродвижения (СЭД). Этим пропульсивным установкам присущи достоинства и недостатки, которые определяют их область применения [9], [10].

Стремление сочетать достоинства пропульсивных установок разных типов стимулировало создание комбинированных (гибридных) пропульсивных установок. В Правилах Регистра дано следующее определение: «Пропульсивная установка — комплекс механизмов и устройств, пред-

назначенный для выработки, преобразования и передачи энергии, обеспечивающей движение судна на всех спецификационных режимах хода, и состоящий из движителей, валопроводов, главных судовых передач и главных двигателей, в том числе гребных электродвигателей» [5, с. 7], откуда видно, что в состав ПУ в качестве главного двигателя (ГД) может входить гребной электродвигатель (ГЭД). В то же время ГЭД входит в состав ГЭУ. Правила Регистра содержат следующее определение ГЭУ: «Гребная электрическая установка (ГЭУ) — комплекс оборудования для распределения и преобразования электрической энергии в механическую с целью воспроизведения заданного упора одним гребным движителем» [6, с. 113].

Структурные схемы судовых ПУ представлены на рис. 1. В состав традиционной ПУ с тепловым двигателем (см. рис. 1, а) входят: тепловой главный двигатель, валопровод, гребной винт. В состав ПУ на базе ГЭД входят: ГЭД, валопровод, гребной винт (см. рис. 1, б). В составе ГЭУ помимо ПУ входит полупроводниковые преобразователи, силовые трансформаторы и другое электротехническое оборудование [11]–[13]. Судовая КПУ, приведенная на рис. 1, в, включает в себя тепловой ГД, ГЭД, редуктор, валопровод и гребной винт. Все ПУ по типу главных двигателей можно разделить на установки с тепловыми главными двигателями, установки с ГЭД и комбинированные пропульсивные установки, где в качестве главных двигателей применяются как тепловые двигатели, так и ГЭД.

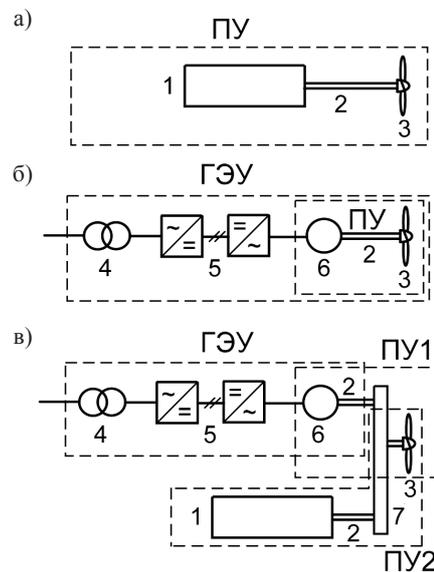


Рис. 1. Структурные схемы ПУ: а — на базе теплового ГД; б — на базе ГЭД; в — КПУ: 1 — тепловой ГД; 2 — валопровод; 3 — гребной винт; 4 — трансформатор; 5 — преобразователь частоты; 6 — ГЭД; 7 — редуктор

Классификация ПУ по типу главного двигателя представлена на рис. 2.

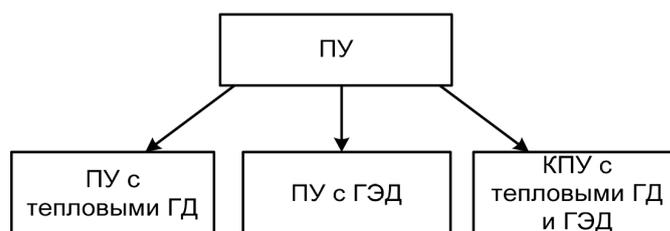


Рис. 2. Классификация пропульсивных установок по типу главного двигателя

В качестве тепловых двигателей в ПУ могут применяться дизель, газодизель, газовая или паровая турбина, в качестве ГЭД — электрические машины переменного или постоянного

тока. В качестве движителя используется гребной винт фиксированного или регулируемого шага (ВФШ, ВРШ), винто-рулевая колонка (ВРК) и другие типы движителей. Для соединения турбин и среднеоборотных дизелей с гребным винтом применяются понижающие редукторы. По количеству главных двигателей, работающих на один движитель, пропульсивные установки можно разделить на одномашинные и многомашинные. В многомашинных пропульсивных установках могут применяться как тепловые главные двигатели, так и ГЭД. Если одновременно в составе одной пропульсивной установки используется тепловой главный двигатель и ГЭД, работающие на общий движитель, то такая установка является КПУ. Структурные схемы одно-вальных многомашинных пропульсивных установок с тепловыми главными двигателями приведены на рис. 3.

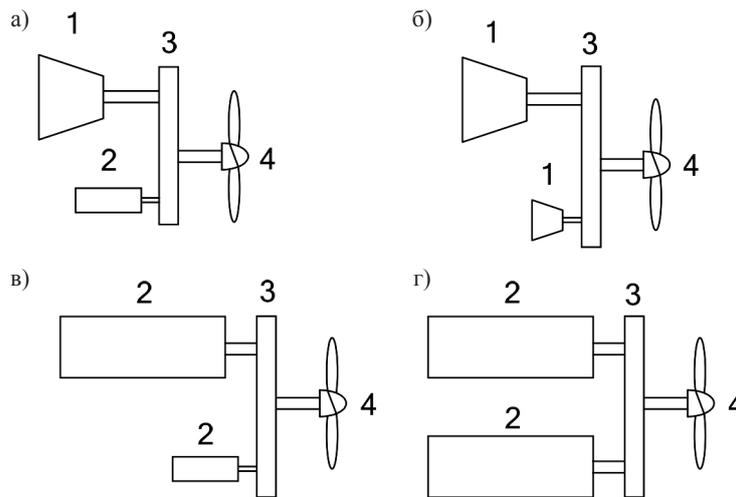


Рис. 3. Структурные схемы одновальных многомашинных пропульсивных установок с главными тепловыми двигателями:
1 — турбина; 2 — дизель; 3 — понижающий редуктор; 4 — гребной винт

