

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. № 4

**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. — № 4. — 194 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.





13 июня 2019 г. на 76-м году жизни после продолжительной тяжелой болезни скончался Феликс Владимирович Кармазинов, уроженец и Почетный житель г. Кронштадта и г. Санкт-Петербурга, бессменный руководитель ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» с 1987 по 2016 год

Феликс Владимирович являлся талантливым руководителем и высокопрофессиональным инженером, он умел вдохновлять, заряжать своей энергией и любовью к своему делу всех, с кем работал. Он требовал от коллег уважительного и внимательного отношения к воде и сам показывал достойный пример такого отношения.

Феликс Владимирович Кармазинов — доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии в области науки и техники (2001 г.); академик Инженерной академии, академик Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, Почетный профессор Европейского университета, Международной академии наук о природе и обществе, Заслуженный инженер России. Ф. В. Кармазинов был членом редакционного совета научного журнала «Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», являлся автором и соавтором свыше 200 научных работ, имел 68 патентов и авторских свидетельств, был удостоен званий «Почетный работник ЖКХ Российской Федерации» и «Почетный работник водного хозяйства», награжден государственными наградами Российской Федерации: орденом Почета, орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени, орденом Дружбы, орденом Александра Невского, имел награды зарубежных стран: являлся кавалером французского национального ордена «За заслуги», был удостоен командорского знака 1-й категории — ордена Финского Льва.

Благодаря проектам, которые инициировал и осуществил Феликс Владимирович Кармазинов, улучшилось экологическое состояние Невы и Финского залива, были обеспечены абсолютная безопасность и высокое качество питьевой воды, а сотни тысяч детей и взрослых благодаря созданию музея, посвященного истории петербургского водопровода, научились ценить и беречь водные ресурсы.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 609

Изотов О. А., Кириченко А. В., Кузнецов А. Л. Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем 609

Титов А. В., Баракат Л., Хаизаран А. Состояние и перспективы реализации технологии е-Навигации 621

Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности 631

Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шуленина А. В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения 640

Сигаев Д. Б., Шатыло А. П. Пути реализации потенциала профессии судоводителя как фактор повышения безопасности мореплавания 652

Васин А. В., Захаров Д. С., Анненков Л. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта 662

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 670

Шабанов В. И., Беленко С. Л., Гарибин П. А. Концепция строительства речного порта «Котовицы» на реке Волхов совмещенного с транспортно-логистическим центром 670

Холощев А. В., Подпорин С. А. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов 683

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 696

Горбаченко Е. О., Цветков Ю. Н., Лопарев Ю. К. Кинетика упрочнения металлических материалов при кавитационном изнашивании 696

Зубрилов С. П., Растрьгин Н. В. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа 705

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 718

Кича Г. П., Надежкин А. В., Бойко С. П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса 718

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы 727

Жаров А. В., Горшков Р. В., Савинский Н. Г. Теплоотдача в системах охлаждения судовых двигателей при циркуляции теплоносителя, содержащего высокотеплопроводные наночастицы мультиграфена 745

Том 11. № 4

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.

Ф. В. Кармазинов

координатор стратегических программ ГУП «Водоканал 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

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	755
<i>Румянцев А. Ю., Самосейко В. Ф., Саушев А. В.</i> Перспективы применения униполярных машин в гребных электрических установках.....	755
<i>Григорьев А. В., Малышев С. М., Зайнуллин Р. Р.</i> Опыт проектирования и испытания первого отечественного судового вентильного дизель-генератора	766
<i>Каракаев А. Б., Костенко А. В.</i> Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики.....	776
<i>Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В.</i> Способ энергоэффективного управления судовыми дизель-генераторными агрегатами.....	786

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 609

Izotov O. A., Kirichenko A. V., Kuznetsov A. L. Technological solutions for cargoes shipment through the container transport and technological systems 609

Titov A. V., Barakat L., Khaizaran A. Status and perspectives of E-Navigation technology implementation 621

Yuyukin I. V. Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface 631

Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S., Shulenina A. V. Estimation of the emotional load on the navigators under the conditions of heavy traffic 640

Sigaev D. B., Shatylo A. P. Ways to achieve the potential of the navigator's profession as a factor of improving the merchant shipping safety 652

Vasin A. V., Zakharov D. S., Annenkov L. V. Modeling the optimal seaport configuration 662

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 670

Shabanov V. I., Belenko S. L., Garibin P. A. A concept of building the «Kotovitsy» river port combined with the transport-logistic center on the Volkhov River 670

Kholoptsev A. V., Podporin S. A. Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands 683

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 696

Gorbachenko Y. O., Tsvetkov Y. N., Loparev Y. K. Kinetics of metal materials hardening at the cavitation wear 696

Zubrilov S. P., Rastrygin N. V. Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear 705

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 718

Kicha G. P., Nadezkin A. V., Boyko S. P. The results of operational tests of the selfregenerating filter in ship diesels as part of a combined oil-cleaning complex 718

Zhivljuk G. E., Petrov A. P. Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions 727

Zharov A. V., Gorshkov R. V., Savinski N. G. Heat transfer in the cooling systems of ship engines when circulating the coolant containing multigraphene nanoparticles with high thermal conductivity 745

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.

F. V. Karmazinov

Strategic Program Coordinator of SUE "Vodokanal of 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

director of "St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS", doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:

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

**Editorial
Collegium:**

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
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. Tezиков,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 755

Rumyantsev A. Yu., Samosejko V. F., Saushev A. V. Prospects of applying the unipolar machines in the electrical propulsion installations 755
Grigoryev A. V., Malyshev S. M., Zaynullin R. R. Experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator 766
Karakaev A. B., Kostenko A. V. A mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems..... 776
Sakharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V. Method of energy-efficient managing the ship's diesel-generator sets..... 786

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR CARGOES SHIPMENT THROUGH THE CONTAINER TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS

O. A. Izotov, A. V. Kirichenko, A. L. Kuznetsov

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

The influence of container transport and technological systems on the technology of sea transportation of goods and the appearance of the world economic system is estimated, which is due to a wide range of related tasks. In particular, the mechanism for removing the bulk of handling operations from seaports into the localization of consignees and shippers, which at loading/unloading containers begin to perform operations for the processing the General cargo, is revealed. At the same time, the growing transportations volumes affect the work of the “ending” flows of consolidation and distribution of cargoes, the volumes of which are insufficient for the formation of container consignments. The total volume of such cargo flows is so large that their service according to the traditional manual or mechanized technology, characteristic for these operations in ports and terminals, becomes impossible today.

It is important to expand the technological system of cargo handling and transportation by creating some complementary subsystem, which will be connected with the main container system of consolidation and distribution of cargo flows. This can qualitatively improve the efficiency of the entire system of commodity circulation by increasing the capacity of its peripheral part (on the ending routes).

The approaches to the problem of formation of new standard cargo units, which organically fit into the existing container-technological systems, are considered. Such means of consolidation, as well as a standard container, are designed to ensure the safety of cargo transportation during transshipment and transportation by various means of transport, free and fast loading (unloading) containers with cargo modules, as well as to limit unauthorized access to the cargo.

The alternative options for cargoes consolidation directly in the “ending” points of consolidation and distribution of goods on the basis of the standard module are showed and recommendations for the proposed cargo units introduction as the means of consolidation are provided.

Keywords: groupage cargo, container technologies, consolidation and distribution of goods, means of consolidation of cargo places.

For citation:

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.

УДК 656.073.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОТПРАВОК СБОРНЫХ ГРУЗОВ ПОСРЕДСТВОМ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов

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

Выполнена оценка влияния контейнерных транспортно-технологических систем на технологию морских перевозок грузов и облик мировой экономической системы, что обусловлено широким спектром решаемых сопутствующих задач. В частности, раскрыт механизм вынесения основной массы погрузочно-разгрузочных

работ из морских портов в локализации грузополучателей и грузоотправителей, которые при загрузке/разгрузке контейнеров начали выполнять операции по обработке генеральных грузов. При этом растущие объемы перевозок отразились на работе «концевых» потоков консолидации и распределения грузов, объемы которых недостаточны для формирования контейнерных партий. Суммарный объем таких грузопотоков настолько велик, что их обслуживание по традиционной ручной или механизированной технологии, свойственной данным операциям в портах и на терминалах, сегодня становится невозможным.

Актуальным представляется расширение технологической системы грузообработки и грузоперевозки за счет создания некоторой комплементарной подсистемы, которая будет соединяться с основной контейнерной системой консолидации и распределения грузопотоков. Это может качественно повысить эффективность всей системы товаропродвижения за счет увеличения пропускной способности ее периферийной части (на концевых маршрутах).

Рассмотрены подходы к проблеме формирования новых стандартных грузовых единиц, органически вписывающихся в существующие контейнерно-технологические системы. Такие средства укрупнения, как и стандартный контейнер, призваны обеспечить сохранность перевозки грузов при перегрузке и транспортировке различными видами транспорта, свободную и быструю загрузку (выгрузку) контейнеров модулями с грузом, а также ограничить несанкционированный доступ к грузу.

Проведенное исследование показывает альтернативные варианты укрупнения сборных грузов непосредственно в «концевых» пунктах их консолидации и распределения на базе стандартного модуля. Приведены рекомендации по внедрению предлагаемых грузовых единиц как средств укрупнения.

Ключевые слова: сборные грузы, контейнерные технологии, консолидация и распределение грузов, средства укрупнения грузовых мест.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Контейнерная транспортно-технологическая система коренным образом изменила технологию перевозки грузов. Это изменение, в первую очередь, коснулось морских перевозок, однако вскоре возможности и возникающие при этом преимущества позволили распространить данную технологию на смежные виды транспорта [1]–[3]. Возникший интермодализм запустил механизм глобализации, который, в свою очередь, изменил весь облик мировой экономической системы. Основным технологическим результатом оказалось вынесение основной массы погрузочно-разгрузочных работ из морских портов в сферу деятельности грузополучателей и грузоотправителей, которые при загрузке / разгрузке контейнеров начали выполнять, по сути, операции, которые требовались при обработке конвенциональных судов для перевозки генеральных грузов [4]–[5].

Растущие объемы перевозок, явившиеся следствием развития технологии, привели к появлению механизмов рационализации маршрутов перевозки, направленных на использование все более крупных транспортных средств для достижения *эффекта масштабной экономии*. Это отразилось в появлении морских портов с функцией консолидации и распределения грузопотоков (Hubs) и позднее — портов с наземной реализацией этой же функции (Gateways), вслед за которыми вскоре стали развиваться центры железнодорожного транshipmentа и сухопутные грузовые центры, связывающие маршруты с автомобильным и даже воздушным транспортом [6]–[7]. В то же время возрастающие объемы перевозок не избавляют от наличия «концевых» потоков консолидации и распределения, объемы которых являются недостаточными для формирования контейнерных партий. Суммарный объем этих грузопотоков сегодня становится настолько велик, что их обслуживание по традиционной ручной или механизированной технологии, свойственной данным операциям в портах и терминалах предыдущего поколения, становится невозможным [8]–[9]. С учетом этого актуальным представляется расширение технологической системы грузообработки и грузоперевозки за счет создания некоторой комплементарной подсистемы, которая будет стыковаться с основной контейнерной системой консолидации и распределения грузопотоков [10]–[11]. Данное решение может качественно повысить эффективность всей системы товаропродвижения за счет увеличения

пропускной способности ее периферийной части (на конечных маршрутах), т. е. оно выполняет функции основной контейнерной транспортно-технологической системы. Анализ транспортной отрасли показывает, что объективные предпосылки для этого созданы [12]–[17]. Для решения этой проблемы нужно решить следующие частные задачи:

- провести анализ структуры и объемов грузопотоков, формирующих систему конечных потоков консолидации и распределения по видам транспорта;
- сформулировать требования и стандарты грузовых единиц, средств укрупнения, транспортировки и перевалки;
- разработать технологии эффективной загрузки / разгрузки предлагаемых грузовых единиц, а последних — в стандартные контейнеры;
- оценить экономический эффект от внедрения предлагаемых грузовых единиц;
- разработать рекомендации по внедрению предлагаемых грузовых единиц как средств укрупнения, органически вписывающихся в существующие контейнерные транспортно-технологические системы.

Поиску подходов к решению данной проблемы и посвящена данная статья.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Грузополучатель при наличии большой партии товаров, обеспечивающей загрузку целого контейнера, осуществляет перевозку на условиях FCL (Full Container Load — полностью загруженный контейнер). Перевозка в контейнерах такой сборной партии чаще всего окажется более доступной и дешевой по сравнению с перевозкой в виде тарно-штучного груза.

Перевозка на условиях LCL (Less Than Container Load — контейнер не целиком или сборный груз) для отдельного грузоотправителя представляет собой наиболее удобный и в то же время наиболее трудоемкий вид международных перевозок. Именно это противоречие между удобством для грузоотправителя и удобством для перевозчика приводит к необходимости организации «концевых» потоков грузов.

На этапе формирования контейнерных систем основным средством укрупнения сборных грузов в течение длительного периода времени оставался универсальный поддон. Это привело к необходимости выполнения концевым центром консолидации и распределения грузов, а зачастую терминалом или морским портом, функций масштабной перевалки тарно-штучных грузов, тем самым сводя контейнеризацию в них к загрузке / выгрузке контейнеров и их обработке. Таким образом, в отличие от FCL-технологий, когда к перевозке предъявляется целый контейнер, LCL-технология в интересах грузовладельца все чаще требует изменения форм предъявления грузов и технологий перегрузочных операций, совершаемых с ними. Как следствие, эффективным решением может служить внедрение новых грузовых единиц — грузовых (контейнерных) модулей. Такое средство укрупнения, как и стандартный контейнер, призвано обеспечить сохранность перевозки грузов при перегрузке и транспортировке различными видами транспорта, свободную и быструю загрузку / выгрузку контейнеров модулями с грузом, а также ограничить несанкционированный доступ к грузу вплоть до возможности закрытия на замок и опломбирования модуля.

Загрузка / выгрузка предлагаемых средств укрупнения (грузовых моделей) может обеспечить возможность в дальнейшем внедрять автоматизированные и автоматические технологии грузообработки, но при этом она должна сохранить возможность применения всех существующих технологий и, как минимум, позволить механизировать данный процесс. Для этого представляется необходимым разработать несколько типов модулей, совместимых для погрузки в один контейнер, оборудованных дверцами, откидными крышами или воротами, желательно складной конструкции в порожнем положении.

В сложившейся контейнерной системе, принятой на всех видах транспорта, используется один и тот же размерный ряд контейнеров, позволяющий через наименьшие внутренние размеры определить габариты возможных к применению новых грузовых единиц (модулей). Для контейнеров 20'DC это внутреннее пространство имеет размеры 2350 мм в ширину, 2381 мм в высоту и 5905 мм в дли-

ну, для контейнеров 40'DC¹ размеры составляют 2309 мм в ширину, 2379 мм в высоту и 12045 мм в длину и т. д.

Использование внутреннего пространства контейнера может быть оценено по двум критериям: максимальное использование объема самого контейнера и максимальное использование объема модулей, предлагаемых для сборной партии груза. При этом следует учесть, что в соответствии с действующими правилами крепления груза при перевозке в контейнере² должны выполняться следующие требования:

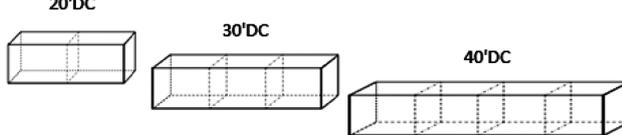
- между грузом и дверью контейнера должно быть свободное место, чтобы груз не смог выдвинуть двери и чтобы контейнер свободно открывался;
- общая сумма зазоров между штабелями груза в контейнере, а также между грузами и стенками контейнера не должна превышать 200 мм.

Рассмотрим возможности использования параметров контейнеров по выбранным критериям.

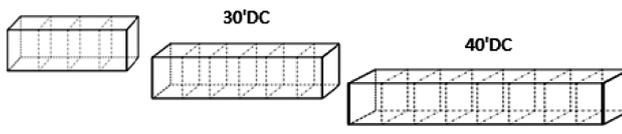
1. Оценка по критерию максимального использования объема контейнера.

Если принять единый зазор в 30 мм, то можно предложить размерный ряд грузовых модулей, согласующихся с любым контейнером (рис. 1).

а)

Тип конт.	Внутренние размеры, мм			Загрузка, тн	Компоновка загрузки контейнеров модулями укрупнения грузов
	ширина	высота	длина		
20'DC	2350	2381	5905	21,8	
30'DC	2330	2350	8930	27,6	
40'DC	2309	2379	12045	28,0	
	Размеры модулей при загрузке контейнера 2-я (3-я, 4-я) ед., мм				
20'DC	2290	2321	2907,5	10,9	
30'DC	2270	2290	2946,7	9,2	
40'DC	2249	2319	2988,8	7,0	
min	2249	2290	2907,5	7,0	

б)

Тип конт.	Внутренние размеры, мм			Загрузка, тн	Компоновка загрузки контейнеров модулями укрупнения грузов
	ширина	высота	длина		
20'DC	2350	2381	5905	21,8	
30'DC	2330	2350	8930	27,6	
40'DC	2309	2379	12045	28,0	
	Размеры модулей при загрузке контейнера 4-я (6-ю, 8-ю) ед., мм				
20'DC	2290	2321	1453,8	5,5	
30'DC	2270	2290	1473,3	4,6	
40'DC	2249	2319	1494,4	3,5	
min	2249	2290	1453,8	3,5	

в)

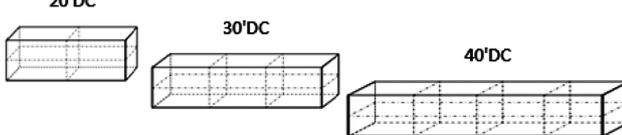
Тип конт.	Размеры, мм			Загрузка, тн	Компоновка загрузки контейнеров модулями укрупнения грузов
	ширина	высота	длина		
20'DC	2350	2381	5905	21,8	
30'DC	2330	2350	8930	27,6	
40'DC	2309	2379	12045	28,0	
	Размеры модулей при загрузке контейнера 4-я (6-ю, 8-ю) ед., мм				
20'DC	2290	1160,5	2907,5	5,5	
30'DC	2270	1145	2946,7	4,6	
40'DC	2249	1159,5	2988,8	3,5	
min	2249	1145	2907,5	3,5	

Рис. 1. Размерный ряд модулей средств укрупнения:

а — вариант 1; б — вариант 2 (модули уже); в — вариант 3 (модули в два яруса по высоте)

¹ Стандартный сухогрузный контейнер.

² В настоящее время погрузка контейнеров, размещение и крепление грузов в контейнере должна производиться в соответствии с пп. 1–3 «Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах», утвержденных МПС РФ 27.05.2003 г., в частности при погрузке крупнотоннажных контейнеров (20, 24ф, 40ф).

Как видно из данных, представленных на рис. 1, грузоподъемность контейнера определяет различные варианты допустимой загрузки модуля. В любом случае размерный ряд предлагаемых модулей средств укрупнения требует изучения потребностей грузовладельцев.

На рис. 1 указаны наружные размеры, которые позволяют выполнить расчет загрузки модулей стандартными укрупненными грузовыми местами, сформированными на поддонах 1200 мм на 800 мм (рис. 2).

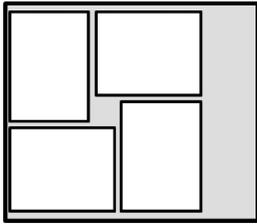
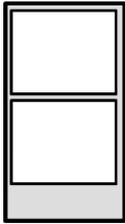
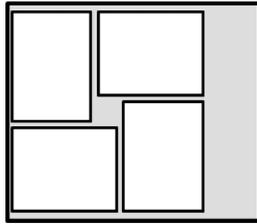
вариант 1				вариант 2				вариант 3			
Размеры, мм			Объем модуля, м ³	Размеры, мм			Объем модуля, м ³	Размеры, мм			Объем модуля, м ³
ширина	высота	длина		ширина	высота	длина		ширина	высота	длина	
2249	2290	2907,5	14,97	2249	2290	1453,8	7,49	2249	1145	2907,5	7,49
											
Объем груза при условии загрузки на полную высоту, м ³			8,79	Объем груза при условии загрузки на полную высоту, м ³			4,40	Объем груза при условии загрузки на полную высоту, м ³			4,40
% использования объема			58,7	% использования объема			58,7	% использования объема			58,7

Рис. 2. Размещение укрупненных грузовых мест в рассмотренных модулях

Использование объемов рассмотренных модулей при их загрузке стандартными поддонами составляет лишь 58,7 %, что противоречит интересам как грузовладельца, так и перевозчика. В качестве прототипа универсального модуля, позволяющего предварительно укрупнять товарные места, перегружаться традиционными способами и соответствовать существующим стандартам, можно использовать крейт (Crate, CRT). Крейт в данном случае представляет собой коробку из плотного картона (иногда из фанеры), закрывающуюся сверху крышкой, с основанием, соответствующим по размеру применяемому вместе с крейтом двухнастильному четырехзаходному поддону (рис. 3). Коробка устанавливается на верхнем настиле поддона и заполняется первичными грузовыми местами. Затем надевается крышка и коробка обхватывается крест-накрест четырьмя металлическими лентами, пропускаемыми в пространство между настилами поддона. В таком виде крейт представляет собой устойчивую конструкцию, способную к штабелированию в два яруса. Размещение таких модулей в контейнере предполагает наличие у одной из стенок расстояния, достаточного для провоза гидравлической тележки. Данное пространство и пространство до дверей контейнера заполняется сепарацией и креплениями из досок.



Рис. 3. Пример формирования крейт-модуля на поддоне

Высота штабеля из двух крейтов оказывается таковой, что погрузка их обоим одним движением автопогрузчика невозможна, так как штабель не проходит в дверной проем по высоте. В этом

случае выгрузка производится несколько иным способом, когда штабель подводится гидравлической тележкой к дверному проему и погрузчик приподнимает верхний крейт, который отводится тележкой вглубь контейнера, затем выполняется выгрузка единичного крейта. Указанные дополнительные движения и очевидная непрочность конструкции, делают крейт фактически одноразовым средством, а также возможность погрузки коробки только сверху делают крейт недостаточно технологичным средством. Другим вариантом крейта служит деревянный ящик, еще менее подверженный стандартизации (рис. 4).



Рис. 4. Деревянные ящики как средство укрупнения сборной партии

2. Оценка по критерию максимального использования объема модуля

Ширину и высоту модуля следует оставить неизменными, поскольку эти параметры обусловлены рациональным раскреплением средств укрупнения в контейнере. Наиболее рациональная длина модуля, обеспечивающая и загрузку, и кратность относительно размеров контейнера, составит 2200 мм (табл. 1).

Таблица 1

Изменение длины модулей средств укрупнения по вариантам

Тип контейнера	Внутренние размеры контейнера, мм			Количество модулей в контейнере	Загрузка, т	Объем модуля, м ³	Объем груза, м ³	Использование объема, %	
	ширина	высота	длина					Модуля	Контейнера
<i>Вариант 1</i>									
20' DC	2350	2381	5905	–	21,8	33,04	–	–	–
30' DC	2330	2350	8930	–	27,6	48,90	–	–	–
40' DC	2309	2379	12045	–	28,0	66,16	–	–	–
20' DC	2290	2321	2200,0	2,0	10,9	11,7	8,8	75,2	53,2
30' DC	2270	2290	2200,0	4,0	6,9	11,4	8,8	76,9	71,9
40' DC	2249	2319	2200,0	5,0	5,6	11,5	8,8	76,6	66,5
Min	2249	2290	2200,0	–	5,6	–	–	–	–
<i>Вариант 2</i>									
20' DC	2350	2381	5905	–	21,8	33,04	–	–	–
30' DC	2330	2350	8930	–	27,6	48,90	–	–	–
40' DC	2309	2379	12045	–	28,0	66,16	–	–	–

Продолжение табл. 1

20' DC	2290	2321	1400,0	4,0	5,5	7,4	4,4	59,1	53,3
30' DC	2270	2290	1400,0	6,0	4,6	7,3	4,4	60,5	54,0
40' DC	2249	2319	1400,0	8,0	3,5	7,3	4,4	60,3	53,2
Min	2249	2290	1400,0		3,5				
<i>Вариант 3</i>									
20' DC	2350	2381	5905	–	21,8	33,04	–	–	–
30' DC	2330	2350	8930	–	27,6	48,90	–	–	–
40' DC	2309	2379	12045	–	28,0	66,16	–	–	–
20' DC	2290	1160,5	2200,0	4,0	5,5	5,8	4,4	75,3	53,3
30' DC	2270	1145	2200,0	8,0	3,5	5,7	4,4	76,9	72,0
40' DC	2249	1159,5	2200,0	10,0	2,8	5,7	4,4	76,7	66,5
Min	2249	1145	2200,0		2,8				

Для наглядности полученные результаты можно представить в графической форме (рис. 5), откуда видно, что степень использования объема контейнера ниже у модуля длиной 1400 мм, при длине 2200 мм этот показатель не зависит от высоты предлагаемого модуля, но данное обстоятельство отражается на возможной загрузке средства укрупнения. Кроме того, увеличение количества модулей, загружаемых в один контейнер, потребует привлечения большего количества сборных партий, следующих в попутном направлении. Впрочем, эта проблема может быть упразднена для организатора перевозки путем выдачи грузополучателям или его операторам-перевозчикам модулей вместо контейнеров не в конечных пунктах консолидации и распределения грузов, а на грузовых терминалах портов.

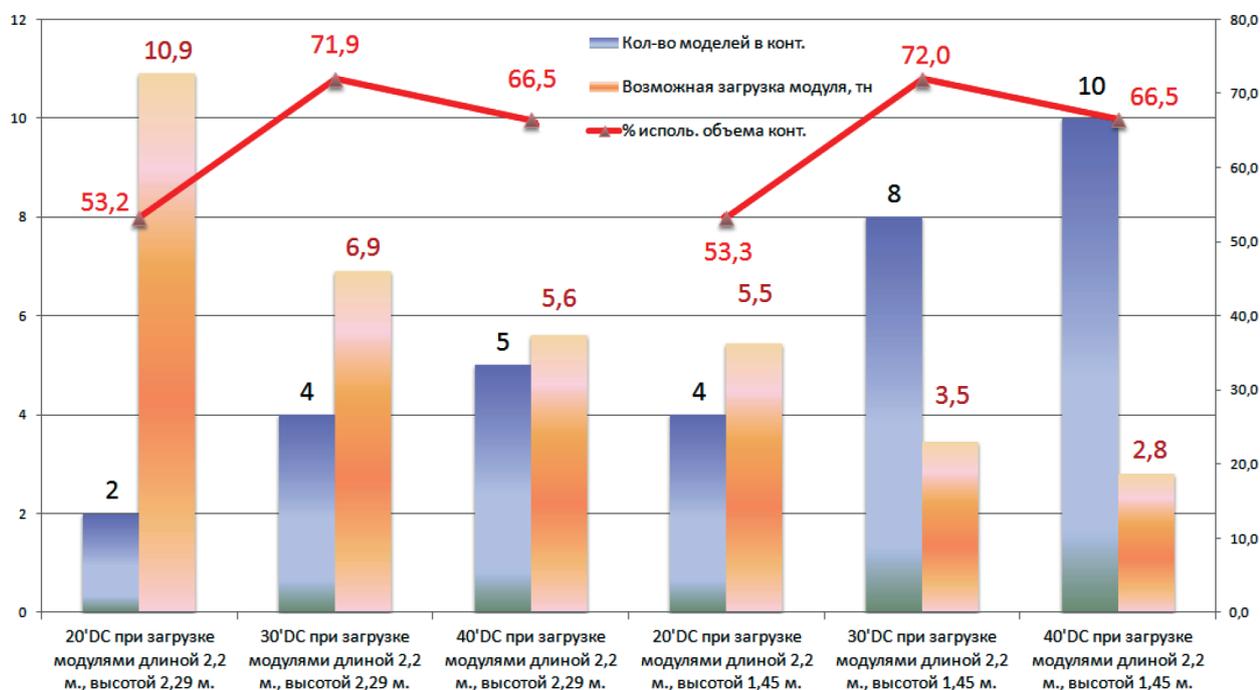


Рис. 5. Вариант 3 после изменения длины модулей средств укрупнения

Результаты (Results)

LCL-вариант позволяет грузовладельцу организовать отправку малого объема груза, при котором функции по формированию контейнерной партии переходят к посреднику (оператору-перевозчику). При этом грузовладелец избавлен от необходимости сбора более крупной

отправки и получает все преимущества, привнесенные в транспортный процесс контейнерными технологиями. Загрузка / выгрузка средств доставки грузов до контейнерных терминалов и контейнеров в этом случае может производиться как на площадке оператора, так и в складских зонах портов и терминалов (рис. 6). В то же время рассмотренная технология значительно увеличивает количество погрузочно-разгрузочных операций, усложняет учет движения грузов и оформления грузовых документов. Все издержки транспортных предприятий при этом отражаются на их тарифной политике.