В одновальных многомашинных пропульсивных установках на базе тепловых двигателей два или более тепловых двигателя работают на общий гребной винт. Как правило, сочленение тепловых главных двигателей происходит с помощью редуктора. В одновальных многомашинных пропульсивных установках в качестве главных двигателей могут применяться одностепенные двигатели одинаковой или разной мощности либо тепловые двигатели в разных сочетаниях: *дизель – газовая турбина, дизель – паровая турбина, паровая и газовая турбина*. В технической литературе пропульсивные установки с разнотипными тепловыми двигателями, работающими на общий движитель, также получили название *комбинированных пропульсивных установок* [11], [14], [15].

Судовые пропульсивные установки можно классифицировать по количеству движителей (гребных валов) на одновальные и многовальные. В состав многовальных пропульсивных установок могут входить как одностепенные, так и разнотипные тепловые двигатели. Многовальные пропульсивные установки могут быть построены на базе многомашинных агрегатов с несколькими двигателями, работающими на общий движитель. В последние годы на судах получили применение многовальные пропульсивные установки, в которых для привода гребного винта применяются как тепловые ГД, так и ГЭД, работающие каждый на свой движитель. Как правило, количество гребных валов на таких судах не менее трех. Структурные схемы многовальных пропульсивных установок с ГД и ГЭД приведены на рис. 4. В связи с тем, что в многовальных ПУ, представленных на рисунке, отсутствует механическая связь между тепловым ГД и ГЭД, при этом каждый двигатель работает на свой движитель, данный тип пропульсивных установок авторы настоящей работы не относят к КПУ.

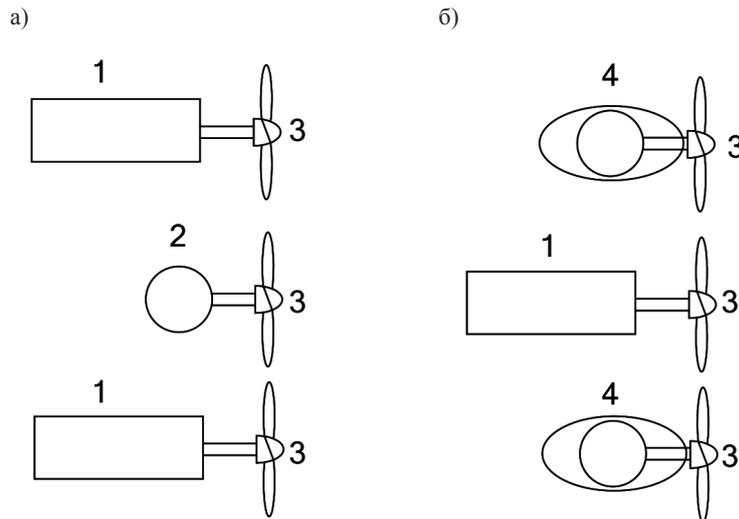


Рис. 4. Структурные схемы многовальных пропульсивных установок с ГД и ГЭД:
 1 — тепловой ГД; 2 — ГЭД; 3 — гребной винт; 4 — электрическая ВРК

Структурные схемы КПУ представлены на рис. 5.

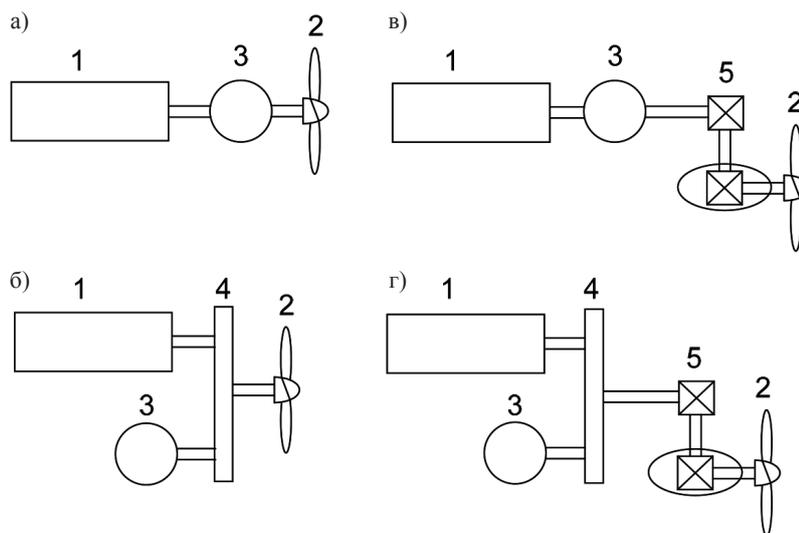


Рис. 5. Структурные схемы КПУ: 1 — тепловой ГД; 2 — гребной винт;
 3 — ГЭД; 4 — понижающий редуктор; 5 — механическая ВРК

В состав КПУ установки входят: движитель (гребной винт, винто-рулевая колонка и др.), гребной валопровод, главная судовая передача (редуктор, муфта и др.), главный тепловой двигатель (дизель, турбина, газодизель), гребной электродвигатель.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Проведенный анализ схмотехнических решений и состава КПУ предполагает введение нового термина и его определения: «комбинированная пропульсивная установка — это пропульсивная установка, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, соединенных механической связью и работающих на общий движитель». Принципиальным для предлагаемого определения КПУ является наличие двух или более главных двигателей с разными физическими принципами действия — тепловых и электрических, работающих на общую нагрузку (движитель).