Применение в парадигме сложившейся технологии новых средств укрупнения (модулей) позволит освободить порты и контейнерные терминалы от рутинных операций с тарно-штучными грузами (рис. 7), распространив преимущества контейнерных перевозок на перевозки по LCL-технологии. Кроме того, использование модулей может существенно сократить время оборота контейнеров, их потребное количество в обращении для обслуживания грузовой линии, емкость складских зон, и, в конечном итоге, снизить затраты транспортных предприятий, что должно отразиться также на конечных тарифных ставках.



Рис. 6. Сформировавшаяся схема отправки сборной партии грузов



Рис. 7. Предлагаемая схема отправки сборной партии грузов

Обсуждение (Discussion)

Для оценки экономической эффективности внедрения предлагаемых средств укрупнения (модуля, или контейнера в контейнере — CIC «Container In Container») необходимо сопоставить тарифные ставки за перевозку грузов по FCL и LCL видам отправок. Предположим, ставка за перевозку полностью загруженного контейнера составляет C_{FCL} ед., цена за единицу доставки сборной партии груза по существующей технологии — C_{LCL} ед., цена за перевозку сборной партии, сформированной в предлагаемом модуле, соответственно, $C_{LCL-CIC}$ ед. Кроме того, владелец сборной отправки понесет дополнительные издержки, связанные с арендой предлагаемого средства укрупнения — $C_{АРЕНДЫ-CIC}$ ед./сут, на период перевозки T , сут.

Основным условием выбора предпочтения грузоотправителя является неравенство

$$C_{FCL} > NC_{LCL} > NC_{LCL-CIC} + TC_{АРЕНДЫ-CIC}; \quad (1)$$

Для оператора-перевозчика количество сборных партий (так же, как и модулей со сборными партиями), загружаемых в один контейнер N , становится выгодным при условии

$$C_{FCL} \leq NC_{LCL} \leq N(C_{LCL-CIC} + TC_{АРЕНДЫ-CIC}); \quad (2)$$

или

$$C_{FCL} / N \leq C_{LCL} \leq C_{LCL-CIC} + TC_{АРЕНДЫ-CIC}. \quad (3)$$

Приведенное неравенство (1) является основой для реализации операторами-перевозчиками своих интересов и интересов грузовладельцев как своих потенциальных партнеров.

Для внедрения новых средств укрупнения в сформировавшуюся цепь транспортировки грузов необходимо оценить условия, при которых $C_{LCL} > C_{LCL-CIC} + TC_{АРЕНДЫ-CIC}$.

Рассмотрим и сравним показатели транспортировки тарно-штучных грузов по следующей схеме: доставка груза из конечного пункта консолидации грузов автотранспортом – загрузка контейнера на терминале порта – перевозка морским транспортом – разгрузка контейнера на терминале порта – доставка груза в конечный пункт распределения грузов автотранспортом. Теперь можно сравнить показатели транспортировки (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ факторов оказывающих влияние на тарифную ставку

Показатели	C_{LCL}	$C_{LCL-CIC} + TC_{АРЕНДЫ-CIC}$
Количество погрузочно-разгрузочных операций с одной единицей тарно-штучных грузов	6 (склад отправителя – автофургон – склад порта – контейнер и обратно)	2 (склад отправителя – модуль и обратно)
Количество погрузочно-разгрузочных операций с предлагаемыми средствами укрупнения	–	2 (модуль в контейнер и обратно)
Время проведения погрузочно-разгрузочных операций	Больше	Меньше
Количество привлекаемых перегрузочных машин	Больше	Меньше
Период оборота контейнера	Больше	Меньше
Аренда моделей как средств укрупнения	–	При отсутствии в собственности
Тарифная политика	Тенденция к росту	Тенденция к уменьшению

Как видно из проведенного анализа, внедрение модулей как средств укрупнения имеет большие перспективы для дальнейшего исследования.

Выводы (Summary)

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Контейнерная транспортно-технологическая система коренным образом изменила технологию перевозки грузов.
2. Рост объема перевозок с использованием контейнеризации грузов привел 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. Существующие технологии и размерный ряд контейнеров диктуют параметры новых средств укрупнения грузов, которые могут быть получены путем соответствующего анализа.
5. Внедрение новых модулей позволит сократить как количество погрузочно-разгрузочных операции с тарно-штучными грузами в порту, так и время их проведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Изотов О. А.* Определение требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов методом имитационного моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гуляев // 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.
2. *Изотов О. А.* Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.
3. *Кузнецов А. Л.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
4. *Кузнецов А. Л.* Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1. — № 3 (41). — С. 176–182.
5. *Кузнецов А. Л.* Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.
6. *Кузнецов А. Л.* Выбор формы представления структуры универсальной имитационной модели контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 520–532. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-520-532.
7. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
8. *Кузнецов А. Л.* Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 1 (44). — С. 30–33.
9. *Schepler X.* Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
10. *Irannezhad E.* A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
11. *Saeed N.* Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines / N. Saeed, O. I. Larsen // Case Studies on Transport Policy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

12. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // *Computers & Industrial Engineering*. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
13. Kuzmicz K. A. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // *Omega*. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.
14. Almetova Z. Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.
15. Lee C. Y. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C. Y. Lee, D. P. Song // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.
16. Yin M. Quantity discount pricing for container transportation services by shipping lines / M. Yin, K. H. Kim // *Computers & Industrial Engineering*. — 2012. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 313–322. DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.008.
17. Vural C. A. Value co-creation in maritime logistics networks: A service triad perspective / C. A. Vural, A. Göçer, Á. Halldórsson // *Transport Policy*. — 2019. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.12.017.

REFERENCES

1. 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.
2. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. “Assessment of required technological resources by statistical simulation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.
3. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.
4. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. “Port development simulation.” *Marine Intellectual Technology* 1.3(41) (2018): 176-182.
5. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Set theory model for the assessment of the container terminal’s operational resources.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-5-1094-1103.
6. Kuznetsov, Alexander L., Victoriya N. Shcherbakova-Slyusarenko, and Andrey S. Tkachenko. “On the selection of the format for the container terminal simulation model’s structure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 520–532. DOI: 10.21821/2309- 5180-2018-10-3-520-532.
7. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Simulation in the tasks of sea port operational analyses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
8. Kuznetsov, A. L., Ya. Ya. Eglit, and A. V. Kirichenko. “On the issue of organising the operation of a transport hub.” *Transport of Russian Federation* 1(44) (2013): 30–33.
9. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. “Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
10. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. “A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2017): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
11. Saeed, Naima, and Odd I. Larsen. “Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines.” *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.
12. Lv, Bowen, Bin Yang, Xiaolin Zhu, and Jun Li. “Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport.” *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

13. Kuzmicz, Katarzyna Anna, and Erwin Pesch. "Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation." *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

14. Almetova, Zlata, Vladimir Shepelev, and Sergey Shepelev. "Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes." *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

15. Lee, Chung-Yee, and Dong-Ping Song. "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities." *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

16. Yin, Ming, and Kap Hwan Kim. "Quantity discount pricing for container transportation services by shipping lines." *Computers & Industrial Engineering* 63.1 (2012): 313–322. DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.008.

17. Vural, Ceren Altuntaş, Aysu Göçer, and Árni Halldórsson. "Value co-creation in maritime logistics networks: A service triad perspective." *Transport Policy* (2019). DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.12.017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Кириченко Александр Викторович —

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Kirichenko, Aleksandr V. —

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: KirichenkoAV@gumrf.ru

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

Статья поступила в редакцию 10 июля 2019 г.

Received: July 10, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630

STATUS AND PERSPECTIVES OF E-NAVIGATION TECHNOLOGY IMPLEMENTATION

A. V. Titov¹, L. Barakat², A. Khaizaran²

¹ — Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

² — Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The issue of the status and perspectives of E-Navigation technology implementation, which is one of the main initiatives of the international maritime organization, is explored in the paper. The initiative involves the creation of digital infrastructure on the ship and shore segments that provides data exchange and integration of existing and new maritime navigation instruments, which will allow us to carry out the transition of navigation information to a digital format. E-Navigation includes five components: user needs, architecture and analysis, gap analysis, implementation, and conclusions review.

Despite the use of navigation systems such as integrated bridge systems, automatic identification system, automatic radar plotting aid, and electronic chart display and information system, the navigation errors due to the human factor are one of the main causes of marine accidents.

E-Navigation strategy aims to improve the shipping safety by reducing the number of human errors. The results of expert assessments of reducing the risk of the human factor as a part of the introduction and realization of the E-Navigation strategy are considered in the paper.

In the 21st century, E-Navigation will ensure the development of intelligent maritime transport. An analysis of E-Navigation projects allowing us to understand that it creates a new paradigm for the marine information exchange and forms a digital infrastructure for shipping, is presented.

The theoretical method of researching the E-Navigation and test-beds projects is used in the paper. The test-bed project in the Russian Federation, the result of which will be a segment of the maritime communication platform in the Gulf of Finland, is analyzed. In this project, a ship integrated navigation system, focused on the use of E-Navigation services, will be created. The project completion is expected in 2021.

Keywords: E-Navigation, unmanned vessel, Risk Control Option, test-bed, digital navigation, human error.

For citation:

Titov, Alexey V., Lama Barakat, and Anas Khaizaran. "Status and perspectives of E-Navigation technology implementation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.

УДК 629.5.051; 656.052

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ Е-НАВИГАЦИИ

А. В. Титов¹, Л. Баракат², А. Хаизаран²

¹ — ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», Астрахань, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Российская Федерация

Исследуется вопрос о состоянии и перспективах реализации технологии е-Навигации, которая является одной из основных инициатив Международной морской организации. Рассматривается инициатива, подразумевающая создание цифровой инфраструктуры на судовом и береговом сегментах, обеспечивающей обмен данными и интеграцию существующих и новых навигационных морских инструментов, что позволит осуществить переход навигационной информации в цифровой формат. Е-Навигация включает пять компонентов: потребности пользователей, архитектура и анализ, анализ пробелов, реализацию и обзор выводов. Отмечается, что несмотря на использование навигационных систем, таких как интегрированные мостиковые системы, автоматическая идентификационная система, радиолокационный автотропкладчик и электронно-картографическая навигационно-информационная система, навигационные

ошибки в результате человеческого фактора являются одной из главных причин морских аварий. Подчеркивается, что стратегия е-Навигации призвана повысить безопасность судоходства за счет сокращения числа человеческих ошибок. В работе рассматриваются результаты экспертных оценок снижения риска человеческого фактора в рамках внедрения и реализации стратегии е-Навигации.

Обращается внимание на то, что в XXI в. е-Навигация обеспечит развитие интеллектуального морского транспорта. В исследовании представлен анализ проектов е-Навигации, которые позволяют понять, что она создает новую парадигму для обмена морской информацией и формирует цифровую инфраструктуру для судоходства.

В работе используется теоретический метод исследования проектов е-Навигации и тестовых акваторий. Проанализирован проект создания тестовой акватории в Российской Федерации, результатом которого явится сегмент морской коммуникационной платформы в Финском заливе. Отмечается, что в данном проекте будет создана судовая интегрированная навигационная система, ориентированная на использование сервисов е-Навигации. Завершение проекта ожидается в 2021 г.

Ключевые слова: е-Навигация, безэкипажное судно, управление рисками, тестовая акватория, цифровая навигация, человеческая ошибка.

Для цитирования:

Титов А. В. Состояние и перспективы реализации технологии е-Навигации / А. В. Титов, Л. Баракат, А. Хаизаран // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.

Введение (Introduction)

В 2006 г. Международной морской организацией (ИМО) была разработана концепция е-Навигации для повышения управляемости и безопасности морских судов и увеличения эффективности морского транспорта [1]. Е-Навигация представляет собой инициативу ИМО, основанную на обеспечении интеграции существующих и новых навигационных морских инструментов на целостной и систематической основе, что позволит облегчить переход навигационной информации в цифровой формат. В настоящее время технологии телекоммуникаций, электронных датчиков и систем, технологии е-Навигации уже внедряются в сфере морской индустрии [2]. Е-Навигация не обязательно означает «электронную» навигацию, где последняя является навигационной технологией. Существующие научные разработки в сфере технологии безэкипажного судовождения (БЭС) и ее применения весьма подробно отражают ключевые аспекты навигационных систем, которые автоматически управляют БЭС в различных ситуациях [3].