Классификация КПУ может быть выполнена по ряду признаков, в том числе по типу движителя, главного теплового двигателя или ГЭД, режимам эксплуатации и другим признакам. Выполненный анализ структурных схем современных КПУ показывает, что одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт и тип движителя [14]–[16].

По типу передачи вращающего момента на движитель и типа движителя КПУ можно разделить следующим образом:

- КПУ с прямой передачей вращающего момента на гребной винт;
- КПУ с понижающими редукторами;
- КПУ с ВРК.

Классификация КПУ по типу передачи вращающего момента на движитель представлена на рис. 6.

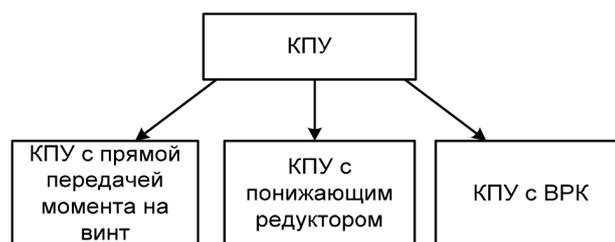


Рис. 6. Классификация КПУ по типу передачи вращающего момента на движитель

Выводы (Summary)

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Комбинированные пропульсивные установки находят все более широкое применение на судах российской и зарубежной постройки различного назначения. КПУ является пропульсивной установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях — тепловых и электрических.

2. В связи с тем, что в настоящее время в «Правилах классификации и постройки морских судов» РМРС и другой нормативной документации отсутствует определение КПУ, предлагается ввести новый термин «комбинированная пропульсивная установка» и дать его определение.

3. Классификация КПУ может быть выполнена по ряду признаков, в том числе по типу движителя, типу главного теплового двигателя или ГЭД, режимам эксплуатации и другим признакам. Одним из основных признаков, по которым следует классифицировать данные установки, является способ передачи вращающего момента на винт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные комплексы нового поколения / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 49–50.
2. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.
3. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2013. — № 2. — С. 50–52.
4. Хватов О. С. Математическая модель судовой гибридной пропульсивной установки / О. С. Хватов, О. А. Бурмакин, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2009. — № 27. — С. 150–154.
5. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. VII. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 81 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. XI. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 231 с.

7. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — Ч. IV. — 357 с.
8. Руководство по техническому наблюдению за постройкой судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019.
9. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. — 175 с.
10. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. П. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 36–38.
11. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // Электротехника і Електромеханіка. — 2017. — № 2. — С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
12. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
13. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // Energy Conversion and Management. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
14. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // Energy Procedia. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
15. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
16. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 117. — Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Sudovye kombinirovannye propul’sivnye komplekсы novogo pokoleniya.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 49–50.
2. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 35 (2013): 337–340.
3. Grigoryev, A. V. “Sudovye kombinirovannye propul’sivnye ustanovki.” *Morskoy flot* 2 (2013): 50–52.
4. Khvatov, O. S., O. A. Burmakin, and I. A. Tarpanov. “Mathematical model of ship hybrid propulsive installations.” *Vestnik volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 27 (2009): 150–154.
5. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. VII. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2019.
6. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. XI. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2019.
7. *Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postroikoй sudov i izgotovleniem materialov i izdelii dlya sudov*. Chast’ IV. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.
8. *Guidelines on Technical Supervision of Ships under Construction*. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2019.
9. Grigoryev, A. V., and V. A. Petukhov. *Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratornyye ustanovki*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
10. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Sudovyye valogeneratornyye ustanovki novogo pokoleniya na baze obratimyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 36–38.
11. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *Elektrotehnika i Elektromehaniка* 2 (2017): 62–72.
12. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabriellii and Karin Andersson. “Optimal load allocation of complex ship power plants.” *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
13. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. “Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization.” *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.

14. 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.
15. 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.
16. Ling-Chin, J., and A. P. Roskilly. “Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective—A life cycle assessment case study.” *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.

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

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

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

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

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 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: malyshevsergey@list.ru

Zaynullin, Ruslan R. —
Head of Department
JSC “RPC “Ship electric propulsion”
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,
St. Petersburg, 197341, Russian Federation
e-mail: zaynullin@eds-marine.ru

Статья поступила в редакцию 1 октября 2019 г.
Received: October 1, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967

IMPROVING THE ACCURACY AND PERFORMANCE OF THE CURRENT LOOP BY INCREASING THE OPEN LOOP TRANSFER COEFFICIENT

E. V. Shiryaev, N. A. Ulisskiy

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

A method for reducing the static error in control and increase of the current loop performance in the control system of the electric drive by increasing the transfer coefficient of the open loop is considered. This is achieved by introducing a hard negative feedback loop. The resulting structure is stable at any arbitrarily large open loop transfer coefficient. The proposed method of increasing the open loop transfer coefficient does not change the structure of the control object, so when setting the current loop to the technical optimum, the structure of the current regulator also does not change. Two ways for increasing the open loop transfer coefficient are considered: reaching the hard negative feedback or link of armature winding or link of semiconducting converter. Expressions for static errors and time constants of the current loop are obtained for each way. A comparison of static errors and time constants of the circuit between the above options, as well as each option with a standard structural circuit of the current circuit is given. It is shown that the introduction of hard feedback into the current loop increases its performance and reduces the static error compared to the standard structural scheme of the current loop. In this case, the coverage by hard feedback of the link of armature winding of the motor gives less static error and higher performance than the coverage of the link of semiconducting converter.

Keywords: general transfer coefficient, static error, performance, technical optimum, hard feedback.

For citation:

Shiryaev, Eduard V., and Nikolay A. Ulisskiy. "Improving the accuracy and performance of the current loop by increasing the open loop transfer coefficient." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 959–967. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967.

УДК 621.3.072.1

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КОНТУРА ТОКА ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ РАЗОМКНУТОГО КОНТУРА

Э. В. Ширяев, Н. А. Улиссский

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

Рассмотрены способы уменьшения статической ошибки по управлению и увеличения быстродействия контура тока в системе управления электропривода путем неограниченного увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура, что достигается введением в контур тока жесткой отрицательной обратной связи. При этом возникающая структура устойчива при любом сколь угодно большом коэффициенте передачи разомкнутого контура. Предлагаемый способ увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура не меняет структуру объекта управления, поэтому при настройке контура тока на технический optimum структура регулятора тока также не изменяется. Рассмотрены два варианта увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура: охват жесткой отрицательной обратной связью либо звена обмотки якоря либо звена полупроводникового преобразователя. Для каждого варианта получены выражения для статических ошибок и постоянных времени контура тока. В качестве примера для заданных значений параметров двигателя постоянного тока и полупроводникового преобразователя выполнен расчет зависимостей показателей качества переходного процесса в контуре тока от значения коэффициента жесткой отрицательной обратной связи. Проведено сравнение статических ошибок и постоянных времени контура между рассмотренными вариантами и с вариантом, имеющим стандартную структурную схему контура тока. Показано, что введение жесткой обратной связи в контур тока увеличивает его быстродействие и уменьшает

статическую ошибку по сравнению со стандартной структурной схемой контура тока. При этом охват жесткой обратной связью звена обмотки якоря электродвигателя дает меньшую статическую ошибку и более высокое быстродействие, чем охват звена полупроводникового преобразователя.

Ключевые слова: общий коэффициент передачи, статическая ошибка, быстродействие, технический оптимум, жесткая обратная связь.

Для цитирования:

Ширяев Э. В. Повышение точности и быстродействия контура тока путем увеличения коэффициента передачи разомкнутого контура / Э. В. Ширяев, Н. А. Улисский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 959–967. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-959-967.

Введение (Introduction)

В теории построения систем управления электропривода широко распространена настройка на технический оптимум контуров регулирования переменных состояния электропривода. В большинстве случаев в качестве переменных состояния рассматривают ток (момент) и угловую скорость электродвигателя. В проведенном исследовании рассматривается повышение точности и быстродействия контура тока на примере двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, так как подход к синтезу регулятора тока одинаков для всех типов электродвигателей. Некоторым вопросам повышения качества переходных процессов в электроприводе посвящены работы [1]–[3].

При синтезе регулятора тока не учитывают внутреннюю отрицательную обратную связь электродвигателя по скорости, полагая, что электрические переходные процессы протекают гораздо быстрее механических, что приводит к появлению статической ошибки при управлении током якоря [4]. В общем случае способами снижения статической ошибки являются [5]:

- повышение астатизма системы;
- компенсация влияния внешних возмущений;
- увеличение коэффициента передачи разомкнутой системы.

Некоторые возможные способы повышения астатизма системы рассмотрены в научной публикации [6]. Возможные способы компенсации влияния внешних возмущений приведены в [7]–[9].

Увеличение общего коэффициента передачи разомкнутого контура имеет ограниченное применение, так как любая одноконтурная система имеет критический коэффициент передачи, при превышении которого система теряет свою устойчивость. Принципиальную возможность создания таких структур САУ, которые допускают неограниченное увеличение общего коэффициента передачи системы без потери устойчивости, еще во второй половине XX в. исследовал советский ученый М. В. Мееров [10]. Суть метода построения таких систем состоит в следующем. Пусть имеется некоторая замкнутая одноконтурная система управления (рис. 1) с ограниченным общим коэффициентом передачи.

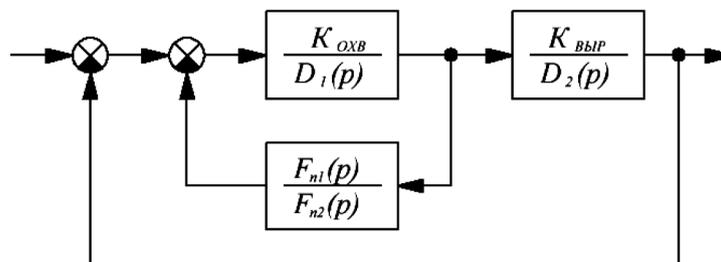


Рис. 1. Структурная схема с корректирующим звеном общего типа

Необходимо изменить эту систему так, чтобы она допускала неограниченное увеличение общего коэффициента передачи без потери устойчивости. Для этого одно или несколько звеньев структурной схемы охватывается отрицательной обратной связью (ООС) с корректирующим

звеном (параллельная коррекция). На рис. 1 использованы следующие условные обозначения: $K_{\text{оув}}$ — коэффициент передачи (усиления) части системы, охватываемой корректирующим звеном; $D_1(p)$ — характеристическое уравнение части системы, охватываемой корректирующим звеном; $K_{\text{выр}}$ — коэффициент передачи (усиления) части системы, не охватываемой корректирующим звеном; $D_2(p)$ — характеристическое уравнение части системы, не охватываемой корректирующим звеном; $F_{n1}(p)/F_{n2}(p)$ — передаточная функция корректирующего звена общего типа.

Вид корректирующего звена и количество охватываемых им звеньев определяется условием [10]:

$$n \leq 2 + n_1 - n_2, \quad (1)$$

где n — степень полинома $D_1(p)$; n_1 — степень полинома $F_{n1}(p)$; n_2 — степень полинома $F_{n2}(p)$.

Например, если колебательное звено ($n = 2$) охватывается дифференцирующим звеном ($n_1 = 1, n_2 = 0$), то система будет устойчивой при любом сколь угодно большом коэффициенте передачи разомкнутой системы.