В ближайшем будущем невозможно представить судоходство без БЭС. При этом безэкипажное судовождение напрямую зависит от состояния инфраструктуры и внедрения технологий е-Навигации. Так, например, проект БЭС «MUNIN» является частью систем стандартов морской информационной технологии (MiTS — Maritime Information Technology Standards), которые включают е-Навигацию [4]. Ожидается, что вклад работы «MUNIN» будет доступен для е-Навигации на основе сотрудничества в области «портфеля услуг» и деятельности по обработке данных S-100.

На современных судах, несмотря на использование навигационных систем, таких как интегрированные мостиковые системы, автоматическая идентификационная система (АИС), радиолокационный автопрокладчик, электронно-картографическая навигационно-информационная система (ЭКНИС) и глобальная морская система связи при бедствии (ГМССБ), навигационные ошибки в результате человеческого фактора являются одной из главных причин морских аварий. В настоящее время ИМО стремится разработать навигационные инструменты для того, чтобы сократить количество морских аварий.

Е-Навигация — это комплексная концепция, ориентированная на поддержку в принятии решений посредством управления морской информацией [5]. Латинская буква «е» в данной концепции имеет несколько различных смысловых значений (рис. 1).

На 99-й сессии, состоявшейся 16–25 мая 2018 г., Комитет ИМО по безопасности на море принял ряд ключевых регуляторных элементов в области связи и навигации. Так, им был утвержден обновленный план реализации стратегии е-Навигации ИМО и временные руководящие принципы согласованного отображения навигационной информации, получаемой с помощью средств связи [6].

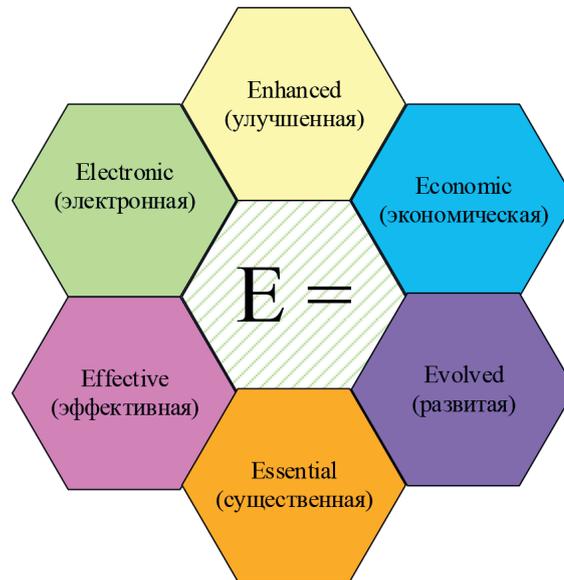


Рис. 1. Коннотации латинской буквы «е» в е-Навигации

В рамках состоявшейся 3–7 декабря 2018 г. в Лондоне 100-й сессии Комитета по морской безопасности ИМО были определены четыре степени автономии судов (табл. 1).

Таблица 1

Степени автономии судов

Степень автономии	Характеристики
Первая	Судно с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений: экипаж находится на борту, чтобы управлять и контролировать судовые системы и функции. Некоторые операции могут быть автоматизированы, иногда и без присмотра, но экипаж готов взять на себя управление
Вторая	Судно может находиться под дистанционным управлением из другого места. Экипаж на борту готов взять на себя управление судовыми системами и функциями
Третья	Судно с дистанционным управлением из другого места без экипажа на борту
Четвертая	Полностью автономное судно. Операционная система судна способна самостоятельно принимать решения и определять действия

ИМО предлагает следующее рабочее определение е-Навигации: «... согласованный сбор, интеграция, обмен, представление и анализ морской информации на борту и на берегу с помощью электронных средств в целях повышения эффективности судоходства от причала до причала и соответствующих услуг по обеспечению безопасности и охраны на море и защите морской среды» [7, с. 19].

Основной целью е-Навигации является создание цифровой инфраструктуры, предоставляющей передачу необходимых информационных данных для повышения навигационной безопасности судов и обеспечения оптимального управления, в том числе БЭС. Суть понимания концепции е-Навигации рассмотрим на примере Норвежской береговой администрации «Kystverket» [8]. Администрация рассматривает три основных элемента для понимания концепции е-Навигации (рис. 2): бортовой компонент, компонент связи и береговой компонент.

Бортовой компонент — это навигационные системы, которые работают в зависимости от интеграции судовых датчиков, вспомогательной информации, стандартного пользовательского интерфейса и комплексной системы управления охраняемыми зонами и оповещениями.

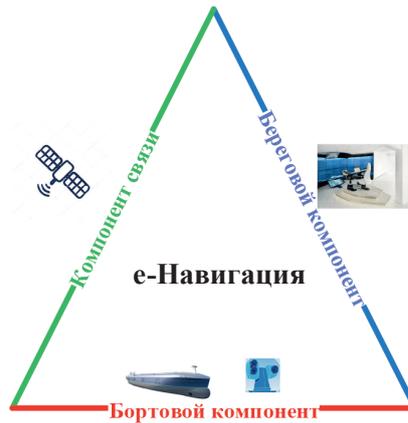


Рис. 2. Основные компоненты e-Навигации

Береговой компонент — это управление движением судов и обмен данными в форматах, которые будут более понятны и использованы береговыми операторами для поддержки безопасности и эффективности судов.

Компонент связи предназначен для создания инфраструктуры, обеспечивающей беспрепятственную передачу информации на борту судов, между судами и между судами и берегом [8].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Реализация стратегии e-Навигации. План реализации стратегии e-Навигации, утвержденный ИМО в 2014 г., содержит перечень задач до 2019 г., направленных на выполнение пяти приоритетных проблем e-Навигации (рис. 3) [9].

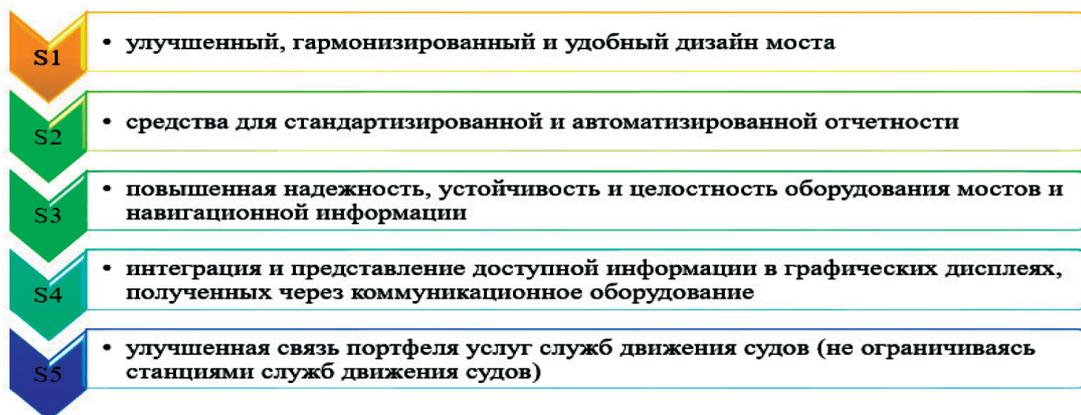


Рис. 3. План ИМО для реализации стратегии e-Навигации

Решения *S2*, *S4* и *S5* концентрируют внимание на эффективной передаче морской информации и данных между всеми соответствующими пользователями (*судно – судно*, *судно – берег*, *берег – судно* и *берег – берег*). Решения *S1* и *S3* способствуют эффективному и практическому использованию информации и данных на борту [10].

Следует отметить, что e-Навигация не является статичной концепцией, реализация данной стратегии будет продолжаться по мере развития потребностей пользователей, а также по мере развития технологий, позволяющих создавать более эффективные и действенные системы [11]. При этом реализация стратегии e-Навигации является поэтапным итерационным процессом непрерывного развития (рис. 4). Пять возможных компонентов в рамках плана реализации стратегии e-Навигации включают: потребности пользователей, «архитектура» и анализ, анализ пробелов, реализация, обзор выводов.

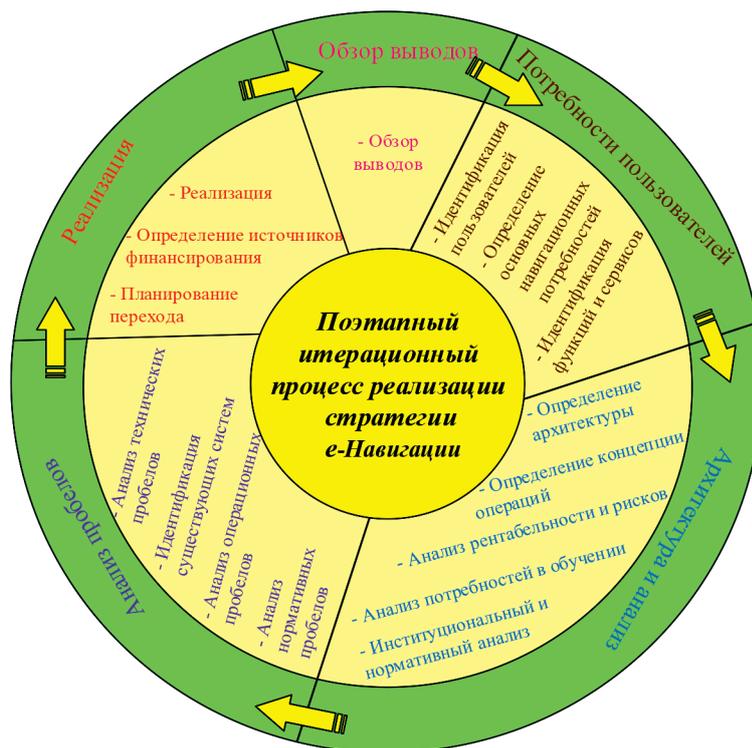


Рис. 4. Компоненты разработки процесса внедрения e-Навигации

ИМО работает в тесном союзе с Международной ассоциацией морских средств навигации и маячных служб (МАМС — IALA — International Association of Lighthouse Authorities) и Международной гидрографической организацией (МГО — ИНО — International Hydrographic Organization) в области e-Навигации. МАМС участвует в разработке концепции e-Навигации для обеспечения «архитектурной работы», включая коммуникационные технологии, аппаратное и программное обеспечение. Она разрабатывает предлагаемую универсальную модель морских данных для цифровой навигации в целях удовлетворения требований, вытекающих из будущего внедрения e-Навигации.

МГО отвечает за любые гидрографические стандарты, продукты и услуги по e-Навигации. В январе 2010 г. МГО разработала первое издание рамочного геопространственного стандарта S-100 для гидрографических и связанных данных. Пересмотренное и улучшенное второе издание S-100 было опубликовано в июне 2012 г. Стандарт S-100 в зависимости от серий ИСО 19100 географических стандартов обеспечивает базу данных для разработки следующего поколения продуктов электронных навигационных карт (ЭНК — ENC — Electronic Navigational Charts), а также других связанных цифровых продуктов, необходимых сообществам гидрографических, морских и географической информационной системы (ГИС) [12].

В начале 2011 г. ИМО сообщила о том, что стандарт S-100 будет играть важную роль в гидрографических и более широких морских областях, поэтому его следует рассматривать как базовый уровень и важный элемент в концепции e-Навигации.

Фактор ошибок человека и e-Навигация. Исследования показали, что 60–90 % крупных аварий в транспортных системах, таких как авиация и судоходство, имеют человеческую ошибку в качестве основной причины [13]. Отсутствие человека на БЭС способствует уменьшению количества морских аварий, возникающих из-за человеческих ошибок. С другой стороны, может возникнуть фактор человеческой ошибки в рамках удаленного управления БЭС [7].

Человеческие ошибки, которые вызывают навигационные аварии, являются важным аспектом для заинтересованных сторон, участвующих в реализации e-Навигации, таких как международные организации, исследовательские институты, судоходные компании, верфи, соответствующие

производители оборудования и т. д. Технологии е-Навигации значительно повысят эффективность и безопасность судоходства.

В процессе реализации стратегии потребности пользователей являются основным компонентом. Данная стратегия призвана повысить безопасность судоходства за счет сокращения числа человеческих ошибок или возможности заблаговременно избежать их с помощью таких наборов инструментов, как семь видов опций управления рисками (ОУР — RCO — Risk Control Option). Основные опции управления рисками, способствующие оценке приоритетных решений е-Навигации [14], представлены на рис. 5.



Рис. 5. Основные опции управления рисками ИМО

Результаты экспертных оценок снижения риска человеческого фактора, согласно документу ИМО от 31 мая 2013 г. (Development Of An e-Navigation Strategy Implementation Plan. «Report of the Correspondence Group on e-navigation to NAV 59 Submitted by Norway»), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспертных оценок снижения риска человеческого фактора

Человеческие ошибки	Опции управления рисками						
	ОУР1, %	ОУР2, %	ОУР3, %	ОУР4, %	ОУР5, %	ОУР6, %	ОУР7, %
Недостаточное наблюдение (невнимательность)	16	23	14	18 %	10	11	32
Плохое суждение о движении судна	21	8	11	4	20	3	20
Усталость / перегруженность работой	20	26	11	33	5	17	24
Плохое суждение о других факторах	11	12	10	11	11	12	19
Неадекватное планирование рейса	26	3 %	8	1	0	15 %	4 %
Опьянение	1	1	0	0	0	0	0
Отказ от использования навигационных средств	18	8	17	9	5	13	21
Отказ уступить дорогу (высокая скорость)	18	11	12	9	9	5	27
Отсутствие знаний / навыков / подготовки	3	7	18	7	6	1	10
Проблемы связи	8	5	9	19	3	11	15
Травмы / болезни	0	1	0	0	0	0	0
Использование неисправного оборудования	11	18	3	1	18	0	8

Анализ исследования морских аварий, вызванных человеческим фактором, формирует предметное поле для реализации безэкипажного судовождения. Исследование в данной работе тематики е-Навигации является частью общего исследования в области БЭС ввиду взаимосвязи предметных областей.