Следует отметить, что в общем случае введение нового контура с корректирующим звеном изменяет передаточную функцию исходного контура, т. е. при введении нового контура в контур тока последний уже не будет настроен на технический оптимум. Однако в некотором частном случае, который рассматривается далее, существует такая передаточная функция корректирующего звена, которая не меняет структуру объекта управления, сохраняя при этом настройку на технический оптимум.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование было проведено с переводом параметров в относительные единицы, которые обозначены верхним индексом * [4]. Относительная единица — это отношение некоторой абсолютной величины к ее базовому значению. В качестве основных базовых величин двигателя постоянного тока принимают: $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение якоря; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток якоря; ω_6 — базовое значение скорости. За базовое значение скорости принимается электрическая скорость вращения якоря на холостом ходу при номинальном напряжении на обмотке якоря и номинальном токе в обмотке возбуждения. Для машин с независимым возбуждением базовое значение скорости находится при токе якоря, равном нулю. Производные базовые величины выражаются через основные базовые величины: сопротивление $R_6 = U_6/I_6 = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$; индуктивность $L_6 = R_6/\omega_6$; мощность $P_6 = U_6 \cdot I_6 = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}$; электромагнитный момент $M_6 = p_{\text{п}} \cdot P_6/\omega_6$; угловая скорость вращения ротора $\Omega_6 = \omega_6/p_{\text{п}}$, где $p_{\text{п}} = \text{floor}(3000/n_{\text{п}})$ — число пар полюсов; $\text{floor}(x)$ — целая часть числа x .

Известно, что при синтезе регулятора тока не учитывается отрицательная обратная связь (ООС) электродвигателя по скорости. Объект управления в этом случае имеет передаточную функцию

$$W_{\text{OYI}} = \frac{1}{T_3 p + 1} \frac{1/R_2^*}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

где T_3 и T_2 — постоянные времени, соответственно, полупроводникового преобразователя и обмотки якоря, с;

R_2^* — активное сопротивление обмотки якоря в относительных единицах.

Передаточная функция контура тока при настройке на технический оптимум:

$$W_{\text{KT1}} = \frac{1/k_T^*}{2T_{\mu 1}^2 p^2 + 2T_{\mu 1} p + 1}, \quad (3)$$

где $T_{\mu 1} = T_3$ — постоянная времени контура тока, с;

k_T^* — коэффициент обратной связи контура тока, о. е.

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_{\text{PT1}} = \frac{R_2^* T_2}{2k_d^* T_3} + \frac{R_2^*}{2k_d^* T_3 p}. \quad (4)$$

Структурная схема контура тока с учетом пренебрежения ООС по скорости приведена на рис. 2.

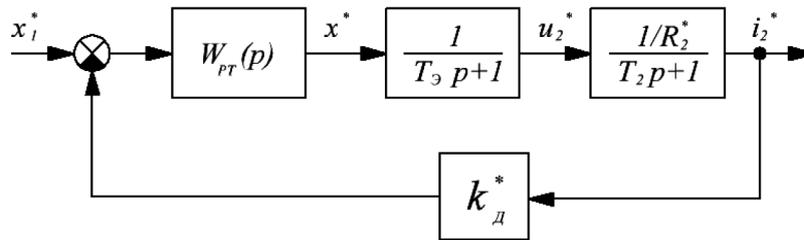


Рис. 2. Структурная схема контура тока

Ошибка по управлению, обусловленная отказом от учета внутренней ООС электродвигателя по скорости:

$$\delta_1 = \frac{2 \frac{T_э}{R_2^* T_{\text{мех}}}}{k_{\text{д}}^* \left(1 + 2 \frac{T_э}{R_2^* T_{\text{мех}}} \right)}, \quad (5)$$

где $T_{\text{мех}} = J \frac{\omega_0}{M_0}$ — механическая постоянная времени, с;

J — момент инерции вала электродвигателя и присоединенных к нему вращающихся масс, кг·м²;

ω_0 — базовое значение угловой скорости электродвигателя, рад/с;

$M_0 = p_n \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{\omega_0}$ — базовый электромагнитный момент, Н·м;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение якоря, В;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток якоря, А.

Для уменьшения ошибки совместим метод, указанный в источнике [10], и метод настройки контура на технический оптимум. Другими словами, введем в контур тока параллельное корректирующее звено так, чтобы контур был по-прежнему настроен на технический оптимум, и структура регулятора не изменилась. Это возможно в том случае, если не изменится структура объекта управления [11]. Известно, что апериодическое и колебательное звенья не меняют свою структуру при охвате их жесткой ООС ($n_1 = n_2 = 0$). В рассматриваемом случае контура тока существует три способа введения жесткой ООС с коэффициентом K^* :

– жесткой ООС охватывается звено объекта управления (полупроводниковый преобразователь плюс обмотка якоря электродвигателя, апериодическое звено второго порядка: $n = 2$);

– жесткой ООС охватывается звено обмотки якоря электродвигателя (апериодическое звено первого порядка: $n = 1$);

– жесткой ООС охватывается звено полупроводникового преобразователя (апериодическое звено первого порядка: $n = 1$).

При всех способах условие (1) выполняется.

Первый способ ($n = 2$). Из теории автоматического управления известно, что апериодическое звено второго порядка и колебательное звено имеют одинаковые передаточные функции. При этом вид звена определяется коэффициентом затухания ζ . Для апериодического второго порядка звена $\zeta \geq 1$, а для колебательного звена $0 < \zeta < 1$. Увеличение коэффициента K^* жесткой ООС уменьшает коэффициент затухания и увеличивает колебательность переходного процесса звена, поэтому этот вариант введения жесткой ООС не рассматривается.

Второй способ ($n = 1$). В этом случае передаточная функция объекта управления принимает вид

$$W_{ov2} = \frac{1}{T_3 p + 1} \cdot \frac{1 / (R_2^* + K^*)}{\frac{R_2^*}{R_2^* + K^*} T_2 p + 1}, \quad (6)$$

где K^* — коэффициент жесткой ООС в относительных единицах.