Проекты е-Навигации. Следует отметить, что дальнейшая разработка цифровой навигации может быть осуществлена только при поддержке проектов тестовых акваторий (ТА) (Test-Beds), которые, в свою очередь, поддерживают утвержденные решения и эффективность е-Навигации. Так, в период функционирования в 2014–2015 гг. немецкой тестовой акватории «PICON» проект был сфокусирован на «интеграции переданных геоданных и / или информации, относящейся к безопасности (уровень и течение воды, лед), в бортовые навигационные системы» [15]. В 2014–2017 гг. норвежская компания «Kongsberg Norcontrol IT» запустила проект тестовой акватории «ESESAME Straits» (Secure, Efficient, and Safe maritime traffic Management in the Straits of Malacca and Singapore). Компания занималась разработкой новой системы управления движением судов и оптимизации морских транспортных потоков. Основной целью проекта была заявлена разработка и подтверждение общей ситуационной осведомленности и совместного принятия решений между командой мостика и береговыми операторами.

Среди второстепенных целей проекта следующие:

- разработка надежного человеческого фактора и организационных принципов для совместного принятия решений между судном и берегом;
- разработка новой парадигмы предоставления услуг для систем на судне и на берегу;
- сбор и анализ реальных данных о движении судов, которые будут использоваться в качестве контрольных значений для оценок и для моделирования и др. [16].

В 2014–2016 гг. в Китае выполнялась работа по реализации проекта «Yangshan Port e-NAV», общей целью которого являлось улучшение системы гарантий навигационной безопасности в условиях плохой видимости и предоставление комплексной, своевременной, надежной и эффективной навигационной информации и услуг для судов [17].

В сентябре 2016 г. Правительство Российской Федерации утвердило инновационный проект по созданию первой в России тестовой акватории (ТА) е-Навигации «Эрмитаж». Головным исполнителем опытно-конструкторской работы является группа «Кронштадт» (АО «Кронштадт», АО «Кронштадт Технологии»). ТА охватывает восточную часть Финского залива, реки Неву и Свирь, а также Ладожское озеро. В 2020 г. планируется завершить работы по данному проекту. Цель проекта заключается в оснащении акваторий, береговых центров и судов техническими средствами е-Навигации, проведении их испытаний и апробации совместного использования с последующим их распространением на морские и внутренние водные пути России. Создание единого информационного пространства *судно – берег* (платформы), с одной стороны, обеспечит выполнение Россией обязательств в рамках Международной морской организации, а с другой — предоставление морских информационных сервисов в акваториях морей, а также российской зоны ответственности. Кроме того, в развитии концепции е-Навигации активное участие также принимала компания «Транзас». По итогам НИР серии «Подход», выполняемой «Транзас» в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» (2009–2016 гг.), предполагалось создание прототипа е-Navigation-мостика [18]. Компания принимала участие в европейском проекте «MONALISA 2.0».

Рабочая группа национальной технологической инициативы «Маринет» является одним из драйверов в области е-Навигации в России. Дорожная карта «Маринет», которая была создана в 16 октября 2015 г., включает реализацию международного стратегического плана е-Навигации [19]. В настоящее время эта группа занимается разработкой проекта «Создание пилотной зоны е-Навигации и технических средств е-Навигации», главным результатом которого является создание российского сегмента морской коммуникационной платформы. Завершение проекта ожидается в 2021 г. В нем будет создана судовая интегрированная навигационная система (ИНС), ориентированная на использование сервисов е-Навигации [20].

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Концепция е-Навигации, разработанная ИМО, направлена на повышение безопасности морского судоходства и повышение надежности морских телекоммуникаций, а также на сокращение числа аварий и ущерба для окружающей среды. Ожидается, что число аварий, вызванных человеческими ошибками, сократится за счет внедрения и реализации инструментов е-Навигации, которые поддерживают принятие решений во избежание аварий.

2. Результаты исследования и анализ проектов е-Навигации позволяют понять, что она формирует новую парадигму для обмена морской информацией и обеспечивает цифровую инфраструктуру для судоходства. В ближайшие годы стандарты в рамках е-Навигации станут обязательными для мирового коммерческого флота, без соблюдения которых ни одно судно не сможет, например, зайти в порт или территориальные воды того или иного государства.

3. Наличие тестовой акватории в Финском заливе (порты Приморск, Высоцк, Усть-Луга, Большой порт Санкт-Петербург) позволит отработать технические решения по созданию российского сегмента морской коммуникационной платформы как пилотной зоны е-Навигации с ориентацией на существующую систему безопасности мореплавания.

4. Значимым результатом проекта «Создание пилотной зоны е-Навигации и разработки технических средств е-Навигации» (АО «Кронштадт Технологии») с точки зрения реализации международного стратегического плана е-Навигации является российский сегмент морской коммуникационной платформы, объединяющей судоводителей, офисы судоходных компаний, портовые службы, центры управления движением и другие структурные подразделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patraiko D. 5e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — CRC Press, 2009. — Pp. 55–60.*
2. *Tumov A. B. Перспективы технологического развития и внедрения безэкипажных судов / А. В. Титов, Л. Баракат // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 1-3(41). — С. 94–103.*
3. *Tumov A. B. Системы управления безэкипажными судами / А. В. Титов, Л. Баракат, В. А. Чанчиков, Г. А. Тактаров, О. П. Ковалев // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — Т. 4. — № 1 (43). — С. 109–120.*
4. *Rødseth Ø. J. A system architecture for an unmanned ship / Ø. J. Rødseth, Å. Tjora // Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). — 2014.*
5. *Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовождении / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: ОНМА, 2013. — 135 с.*
6. *Ringbom H. Regulating Autonomous Ships—Concepts, Challenges and Precedents / H. Ringbom // Ocean Development & International Law. — 2019. — Vol. 50. — Is. 2–3. — Pp. 141–169. DOI: 10.1080/00908320.2019.1582593.*
7. *Tumov A. B. Оценка рисков эксплуатации безэкипажных судов / А. В. Титов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — Т. 4. — № 1 (43). — С. 11–23.*
8. *Kystverket. Core objectives [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kystverket.no/en/About-Kystverket/International-work/enavigation/News/Stad-Ship-Tunnel/Core-objectives/> (дата обращения: 20.03.2019).*
9. *Burmeister H. C. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective/ H. C. Burmeister, W. Bruhn, Ø. J. Rødseth, T. Porathe // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.002.*
10. *Weintrit A. Prioritized main potential solutions for the e-Navigation concept / A. Weintrit // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2013. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 27–38. DOI: 10.12716/1001.07.01.03.*
11. *Pillich B. Developing e-Navigation, the early stages [Электронный ресурс] / B. Pillich. — Режим доступа: http://ushydro.thsoa.org/hy07/09_01.pdf (дата обращения: 26.06.2019).*

12. Ward R. IHO S-100: The New Hydrographic Geospatial Standard for Marine Data and Information / R. Ward, L. Alexander., B. Greenslade, A. Pharaoh // Canadian Hydrographic Conference. — Canada: Canadian Hydrographic Association, 2008. № 425.

13. Hojjati-Emami K. The Concept and Methodology for Developing Effective Human Reliability Databanks in Road Transportation [Электронный ресурс] / К. Hojjati-Emami, B. S. Dhillon, K. Jenab. — Режим доступа: http://cd14.ijme.us/papers/053__Khashayar%20Hojjati-Emami,%20Balbir%20S.%20Dhillon,%20Kouroush%20Jenab.pdf (дата обращения: 06.03.2019).

14. Baldauf M. Improving and Assessing the Impact of e-Navigation applications / M. Baldauf, S. B. Hong // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.

15. Hahn A. Simulation Environment for Risk Assessment of E-Navigation Systems / A. Hahn // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. — American Society of Mechanical Engineers, 2015. — Paper No. OMAE2015-41498. — Pp. V003T02A072. DOI: 10.1115/OMAE2015-41498.

16. Imset M. Shared mental models of challenging Maritime Situations: comparisons of ship and shore personnel in the Straits of Malacca and Singapo / M. Imset, K. I. Øvergård // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2017. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 243–248. DOI: 10.12716/1001.11.02.05.

17. Du Z. X. Research on International E-Navigation Practical Project and Its Inspiration / Z. X. Du, P. F. Huang, M. Becke // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. — 2016. — Vol. 39. — № 2. — Pp. 462–468. DOI: 10.7508/jmerd.2016.02.023.

18. Ривкин Б. С. Е-Навигации — десять лет / Б. С. Ривкин // Гироскопия и навигация. — 2015. — № 4 (91). — С. 173–191.

19. Генералов С. В. Дорожная карта национальной технологической инициативы «МариНет» / С. В. Генералов // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 4 (65). — С. 14–17.

20. Пинский А. С. Е-навигация и безэкипажное судовождение / А. С. Пинский // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 4 (65). — С. 50–54.

REFERENCES

1. Patraiko, D., P. Wake, and A. Weintrit. “5e-Navigation and the Human Element.” *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press, 2009. 55–60.

2. Titov, Alexey V., and Lama Barakat. “Prospects for technological development and implementation of unmanned ships.” *Marine Intellectual Technologies* 1-3(41) (2018): 94–103.

3. Titov, Alexey V., Lama Barakat, Vasily A. Chanchikov, German A. Taktarov, and Oleg P. Kovalev. “Control systems of unmanned vessels.” *Marine Intellectual Technologies* 4.1(43) (2019): 109–120.

4. Rødseth, Ørnulf Jan, and Åsmund Tjora. “A system architecture for an unmanned ship.” *Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT)*. 2014.

5. Vagushchenko, L. L. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v sudovozhdenii*. Odessa: ONMA, 2013.

6. Ringbom, Henrik. “Regulating Autonomous Ships—Concepts, Challenges and Precedents.” *Ocean Development & International Law* 50.2–3 (2019): 141–169. DOI: 10.1080/00908320.2019.1582593.

7. Titov, Alexey V., Lama Barakat, Olga Y. Lazovskaya, German A. Taktarov, and Oleg P. Kovalev. “Risk assessment of operating unmanned ships.” *Marine Intellectual Technologies* 4.1(43) (2019): 11–23.

8. Kystverket. Core objectives. Web. 20 March 2019 <<https://kystverket.no/en/About-Kystverket/International-work/enavigation/News/Stad-Ship-Tunnel/Core-objectives/>>.

9. Burmeister, Hans-Christoph, Wilko Bruhn, Ørnulf Jan Rødseth, and Thomas Porathe. “Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 1 (2014): 1–13. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.002.

10. Weintrit, Adam. “Prioritized main potential solutions for the e-Navigation concept.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 7.1 (2013): 27–28. DOI: 10.12716/1001.07.01.03.

11. Pillich, B. “Developing e-Navigation, the early stages.” Web. 26 June 2019 <http://ushydro.thsoa.org/hy07/09_01.pdf>.

12. Ward, R., L. Alexander, B. Greenslade, and A. Pharaoh. “IHO S-100: The New Hydrographic Geospatial Standard for Marine Data and Information.” *Canadian Hydrographic Conference*. Canada: Canadian Hydrographic Association, 2008. № 425.

13. Hojjati-Emami, K., B. S. Dhillon, and K. Jenab. "The Concept and Methodology for Developing Effective Human Reliability Databanks in Road Transportation." Web. 6 March 2019 <http://cd14.ijme.us/papers/053___Khashayar%20Hojjati-Emami,%20Balbir%20S.%20Dhillon,%20Kouroush%20Jenab.pdf>.

14. Baldauf, Michael, and Sun-Bae Hong. "Improving and Assessing the Impact of e-Navigation applications." *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 4 (2016): 1–12. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.

15. Hahn, Axel. "Simulation Environment for Risk Assessment of E-Navigation Systems." *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. Paper No. OMAE2015-41498. Pp. V003T02A072. DOI: 10.1115/OMAE2015-41498.

16. Imset, Marius, and Kjell Ivar Øvergård. "Shared mental models of challenging Maritime Situations: comparisons of ship and shore personnel in the Straits of Malacca and Singapo." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 11.2 (2017): 243–248. DOI: 10.12716/1001.11.02.05.

17. Du, Z. X., P. F. Huang, and M. Becke. "Research on International E-Navigation Practical Project and Its Inspiration." *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* 39.2 (2016): 462–468. DOI: 10.7508/jmerd.2016.02.023

18. Rivkin, B. S. "Tenth Anniversary of E-Navigation." *Gyroscopy and Navigation* 4(91) (2015): 173–191.

19. Generalov, S. V. "Roadmap of the national technological initiative MariNet." *Transport of Russian Federation* 4(65) (2016): 14–17.

20. Pinskiy, A. S. "E-Navigation and unmanned ship navigation." *Transport of Russian Federation* 4(65) (2016): 50–54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Титов Алексей Валерьевич —
кандидат технических наук, руководитель
Инженерного проектного офиса
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 20а
e-mail: pochta_414000@list.ru

Баракат Лама — аспирант
Научный руководитель:
Титов Алексей Валерьевич
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: lama.barakat@mail.ru

Хаизаран Анас — аспирант
Научный руководитель:
Титов Алексей Валерьевич
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: khaizaran@mail.ru

Titov, Alexey V. —
PhD,
Chief of the Engineering Project Office
Astrakhan State University
20a Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: pochta_414000@list.ru

Barakat, Lama — Postgraduate
Supervisor:
Titov, Alexey V.
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: lama.barakat@mail.ru

Khaizaran, Anas — Postgraduate
Supervisor:
Titov, Alexey V.
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: khaizaran@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2019 г.
Received: June 23, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639

MODIFICATION OF THE LEAST SQUARES METHOD FOR SPLINE APPROXIMATION OF NAVIGATIONAL ISOSURFACE

I. V. Yuyukin

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

For the first time, the formalization of the least squares method is presented as matrix calculation with the purpose of optimal approximation of the navigational isosurface as the geometric image of navigational isolines concentration in the context of modern understanding of the navigational field concept. The task topicality is specified by the necessity to search a new decision for parallelization of blocky matrix transformations organizing in the navigation practice due to the measurements superfluity as the result of doubling the ship's position definition by the alternative methods. The pragmatic estimation of the classic mathematical apparatus doesn't exclude the possibility of the negative problem manifestation of looping a computer program realizing the standard least squares method. In the existing mathematical approach there is no algorithmic ability of adaptation to the potential resource of the multiprocessor computer equipment. The computational stability of new method is determined by the ability to repeatedly use the computational module in the algorithm to solve an ultra-large system of linear algebraic equations using symmetric techniques with cellular matrices. The visual geometrical interpretation of the hybrid interpolation technology of a hypothetical fragment of the navigational isosurface in 3D projection is presented. The intuitive selection of the controlled smoothing parameter in an interactive mode for choosing between interpolation and approximation depending on the navigational measurements accuracy is realized.