Структурная схема контура тока с учетом пренебрежения ООС по скорости приведена на рис. 3.

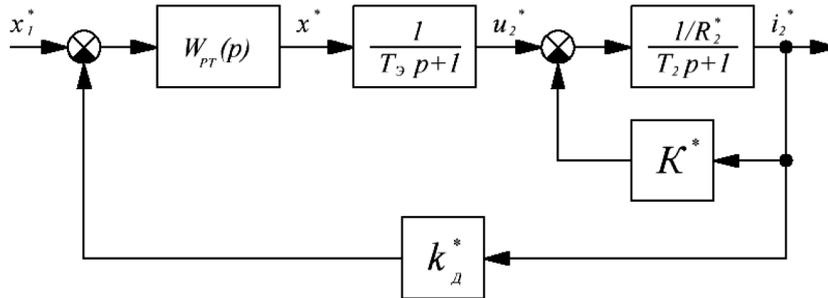


Рис. 3. Структурная схема контура тока при введении жесткой ООС для звена обмотки якоря электродвигателя

При этом для обеспечения быстродействия контура тока необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{R_2^*}{R_2^* + K^*} T_2 < T_3. \quad (7)$$

Условие (7) будет соблюдаться в следующем случае:

$$K^* > \frac{R_2^* (T_2 - T_3)}{T_3}. \quad (8)$$

Передаточная функция регулятора тока, обеспечивающего настройку контура тока на технический оптимум, имеет вид:

$$W_{PT2} = \frac{(R_2^* + K^*)^2 T_3}{2k_d^* R_2^* T_2} + \frac{(R_2^* + K^*)^2}{2k_d^* R_2^* T_2 p}. \quad (9)$$

Статическая ошибка по управлению

$$\delta_2 = \frac{2R_2^* T_2}{k_d^* (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2R_2^* T_2)}. \quad (10)$$

Постоянная времени контура тока

$$T_{\mu 2} = \frac{R_2^* T_2}{R_2^* + K^*}. \quad (11)$$

Третий способ ($n = 1$). Передаточная функция объекта управления:

$$W_{ou3} = \frac{1 / (1 + K^*)}{\frac{T_3}{1 + K^*} p + 1} \cdot \frac{1 / R_2^*}{T_2 p + 1}. \quad (12)$$

Структурная схема контура тока приведена на рис. 4.

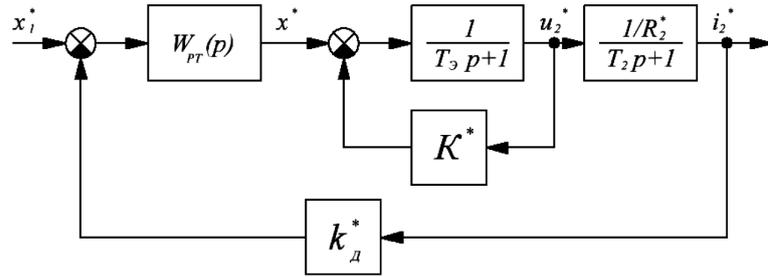


Рис. 4. Структурная схема контура тока при введении жесткой ООС для звена полупроводникового преобразователя

Передаточная функция регулятора тока

$$W_{PT3} = \frac{(1 + K^*)^2 R_2^* T_2}{2k_d^* T_3} + \frac{(1 + K^*)^2 R_2^*}{2k_d^* T_3 p}. \quad (13)$$

Статическая ошибка по управлению

$$\delta_3 = \frac{2T_3}{k_d^* (R_2^* T_{\text{мех}} (1 + K^*)^2 + 2T_3)}. \quad (14)$$

Постоянная времени контура

$$T_{\mu 3} = \frac{T_3}{1 + K^*}. \quad (15)$$

Результаты (Results)

На рис. 5 представлены зависимости от коэффициента жесткой ООС, соответственно, величины статической ошибки (рис. 5, а) и постоянной времени контура тока (рис. 5, б). При построении графиков были приняты следующие значения параметров электродвигателя и преобразователя: $R_2^* = 0,12$; $T_2 = 0,02$ с; $T_{\text{мех}} = 1$ с, $T_3 = 0,005$ с [4]. Из анализа этих графиков и выражений (10), (11), (14) и (15) следует, что при стремлении коэффициента K^* к бесконечности статическая ошибка и постоянная времени контура стремятся к нулю.

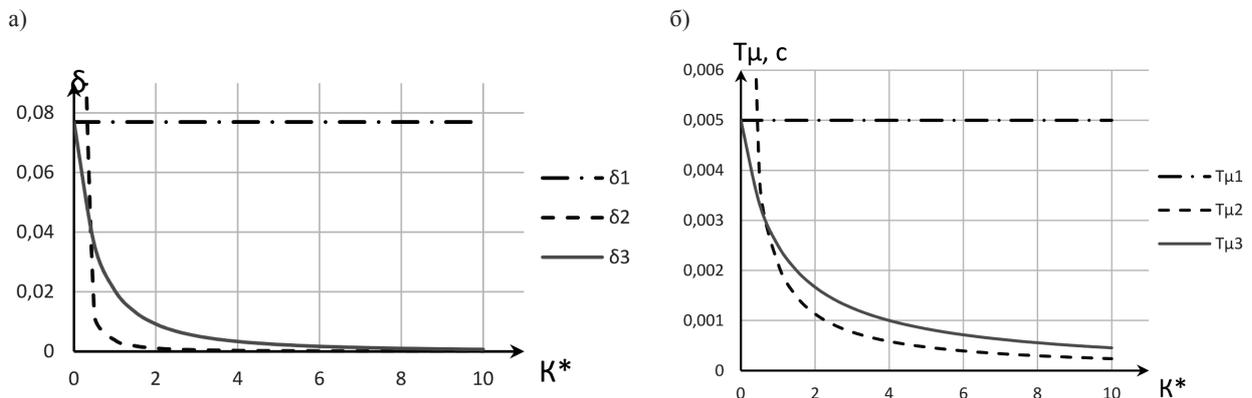


Рис. 5. Зависимости от значения коэффициента K^* :

а — величины статической ошибки; б — постоянной времени контура тока

На рис. 5 видно, что при некоторых значениях K^* статическая ошибка и постоянная времени при охвате звена обмотки якоря жесткой ООС больше, чем без нее: $T_{\mu 2} > T_{\mu 1}$, $\delta_2 > \delta_1$. Определим эти значения. Изменив знак неравенства в выражении (8) на противоположный, получим значения K_1^* , при которых $T_{\mu 2} > T_{\mu 1}$:

$$K_1^* < \frac{R_2^*(T_2 - T_3)}{T_3}. \quad (16)$$

Приравняв друг к другу выражения (5) и (10) и решив полученное уравнение относительно K^* , получим значения K_2^* , при которых $\delta_2 > \delta_1$:

$$K_2^* < \frac{R_2^*(\sqrt{T_2 T_3} - T_3)}{T_3}. \quad (17)$$

На рис. 5 также видно, что при некоторых значениях K^* $T_{\mu 3} = T_{\mu 2}$ и $\delta_3 = \delta_2$. Определим эти значения. Для этого приравняем друг к другу выражения (10) и (14) и выражения (11) и (15), решив затем полученные уравнения относительно K^* . Получим значение K_3^* , при котором $T_{\mu 3} = T_{\mu 2}$, и K_4^* , при котором $\delta_3 = \delta_2$:

$$K_3^* = \frac{R_2^*(T_2 - T_3)}{T_3 - R_2^* T_2}; \quad (18)$$

$$K_4^* = \frac{\left(R_2^* T_2 + \sqrt{T_3 T_2 (R_2^* - 1)^2 - T_3 + R_2^* T_2} \right) R_2^*}{T_3 - R_2^{*2} T_2}. \quad (19)$$

Как следует из рис. 5, при $K^* < K_3^*$ $T_{\mu 3} < T_{\mu 2}$ и при $K^* < K_4^*$ $\delta_3 < \delta_2$.

Для принятых ранее значений параметров электродвигателя и преобразователя имеем: $K_1^* < 0,36$; $K_2^* < 0,12$; $K_3^* = 0,692$; $K_4^* = 0,158$.

Обсуждение (Discussion)

Целью настоящего исследования является повышение точности и быстродействия контура тока, настроенного на технический оптимум. Для этой цели был применен метод, изложенный в источнике [10]. В ходе исследования рассмотрены три возможные структуры контура тока:

1. Стандартная структура с постоянной времени $T_{\mu 1}$ и статической ошибкой δ_1 в выражении (5) [4].
2. Структура с охватом жесткой ООС звена обмотки якоря электродвигателя — постоянная времени $T_{\mu 2}$ в выражении (11) и статическая ошибка δ_2 в выражении (10).
3. Структура с охватом жесткой ООС звена полупроводникового преобразователя — постоянная времени $T_{\mu 3}$ в выражении (15) и статическая ошибка δ_3 в выражении (14).

На рис. 5 наглядно показаны соотношения между показателями качества различных структур контура тока: постоянных времени контура и статических ошибок, однако графики на рис. 5 — частный случай общей закономерности. Выведем выражения, отражающие эти соотношения в общем виде.

Соотношения постоянных времени контура:

$$\frac{T_{\mu 3}}{T_{\mu 1}} = \frac{1}{1 + K^*} \quad (20)$$

Выражение (20) показывает, что $T_{\mu 1} > T_{\mu 3}$, т. е. быстродействие контура тока с жесткой ООС вокруг звена полупроводникового преобразователя выше, чем у обычного контура:

$$\frac{T_{\mu 2}}{T_{\mu 1}} = \frac{R_2^* T_2}{T_3 (R_2^* + K^*)}. \quad (21)$$

Из выражения (21) и при выполнении условия (7) следует, что $T_{\mu 1} > T_{\mu 2}$, т. е. быстродействие контура тока с жесткой ООС вокруг звена обмотки якоря электродвигателя также выше, чем у обычного контура:

$$\frac{T_{\mu 2}}{T_{\mu 3}} = \frac{R_2^* T_2 (1 + K^*)}{T_3 (R_2^* + K^*)}. \quad (22)$$

Здесь, с учетом выражения (18), $T_{\mu 3} < T_{\mu 2}$ при $0 < K^* < K_3^*$ и $T_{\mu 3} > T_{\mu 2}$ при $K_3^* < K^* < \infty$.

Соотношения статических ошибок:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{R_2^* T_2 (R_2^* T_{\text{мех}} + 2T_3)}{T_3 (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2R_2^* T_2)}; \quad (23)$$

$$\frac{\delta_3}{\delta_1} = \frac{R_2^* T_{\text{мех}} + 2T_3}{R_2^* T_{\text{мех}} (1 + K^*)^2 + 2T_3} \quad (24)$$

При увеличении K^* дроби (23) и (24) уменьшаются, т. е. $\delta_1 > \delta_2$ и $\delta_1 > \delta_3$, статические ошибки в контурах тока с жесткой ООС меньше, чем в контуре без нее.

Разделим выражение (10) на (14):

$$\frac{\delta_2}{\delta_3} = \frac{R_2^* T_2 (R_2^* T_{\text{мех}} (1 + K^*)^2 + 2T_3)}{T_3 (T_{\text{мех}} (R_2^* + K^*)^2 + 2R_2^* T_2)}. \quad (25)$$

Здесь, с учетом выражения (19), $\delta_3 < \delta_2$ при $0 < K^* < K_3^*$ и $\delta_3 > \delta_2$ при $K_3^* < K^* < \infty$.