The study of searching an optimization scheme for organizing grid nodes acquires an independent mathematical interest. The issue of high-speed information handling on the base of modified formula at its realization in the onboard computer to ensure the navigator's adequate analysis the incoming data flow, the proper variation of the watch staff and avoiding the crew fatigue, as well as assistance in the correct decision making regarding ship management, is examined. When applying the formula derived in the proposed study, a double effect is achieved simultaneously: improving the final results accuracy and organizing the effective calculations by optimizing the computational costs.

Keywords: least squares method, navigational isosurface, concept of navigational field, parallelization of matrix transformations, hybrid technology of interpolation, controlled smoothing parameter, interactive mode, optimization of grid nodes, the high-speed information handling, variation of the watch staff.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

УДК 656.61.052 656

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ НАВИГАЦИОННОЙ ИЗОПОВЕРХНОСТИ

И. В. ЮЮКИН

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

Впервые представлена формализация метода наименьших квадратов с целью оптимальной аппроксимации навигационной изоповерхности как геометрического образа концентрации навигационных изолиний в контексте современного понимания концепции навигационного пространства. Актуальность задачи обусловлена необходимостью поиска нового решения по распараллеливанию блочных матричных преобразований, организующихся в практике судовождения ввиду избыточности измерений как результата дублирования определения места судна альтернативными методами. Отмечается, что прагматическая оценка

классического математического аппарата не исключает возможности проявления негативной проблемы заикливания компьютерной программы, реализующей стандартный метод наименьших квадратов. В существующем математическом подходе отсутствует алгоритмическая возможность адаптации под потенциальный ресурс многопроцессорной компьютерной техники. Подчеркивается, что вычислительная устойчивость нового способа определяется возможностью многократного использования в алгоритме расчетного модуля для решения сверхбольшой системы линейных алгебраических уравнений за счет техники симметричного оперирования с клеточными матрицами. Представлена наглядная геометрическая интерпретация гибридной технологии интерполяции гипотетического фрагмента навигационной изоповерхности в 3D проекции. Реализуется интуитивный подбор в интерактивном режиме управляемого параметра сглаживания для выбора между интерполяцией или аппроксимацией в зависимости от точности навигационных измерений. При этом исследование проблемы поиска оптимизационной схемы организации сеточных узлов приобретает самостоятельный математический интерес. Рассматривается вопрос высокоскоростной обработки навигационной информации на основе модифицированной формулы при ее реализации в бортовом компьютере для обеспечения адекватного анализа судоводителем поступающего потока данных, корректного варьирования составом вахты и устранения избыточной усталости экипажа, а также содействия принятию правильного решения в отношении грамотного управления судном. При применении выведенной в предлагаемом исследовании формулы достигается одновременно двойной эффект: повышение точности конечных результатов и организация эффективных вычислений за счет оптимизации вычислительных затрат.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, навигационная изоповерхность, концепция навигационного пространства, распараллеливание матричных преобразований, гибридная технология интерполяции, управляемый параметр сглаживания, интерактивный режим, оптимизация сеточных узлов, высокоскоростная обработка информации, варьирование состава вахты.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности/ И.В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

Введение (Introduction)

Числовое поле навигационных параметров в общем виде формализуется уравнением $U = f(\varphi, \lambda)$, определяющим последовательность физических точек, в каждой из которых навигационная функция принимает измеренное значение. Для корректировки пространственно-временного местоположения морского подвижного объекта судоводителем выполняются технические измерения навигационных параметров, при этом результаты измерений составляют по совокупности навигационное поле параметров. Скалярное поле навигационных параметров фактически организуется за счет избыточности измерений для повышения надежности определения места судна. Избыточность формируется при обеспечении дублирования технических измерений альтернативными методами.

Функциональная зависимость $U = f(\varphi, \lambda)$ соотносится с координатами всего многообразия точек скалярного поля и может быть использована в качестве обратной связи для математического вычисления значения любого навигационного параметра в произвольных координатах при известной функциональной зависимости. Навигационное пространство понимается трехмерным, и навигационная изоповерхность при этом играет лидирующую роль как геометрический образ концентрации навигационных изолиний. Навигационную изоповерхность можно трактовать как поверхность точек равных значений навигационных параметров в объеме навигационного пространства.

Поиск вероятнейшего решения эффективно может быть реализован на основе метода наименьших квадратов (МНК). При анализе современного состояния теории математических основ судовождения необходимо отметить, что позиционируется исключительно классическая формула МНК в матричном исчислении:

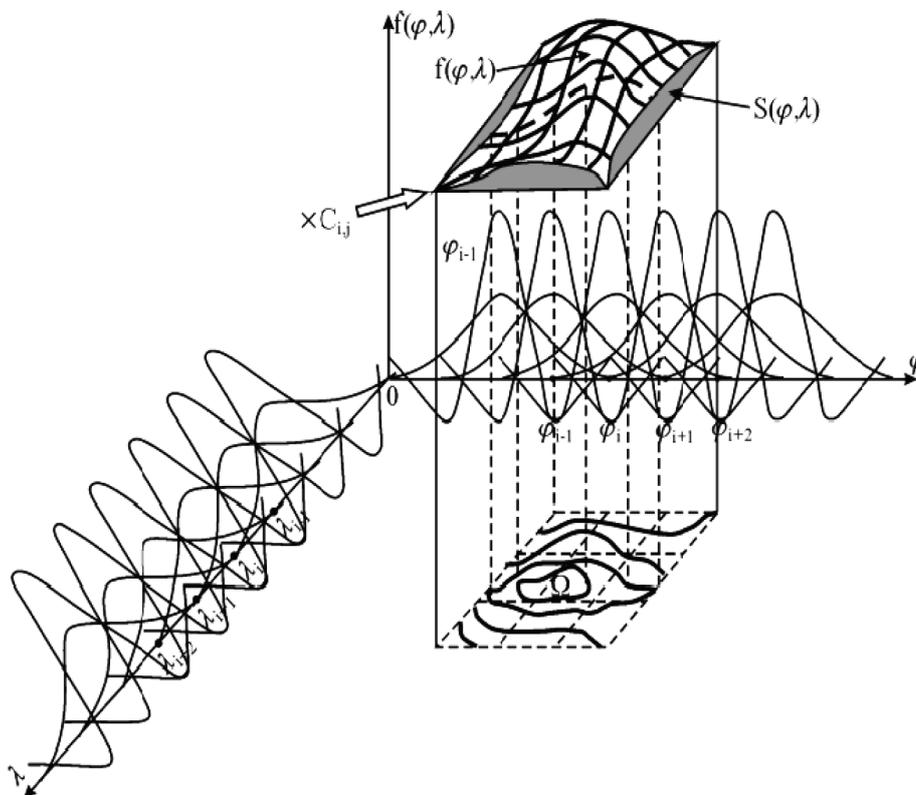
$$\Delta \hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta U, \quad (1)$$

где $\hat{}$ — оптимальность решения по МНК;
 ΔX — вектор искомым неизвестных;
 A — матрица коэффициентов линий положения;
 ΔU — вектор измерений навигационных параметров.

Классический подход позволяет найти адекватное решение. Ситуация кардинально меняется в случае наличия сложного избыточного массива измерений, формирующего навигационную изоповерхность как геометрическую интерпретацию скалярного поля навигационных параметров. Для достижения эффективной способности алгоритма многократно использовать расчетный модуль при решении больших систем линейных алгебраических уравнений актуальной становится задача модификации метода наименьших квадратов МНК с целью оптимальной организации вычислительной процедуры аппроксимации навигационной изоповерхности базисными сплайнами. Использование феномена финитности B -сплайнов в практических приложениях позволяет, ввиду наличия алгоритмической возможности, выполнять компактно сжатие числового массива измерительных данных [1]–[3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Геометрическая интерпретация интерполяции фрагмента гипотетической навигационной изоповерхности показана на рисунке. Восстановление выпуклой оболочки математически реализуется за счет умножения узловых значений базисных финитных функций и сплайновых аналогов Лагранжа на искомые по МНК скалярные коэффициенты при финальном суммировании полученных компонент на каждом выбранном сеточном полигоне.



Геометрическая интерпретация сплайновой интерполяции гипотетического фрагмента навигационной изоповерхности

Система уравнений синтезирования навигационной изоповерхности в блочно-матричной форме по общей аналогии с формулой (1) формально может быть представлена следующим образом:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1 & H_2 \\ E_2 & \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 & \frac{1}{\sqrt{p}} H_2 \end{bmatrix} \times [C] = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

где

$$C = \begin{bmatrix} C_{-k,-m} & C_{-k+1,-m} & \dots & C_{g,-m} \\ C_{-k,-m+1} & C_{-k+1,-m+1} & \dots & C_{g,-m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{-k,h} & C_{-k+1,h} & \dots & C_{g,h} \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{2,1} & \dots & F_{Z_1,1} \\ F_{1,2} & F_{2,2} & \dots & F_{Z_1,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{1,Z_2} & F_{2,Z_2} & \dots & F_{Z_1,Z_2} \end{bmatrix}$$

Клетки блочных матриц E_1 , E_2 и H_1 , H_2 , соответственно, организуются коэффициентами $B_{g,k+1}(\varphi_q)$, $B_{h,m+1}(\lambda_r)$ и $L_{g,k+1}(\varphi_q)$, $L_{h,m+1}(\lambda_r)$:

$$E_1 = \begin{bmatrix} B_{-k,k+1}(\varphi_1) & \dots & B_{g,k+1}(\varphi_1) \\ B_{-k,k+1}(\varphi_2) & \dots & B_{g,k+1}(\varphi_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{-k,k+1}(\varphi_q) & \dots & B_{g,k+1}(\varphi_q) \end{bmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} B_{-m,m+1}(\lambda_1) & \dots & B_{h,m+1}(\lambda_1) \\ B_{-m,m+1}(\lambda_2) & \dots & B_{h,m+1}(\lambda_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{-m,m+1}(\lambda_r) & \dots & B_{h,m+1}(\lambda_r) \end{bmatrix}$$

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

Сдвигом строк клеточных матриц Q_1 и Q_2 можно реализовать ленточные версии данных матриц. Техника оперирования с блочными матрицами производится по аналогичным правилам, как и в случае, когда вместо блоков задействуются простые числовые элементы традиционной матрицы при условии соблюдения размерностей блоков. Клеточную матрицу коэффициентов сформируем в виде произведения двух квазидиагональных матриц Q_1 и Q_2 :

$$(Q_1 \times Q_2) \times C = F.$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} E_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1 \\ E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_2 \end{bmatrix} \quad Q_1^T = \begin{bmatrix} E_1^T \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1^T \\ E_2^T \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \end{bmatrix} \quad Q_2^T = \begin{bmatrix} E_2^T \\ H_2^T \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_2^T \end{bmatrix}$$

Для решения матричной системы (2) в качестве основы используется классическое представление (1), в дальнейшем модифицированное с учетом специфики сплайновой изогеометрии:

$$C = ((Q_1 \times Q_2)^T (Q_1 \times Q_2))^{-1} (Q_1 \times Q_2)^T \times F. \quad (3)$$

Рассмотрим отдельно компоненту

$$((Q_1 \times Q_2)^T (Q_1 \times Q_2))^{-1}.$$

По правилам матричного исчисления преобразуем данное выражение к альтернативному виду:

$$(Q_2^T \times Q_1^T \times Q_1 \times Q_2)^{-1} = (Q_2^T \times Q_1 \times Q_1^T \times Q_2)^{-1}. \quad (4)$$

Введем дополнительные матрицы G_1 и G_2 :

$$G_1 = Q_2^T \times Q_1 = \begin{bmatrix} E_2^T \times E_1 \\ H_2^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} E_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \times E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_2^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2^T \times E_1 \\ H_2^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} E_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \times E_2 \\ \frac{1}{p} H_2^T \times H_1 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = Q_1^T \times Q_2 = \begin{bmatrix} E_1^T \times E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1^T \times H_2 \\ E_2^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^T \times E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1^T \times H_2 \\ E_2^T \times \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \\ \frac{1}{p} H_1^T \times H_2 \end{bmatrix}.$$

Клеточные матрицы G_1 и G_2 можно рассматривать также как прямые суммы:

$$G_1 = E_2^T \times E_1 \oplus \frac{1}{\sqrt{p}} H_2^T \times E_1 \oplus \frac{1}{\sqrt{p}} H_1^T \times E_2 \oplus \frac{1}{p} H_2^T \times H_1;$$

$$G_2 = E_1^T \times E_2 \oplus \frac{1}{\sqrt{p}} E_1^T \times H_2 \oplus \frac{1}{\sqrt{p}} E_2^T \times H_1 \oplus \frac{1}{p} H_1^T \times H_2.$$

Преобразуем выражение (4) на основе использования сформированных матриц G_1 и G_2 :

$$((Q_2^T \times Q_1) \times (Q_1^T \times Q_2))^{-1} = (G_1 \times G_2)^{-1} = (G_2)^{-1} \times (G_1)^{-1}.$$

Выполним подстановку матриц G_1 и G_2 в выражение (3):

$$C = (G_2)^{-1} \times (G_1)^{-1} \times Q_2^T \times Q_1^T \times F = (G_2)^{-1} \times Q_2^T \times (G_1)^{-1} \times Q_1^T \times F. \quad (5)$$

Внесем под операцию транспонирования множитель $(G_1)^{-1} \times Q_1^T$, используя результат действия двойного транспонирования:

$$(((G_1)^{-1})^T)^T = (G_1)^{-1}.$$

В этом случае выражение (5) преобразуется следующим образом:

$$C = (G_2)^{-1} \times Q_2^T \times Q_1 \times (((G_1)^{-1})^T)^T \times F. \quad (6)$$

Свойство коммутативности применительно к третьему–пятому множителю выражения (6) дает композиционное представление:

$$Q_1 \times (((G_1)^{-1})^T)^T \times F = F^T \times Q_1 \times ((G_1)^{-1})^T.$$

Результат исследуемой перестановочности позволяет преобразовать выражение (6) к симметричному виду:

$$C = (G_2)^{-1} \times Q_2^T \times F^T \times Q_1 \times ((G_1)^{-1})^T.$$

При использовании тождества $((G_1)^{-1})^T = ((G_1)^T)^{-1}$ получим в конечном виде модифицированную формулу МНК с симметричным распараллеливанием перемножения блочных матриц:

$$C = (G_2)^{-1} \times Q_2^T \times F^T \times Q_1 \times ((G_1)^T)^{-1}. \quad (7)$$

Аналог МНК в модифицированном представлении позволяет организовать устойчивую в вычислительном смысле расчетную процедуру за счет реализации стратегии распараллеливания вычислительных операций в контексте облачной технологии [4], [5].

Результаты (Results)

При практическом применении B -сплайна, обеспечивающего максимальную точность приближения навигационной изоповерхности, необходимо выполнение дополнительного функционала по МНК:

$$\sum_{q=1}^g \sum_{r=1}^h \left[F_{q,r} - \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} \right]^2 \leq S.$$

Оптимальный выбор параметра сглаживания S позволяет наилучшим образом решать проблему сглаживания результатов измерений в условиях отсутствия точных сведений о характере навигационной изоповерхности. Прерогативой пользователя является задание значений S в интерактивном режиме, что создает возможность построить B -сплайн, достаточно точно синтезирующий выпуклую оболочку. Профессор Карл де Бор проиллюстрировал яркой метафорой оптимальный подбор управляющего коэффициента, образно сравнив его с абстрактным ключом, после удачного поворота которого можно получить удовлетворительную аппроксимацию данных.

Практически использование S необходимо для нивелирования случайных погрешностей измерений. По сути, параметр S представляет наилучший эмпирический компромисс между интерполяцией и аппроксимацией в зависимости от точности результатов измерений навигационных параметров. Если располагают точной измерительной информацией, то применяется интерполяция $S = 0$, и базисные сплайны играют ведущую роль. Если известны только приближенные данные о навигационной функции или в измерениях присутствует погрешность, то при $S = \text{const}$ реализуется аппроксимация. Варьирование параметром сглаживания S позволяет решать задачу аппроксимации навигационных изоповерхностей любой степени сложности.

Оптимальный подбор параметра сглаживания удобно осуществлять в интерактивном режиме [6] за экраном графического дисплея. Разработанная математическая модель является чрезвычайно гибкой конструкцией, позволяющей осуществить интуитивный выбор параметра сглаживания. Компьютерный диалог с пользователем позволяет достигнуть точной аппроксимации навигационной изоповерхности за счет возможности априорного задания параметра S с визуальной оценкой конечного результата.

Решения на основе оптимизированного алгоритма аппроксимации навигационной изоповерхности на основе базисных финитных и сплайнов лагранжевого типа представляют наилучший компромисс в теории приближения функций между полиномиальной и сплайн-аппроксимацией. Если весовой коэффициент $p \rightarrow \infty$, то прерогатива восстановления изоповерхности отводится B -сплайнам, а при $p \rightarrow 0$ второе–четвертое уравнения гибридной модели [7] аппроксимации навигационной изоповерхности определяют превосходство кусочных полиномов Лагранжа. В конкретной ситуации практического применения предлагаемого в настоящей работе метода нивелируются ограничения конкурирующих математических методов и максимальным образом используются преимущества каждого подхода.

Модифицированная формула МНК (7) с симметричным клеточным матричным распределением фактически является математической декомпозицией алгоритма синтеза навигационной изоповерхности, что позволяет равномерно распараллелить вычисления на многопроцессорной технике и проводить серии вычислительных экспериментов с многоточечным набором сеточных узлов в течение обозримого компьютерного времени.

Обсуждение (Discussion)

Теоретической предпосылкой развития методов сплайн-функций в практических приложениях послужила знаменитая теорема Вейерштрасса, утверждающая возможность сколь угодно точного приближения непрерывной функции многочленами путем оптимального подбора их степени и коэффициентов [8]. Теорема только утверждает, что многочлен, приближающий функцию с заданной точностью, существует, но при этом отсутствует информация о том, как его построить. Необходимо учитывать тот факт, что увеличение степени интерполяционного многочлена не всегда ведет к улучшению аппроксимации [9]. Ситуация может быть улучшена при условии применения оптимизационных схем организации узлов интерполяции [10]–[12]. Однако далеко не всегда имеется практическая возможность такого выбора. Чаще всего сеточные данные задаются по условию задачи, а следовательно, последствия аппроксимации непредсказуемы. Расходимость ведет к еще более худшим результатам по причине того, что восстановление приближаемой функции может ухудшаться с уменьшением шага полигональной сетки [13].

Применение сплайнов является логическим развитием идеи многочленной интерполяции при специально подобранных сеточных данных. Если функция, подлежащая аппроксимации, имеет особенности в некоторых точках на сеточных интервалах, то она плохо приближается на всем интервале, но этой общей зависимости от локальных свойств можно избежать при использовании способности «склеенной» кусочной кривой к изгибанию в пространстве [14].

Заключение (Conclusion)

Использование преимущества по быстродействию формулы (7) при ее реализации на микропроцессорном уровне в бортовом компьютере может обеспечить возможность варьирования состава вахты на мостике в зависимости от реальной скорости обработки навигационной информации. Анализ поступающей информации в масштабе реального времени позволяет использовать минимальный состав вахты, так как исключается ситуация затруднительности судоводителем оценки потока данных. Как известно, вахтенная служба должна быть достаточной и соответствовать условиям плавания при обеспечении непрерывного надлежащего наблюдения. Капитан обязан усилить вахтенную службу, если любые обстоятельства не позволяют вахтенному персоналу обеспечить безопасность судна. Конкретный аспект применимости высокоскоростной обработки информации является одним из факторов, оказывающих влияние на эффективность несения вахты, который может позволить предотвратить ситуацию необходимости вызова дополнительных судоводителей и тем самым избежать избыточной усталости экипажа. Высокоскоростная обработка навигационной информации и наглядное представление ее в эргономическом для восприятия виде концентрирует внимание вахтенной службы на адекватной оценке обстановки, содействуя принятию правильного решения в вопросе грамотного управления морским подвижным объектом.

Впервые представленная модифицированная формула МНК может позволить оперативно обрабатывать избыточные массивы измерений навигационных параметров большой емкости в масштабе реального времени. При применении выведенной в предлагаемом исследовании формулы достигается одновременно двойной эффект: повышение точности конечных результатов [7] и организация высокоскоростных вычислений за счет оптимизации вычислительных затрат. Математическая модель восстановления навигационной изоповерхности эффективно реализуется при использовании формулы (7).

Вычислительной трансформации в процессе проведения компьютерных расчетов подвергаются все матричные компоненты [15], в том числе правая часть уравнения (2), а также искомая матрица

неизвестных коэффициентов [С]. В результате применения полученной формулы влияние погрешностей округления на результаты компьютерных расчетов окажется несущественным. Поэтому веский аргумент в использовании распараллеливания матричных преобразований, согласно предлагаемой методике, является актуальным для обеспечения устойчивости вычислительной процедуры. Кроме того, логично выбор аппроксиманта сделать до практического использования формулы (7), тогда модифицированной вариант МНК восполнения навигационной изоповерхности позволит реализовать на выбор пользователя такие алгоритмические преимущества, как быстродействие или экономию оперативной памяти. В первом случае необходимо предварительно рассчитать сплайновые коэффициенты и хранить их в специальном массиве данных. При этом отсутствует алгоритмическая необходимость каждый раз заново пересчитывать скалярные множители, достаточно сделать это один раз вначале, так как формирование матриц зависит от известных сеточных данных и выбранного конкретного вида сплайна. Быстродействие обеспечивается за счет простого обращения к фиксированным ячейкам компьютерной памяти. Во втором случае коэффициенты рассчитываются по запросу и не подлежат длительному хранению, но при этом получается выигрыш в экономии компьютерных ресурсов памяти. Таким образом, конструкция нового вида МНК является оптимальным вычислительным методом. Сопоставимый результат в современных научных публикациях отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квасов Б. И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами: дис. ... д-ра техн. наук / Б. И. Квасов. — Новосибирск, 1997. — 256 с.
2. Свиньин С. Ф. Фinitные базисные функции в задачах формирования выборок сигналов конечной протяженности / С. Ф. Свиньин, А. И. Попов // Труды СПИИРАН. — 2015. — № 6 (43). — С. 50–67.
3. Гатилов С. Ю. Алгоритмы и программные средства для пересечения трехмерных тел в граничном представлении: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Ю. Гатилов. — Новосибирск, 2016. — 16 с.
4. Квасов Б. И. Распараллеливание вычислений при построении интерполяционных гиперболических сплайнов / Б. И. Квасов // Труды четвертой Сибирской школы-семинара по параллельным и высокопроизводительным вычислениям. — 2008. — С. 37–52.
5. *Bhimani J.* FiM: Performance Prediction for Parallel Computation in Iterative Data Processing Applications / J. Bhimani, N. Mi, M. Leeser, Z. Yang // 2017 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). — IEEE, 2017. — Pp. 359–366. DOI: 10.1109/CLOUD.2017.53.
6. *Angel E.* Interactive Computer Graphics: A Top-Down Approach with WebGL / E. Angel, D. Shreiner. — Pearson, Boston, 2014. — 736 p.
7. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных фinitных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
8. Мирошниченко П. В. Автоматизация проектирования процесса намотки авиационных конструкций на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов: дис. ... канд. техн. наук / П. В. Мирошниченко. — М., 2014. — 119 с.
9. *Ebrahimi A.* A composite iterative procedure with fast convergence rate for the progressive-iteration approximation of curves / A. Ebrahimi, G.B. Loghmani // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2019. — Vol. 359. — Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2019.03.025.
10. *Zhang Y.* B-Spline Surface Fitting with Knot Position Optimization / Y. Zhang, J. Cao, Z. Chen, X. Li, X.M. Zeng // Computers and Graphics. — 2016. — Vol. 58. — Is. C. — Pp. 73–83. DOI: 10.1016/j.cag.2016.05010.
11. *Ebrahimi A.* Shape modeling based on specifying the initial B-spline curve and scaled BFGS optimization method / A. Ebrahimi, G.B. Loghmani // Multimedia Tools and Applications. — 2018. — Vol. 77. — Is. 23. — Pp. 30331–30351. DOI: 10.1007/s11042-018-6109-z.
12. *Ebrahimi A.* B-spline Curve Fitting by Diagonal Approximation BFGS Methods / A. Ebrahimi, G. B. Loghmani // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A.Science. — 2019. — Vol. 43. — Is. 3. — Pp. 947–958. DOI: 10.1007/s40995-017-0347-1.
13. *Liew K. J.* B-Spline Surface Fitting on Scattered Points / K. J. Liew, A. Ramli, A. A. Majid // Applied Mathematics & Information Sciences. — 2016. — Vol. 10. — Is. 1. — Pp. 273–281. DOI: 10.18576/amis/100128.

14. Дорощев А. А. Моделирование и обработка числовых данных с помощью унифицированной технологии построения интерполяционных сплайнов: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Дорощев. — Новочеркасск, 2016. — 231 с.

15. Gatilov S. Y. Using low-rank approximation of the Jacobian matrix in the Newton-Raphson method to solve certain singular equations / S. Y. Gatilov // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2014. — Vol. 272. — Pp. 8–24. DOI: 10.1016/j.cam.2014.04.024.