Заключение (Conclusion)

В исследовании рассмотрен способ повышения точности и быстродействия контура тока, настроенного на технический оптимум, с помощью увеличения общего коэффициента передачи разомкнутого контура. На коэффициент передачи контура можно оказывать влияние введением жесткой ООС с коэффициентом K^* либо вокруг звена обмотки якоря электродвигателя, либо вокруг звена полупроводникового преобразователя. При увеличении значения коэффициента K^* увеличивается коэффициент передачи разомкнутого контура. Коэффициент K^* теоретически может неограниченно увеличиваться, но его величина будет зависеть от способа технической реализации рассмотренного в настоящем исследовании метода. При этом в статье показано, что при одном и том же значении K^* охват жесткой ООС звена обмотки якоря дает большее быстродействие и меньшую статическую ошибку, чем охват звена преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iqbal A. Adaptive fuzzy logic-controlled surface mount permanent magnet synchronous motor drive / A. Iqbal, H. Abu-Rub, H. Nounou // Systems Science & Control Engineering. — 2014. — Vol. 2. — Is. 1. — Pp. 465–475. DOI:10.1080/21642583.2014.915203.
2. Chaitanya N. Current Controller Based Power Management Strategy for Interfacing DG Units to Micro Grid / N. Chaitanya, P. Sujatha, K. Chandra Sekhar // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). — 2017. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 2300–2308. DOI: 10.11591/ijece.v7.i5.pp2300-2308.
3. Guo Z. Research on efficiency optimization of current-fed asynchronous motor drive based on hybrid search method / Z. Guo, J. Zhang, Q. Zhang // Systems Science & Control Engineering. — 2019. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 89–96. DOI:10.1080/21642583.2019.1573440.
4. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
5. Юревич Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 560 с.
6. Ширяев Э. В. Повышение точности и быстродействия регулятора тока в системах управления электропривода / Э. В. Ширяев // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы X Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. 22 мая 2019 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 248–253.
7. Шадрин Г. К. Физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений / Г. К. Шадрин // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 7. — С. 33–46. DOI: 10.1134/S0005117916070031.
8. Глущенко А. И. Об эффективности настройки отдельных параметров ПИ-регулятора с помощью нейросетевого настройщика для компенсации возмущений при управлении нагревательными объектами / А. И. Глущенко // Управление большими системами: сборник трудов. — 2019. — № 78. — С. 71–105.
9. Лекарева А. В. Обеспечение инвариантности ошибки по возмущению в системах автоматического управления траекторными перемещениями технологических объектов / А. В. Лекарева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2016. — Т. 16. — № 5. — С. 787–795. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795.

10. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности / М. В. Мееров. — М.: Наука, 1967. — 424 с.

11. Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

REFERENCES

1. Iqbal, Atif, Haitham Abu-Rub, and Hazem Nounou. “Adaptive fuzzy logic-controlled surface mount permanent magnet synchronous motor drive.” *Systems Science & Control Engineering* 2.1 (2014): 465–475. DOI: 10.1080/21642583.2014.915203.

2. Chaitanya, N., P. Sujatha, and K. Chandra Sekhar. “Current Controller Based Power Management Strategy for Interfacing DG Units to Micro Grid.” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 7.5 (2017): 2300–2308. DOI: 10.11591/ijece.v7.i5.pp2300-2308.

3. Guo, Zhen, Jiasheng Zhang, and Qingwei Zhang. “Research on efficiency optimization of current-fed asynchronous motor drive based on hybrid search method.” *Systems Science & Control Engineering* 7.1 (2019): 89–96. DOI: 10.1080/21642583.2019.1573440.

4. Samosejko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravlenija elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

5. Jurevich, E. I. *Teorija avtomaticheskogo upravlenija*. SPb.: BHV-Peterburg, 2016.

6. Shirjaev, E. V. “Povyshenie točnosti i bystrodejstvija reguljatora toka v sistemakh upravlenija elektroprivoda.” *Sovremennye tendencii i perspektivy razvitija vodnogo transporta Rossii: materialy X mezhvuzovskoj nauchno-praktičeskoj konferencii aspirantov, studentov i kursantov, 22 may 2019*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 248–253.

7. Shadrin, G. K. “A physics-based approach to control systems design using compensation of controlled plant dynamics and perturbations.” *Automation and Remote Control* 77.7 (2016): 1152–1162. DOI: 10.1134/S0005117916070031.

8. Glushchenko, A. I. “On efficiency of each of pi-controller parameters adjustment with neural tuner to reject disturbances acting on heating furnaces.” *Large-Scale Systems Control* 78 (2019): 71–105.

9. Lekareva, A. V. “Disturbance error invariance in automatic control systems for technological object trajectory movement.” *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 16.5 (2016): 787–795. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-787-795.

10. Meerov, M. V. *Sintez struktur sistem avtomaticheskogo upravlenija vysokoj točnosti*. M.: Nauka, 1967.

11. Samosejko, Veniamin F. “The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширяев Эдуард Вячеславович — аспирант
 Научный руководитель:
 Самосейко Вениамин Францевич — доктор
 технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: shiryaev.edward@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Улиссский Николай Анатольевич — аспирант
 Научный руководитель:
 Самосейко Вениамин Францевич — доктор
 технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: nikolayulisskiy@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shiryaev, Eduard V. — Postgraduate
 Supervisor:
 Samosejko, Veniamin F. —
 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: shiryaev.edward@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Ulisskiy, Nikolay A. — Postgraduate
 Supervisor:
 Samosejko, Veniamin F. —
 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: nikolayulisskiy@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2019 г.
 Received: September 16, 2019.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 11. № 5

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.10.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 21,75. Тираж 500 экз. Заказ № 545/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7