REFERENCES

1. Kvasov, B. I. *Metody izogeometricheskoy approksimatsii splaynami*. Dr. Diss. Novosibirsk, 1997.
2. Svinyin, Sergey Fedorovich, and Aleksandr Igorevich Popov. “Finite Basic Functions in the Tasks of Sampling Signals of Finite Extension.” *SPIRAS Proceedings* 6(43) (2015): 50–67.
3. Gatilov, Stepan Yu. *Algoritmy i programmnye sredstva dlya peresecheniya trekhmernykh tel v granichnom predstavlenii*. Abstract of PhD diss. Novosibirsk, 2016.
4. Kvasov, B. I. “Rasparallelivanie vychisleniy pri postroenii interpolatsionnykh giperbolicheskikh splaynov.” *Trudy chetvertoy Sibirskoy skoly-seminara po parallel'nym i vysokoproizvoditel'nykh vychisleniyam*. 2008. 37–52.
5. Bhimani, Janki, Ningfang Mi, Miriam Leiser, and Zhengyu Yang. “FiM: Performance Prediction for Parallel Computation in Iterative Data Processing Applications.” *2017 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. IEEE, 2017. 359–366. DOI: 10.1109/CLOUD.2017.53.
6. Angel, E., and D. Shreiner. *Interactive Computer Graphics: A Top-Down Approach with WebGL*. Pearson, Boston, 2014.
7. Yuyukin, Igor V. “Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
8. Miroshnichenko, P. V. *Avtomatizatsiya proektirovaniya protsessa namotki aviatsionnykh konstruktsiy na osnove primeneniya lokal'no-approksimatsionnykh splaynov*. PhD diss. M, 2014.
9. Ebrahimi, Alireza and Ghasem Barid Loghmani. “A composite iterative procedure with fast convergence rate for the progressive-iteration approximation of curves.” *Journal of Computational and Applied Mathematics* 359 (2019): 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2019.03.025.
10. Zhang, Yuhua, Juan Cao, Zhonggui Chen, Xin Li, and Xiao-Ming Zeng. “B-Spline Surface Fitting with Knot Position Optimization.” *Computers and Graphics* 58.C (2016): 73–83. DOI: 10.1016/j.cag.2016.05.010.
11. Ebrahimi, Alireza and Ghasem Barid Loghmani. “Shape modeling based on specifying the initial B-spline curve and scaled BFGS optimization method.” *Multimedia Tools and Applications* 77.23 (2018): 30331–30351. DOI: 10.1007/s11042-018-6109-z.
12. Ebrahimi, Alireza and Ghasem Barid Loghmani. “B-spline Curve Fitting by Diagonal Approximation BFGS Methods.” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A.Science* 43.3 (2019): 947–958. DOI: 10.1007/s40995-017-0347-1.
13. Liew, Khang Jie, Ahmad Ramli, and Ahmad AbdulMajid. “B-Spline Surface Fitting on Scattered Points.” *Applied Mathematics & Information Sciences* 10.1 (2016): 273–281. DOI: 10.18576/amis/100128.
14. Doroshchev, A. A. *Modelirovanie i obrabotka chislovykh dannykh s pomoshch'yu unifikirovannoy tehnologii postroeniya interpolatsionnykh splaynov*. PhD diss. Novocheerkassk, 2016.
15. Gatilov, Stepan Yu. “Using low-rank approximation of the Jacobian matrix in the Newton-Raphson method to solve certain singular equations.” *Journal of Computational and Applied Mathematics* 272 (2014): 8–24. DOI: 10.1016/j.cam.2014.04.024.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 29 мая 2019 г.
 Received: May 29, 2019.

ESTIMATION OF THE EMOTIONAL LOAD ON THE NAVIGATORS UNDER THE CONDITIONS OF HEAVY TRAFFIC

V. M. Grinyak^{1,2,3}, A. S. Devyatisilnyi², A. V. Shulenina³

¹ — Vladivostok State University of Economics and Service,
Vladivostok, Russian Federation

² — Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, Russian Federation

³ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The navigational safety of marine traffic is considered in the paper. The problem of determining the degree of danger of traffic scheme applied in a certain water area is examined. In addition to the technical and natural factors, the nature of the psychological and emotional stress on navigators should also be taken into account when assessing the risk of a traffic pattern, which is especially important in high traffic density. Metric of this or that section of the water area is suggested to be introduced as one of possible variations based on the 'room-of-maneuver' model by Mitrofanov and Degre, Lefevre. The purpose of this work is to study the mathematical models and traffic danger estimation techniques which are deemed to be implemented in forward-looking intellectual traffic control systems.

Despite the rich arsenal of mathematical techniques for solving the problem of traffic control for various types of transport (optimization techniques, genetic algorithms, game theory techniques and others), generation of real traffic schemes for a specific water area on the basis of formal mathematical presentation of the problem is almost impossible. The cause is a large number of informal locations (positions/statements) used in the navigational practice, which are formed due to the professional experience. That is why a traffic scheme is determined as a rule on the base of the experts analysis. It requires the development of mathematical apparatus which allows us to estimate the degree of safety of existing traffic schemes and ensures support in decision-making in the process of their planning. Without such optimization of traffic schemes the further growth of the traffic in heavy traffic areas will finally increase the dangerous situations.

The measure of emotional load is a degree and nature of filling the 'room-of-maneuver' chart, the ratio of dangerous and safe values of speed and course of the vessel at heavy traffic conditions. The characteristic values of this metric for a specific marine area are an important and informative indicator that determines the navigational safety. A promising way to estimate metrics is to use data from the Automatic Identification System. A model of traffic data available on open Internet resources, as well as a way to bring them to a form suitable for analysis, is presented in the paper.

The work is accompanied by the results of the study made on location. Estimation analysis of danger of traffic in the waters of the Tsugaru Strait and the Inland Sea of Japan has been presented.

Keywords: navigation safety, route planning, traffic intensity, emotional load, AIS.

For citation:

Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Alena V. Shulenina. "Estimation of the emotional load on the navigators under the conditions of heavy traffic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651.

УДК 519.68:15:681.5

ОЦЕНКА ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА СУДОВОДИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

В. М. Гриняк^{1,2,3}, А. С. Девятисильный², А. В. Шуленина³

¹ — Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Российская Федерация

² — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

³ — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

Рассмотрена проблема обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. Отмечается, что в условиях интенсивного трафика безопасность движения судов может быть обеспечена только при соблюдении ими определенной схемы движения, зависящей от географии акватории, общих и локальных правил судоходства, а также неформальных составляющих морской практики. В работе ставится задача оценки степени опасности актуальной схемы движения той или иной акватории. Отмечается, что наряду с техническими и природными факторами при оценке опасности схемы движения следует учитывать также характер психологической и эмоциональной нагрузки на судоводителей, что особенно является особенно важным в условиях высокой плотности движения. С целью формализации эмоционального аспекта нагрузки на судоводителей предложена метрика, основанная на известной идее «области маневра» Дегре и Лефевра. Подчеркивается, что мерой, характеризующей эмоциональную нагрузку, является степень и характер заполнения диаграммы «скорость – курс», соотношение опасных и безопасных значений скорости и курса судна в условиях коллективного движения. Характерные значения указанной метрики для конкретной морской акватории являются важным информативным показателем, определяющим навигационную безопасность движения. Перспективным способом оценки метрики является использование данных автоматической идентификационной системы. В работе приведена модель данных о движении, доступных на открытых интернет-ресурсах, а также способ их приведения к виду, удобному для анализа. Работа завершается результатами расчетов выполнена оценка опасности трафика нескольких акваторий с разной интенсивностью движения (Сангарский пролив, Внутреннее Японское море). Сделан вывод о том, что на основе предложенного подхода можно построить устойчивую картину участков морских акваторий, характеризующихся высокой эмоциональной нагрузкой на судоводителей. Данная информация представляет большую ценность для участников движения и береговых служб.

Ключевые слова: безопасность судоходства, планирование маршрута, интенсивность движения, эмоциональная нагрузка, АИС.

Для цитирования:

Гриняк В. М. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, А. В. Шуленина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651.

Введение (Introduction)

Обеспечение навигационной безопасности движения судов является основной задачей, решаемой при эксплуатации водных транспортных путей [1]–[3]. В зонах активного судоходства она выполняется с помощью использования целого комплекса средств и инструментов: береговых систем управления движением судов (СУДС), бортовых навигационных систем, правил судоходства. Последние основаны на «Международных правилах предупреждения столкновений судов в море» (МППСС-72) [4]. При определении правил судоходства для конкретной акватории общие принципы МППСС дополняются локальными положениями, определяемыми ее спецификой. Результаты известных исследований [5], [6] показали, что в условиях интенсивного трафика безопасность движения судов может быть обеспечена только при соблюдении ими определенной схемы движения, зависящей от географии акватории. Выбор конкретного варианта такой схемы из множества возможных осуществляется с учетом обеспечения максимальной безопасности движения и практических аспектов судоходства.

Для решения задач организации движения различных видов транспорта существует множество хорошо разработанных математических моделей и методов (например, методы оптимизации [7]–[9], метод теории игр [10], генетические алгоритмы [11] и др. Вместе с тем судоходство включает множество неформальных положений, связанных с личным и коллективным профессиональным опытом работы в различных условиях [12]–[13]: погода, время суток, квалификация экипажа, менталитет участников движения и т. п. Поэтому выработка схемы движения судов на основе строго математического подхода вряд ли возможна. Определить схему движения на конкретной акватории можно лишь на основе всестороннего экспертного анализа различной информации об акватории с учетом сложившейся судоводительской практики [14]–[16]. Среди факторов, определяющих навигационную безопасность движения на акватории, можно выделить следующие [17], [18]:

- интенсивность движения (количество) судов и расстояние между ними (плотность) на том или ином участке;
- характерная скорость движения и размеры судов, интенсивность их маневрирования;
- гидрографические и метеоусловия условия на акватории (течения, мели, ветер, волнение, видимость);
- степень обеспеченности акватории навигационными средствами (наличие маяков, буев, класс СУДС).

Наряду с техническими и природными факторами при оценке опасности схемы движения следует учитывать также характер психологической и эмоциональной нагрузки на судоводителей, которая обусловлена, в том числе сложностью окружающей навигационной обстановки и принятия управленческих решений. Возможным подходом к формализации такой сложности является оценка множества опасных и безопасных значений скорости и курса управляемого судна в условиях коллективного движения [19], [20].

В настоящей работе рассматривается модель оценки эмоциональной нагрузки на судоводителей, основанная на классической идее «области маневра» Дегре и Лефевра [21]–[23]. Метрикой (мерой) нагрузки являются степень и характер заполнения соответствующей диаграммы *скорость – курс* (в простейшем варианте метрика представляется долей опасных значений скоростей и курсов движения судна). Определение характерных значений метрики в той или иной точке акватории позволяет оценить степень опасности схемы движения и дать рекомендации по ее изменению к менее опасной конфигурации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Традиционно будем рассматривать модель опасности коллективного движения на акватории как совокупность опасных ситуаций *судно – судно* для каждой пары судов. Рассмотрим два судна с координатами $x^{(1)}, y^{(1)}$ и $x^{(2)}, y^{(2)}$ и компонентами вектора скорости $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$ и $v_x^{(2)}, v_y^{(2)}$. Опишем взаимное относительное движение судов следующими величинами: $s = (r_x, r_y, v, \eta_v)$, где $v = \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2}$ — скорость относительного движения судов, $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$, $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$ — компоненты вектора относительного положения судов \mathbf{r} , η_v — направление вектора \mathbf{v} скорости относительного движения судов (рис. 1).

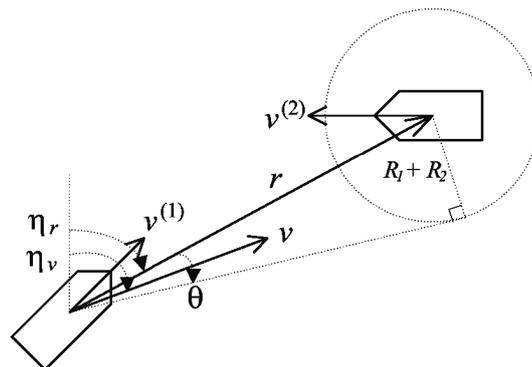


Рис. 1. Модель относительного движения двух судов

Принято считать, что для безопасного движения суда должны соблюдать зону навигационной безопасности судна [24], так называемый *корабельный домен*, в отношении которого имеется множество определений и толкований. В настоящей работе имеется в виду зона навигационной безопасности, жестко связанная с судном n и задаваемая окружностью радиусом R_n . На рис. 1 показаны следующие величины, описывающие навигационную ситуацию *судно – судно*: θ — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами доменов (считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» друг в друга); η_r — азимут вектора \mathbf{r} .

Введем следующие величины: T — время, оставшееся до максимального сближения судов (ТСРА); T_* — пороговое значение времени T . Формализуем опасное сближение двух судов следующим образом:

$$|\eta_v - \eta_r| < \theta; \quad (1)$$

$$0 < T < T_*. \quad (2)$$

Условие (1) соответствует ситуации, когда при равномерном и прямолинейном движении судов точка их кратчайшего сближения окажется внутри зоны навигационной безопасности хотя бы одного из судов, т. е. суда опасно сближаются. Условие (2) выбирает из общего множества те суда, у которых время до сближения меньше порогового.

Представим опасные и безопасные значения параметров движения судна известной диаграммой *скорость – курс* [21]–[23] («область маневра» по Дегре и Лефевру [21]), которая строится следующим образом. Пусть первое судно будет управляемым (Own Ship), а второе считается судном-целью (Target Ship). Определим, согласно геометрическим представлениям (1) и (2), множество «опасных» значений вектора v . При переходе от относительного движения судов к абсолютному получим соответствующее множество «опасных» значений вектора скорости первого судна $v^{(1)}$ путем параллельного переноса сектора «опасных» значений вектора v на вектор $v^{(2)}$ (заштрихованная часть рис. 2). Здесь окружностью радиуса $v_{\max}^{(1)}$ показаны максимально возможные значения скорости первого судна. Такое наглядное визуальное представление опасных и безопасных параметров движения управляемого судна дает возможность судоводителям эффективно принимать решения для предупреждения опасного сближения. Например, в рассмотренном случае первому судну следует либо уменьшить скорость, либо изменить курс так, чтобы вектор $v^{(1)}$ вышел из заштрихованной зоны.

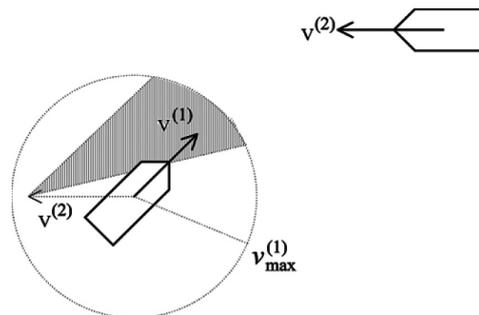


Рис. 2. Принцип построения диаграммы *скорость – курс*

Рассмотрим модельный пример, иллюстрирующий суть предлагаемой метрики эмоциональной нагрузки на судоводителей. На рис. 3 показано положение управляемого судна *I* и положение двух судов-целей. Относительные координаты судна *II* равны (3000, 3000) м, его вектор скорости равен (–5, –5) м/с. Относительные координаты судна *III* равны (1000, 400) м, оно движется с вектором скорости (–5, 0) м/с.

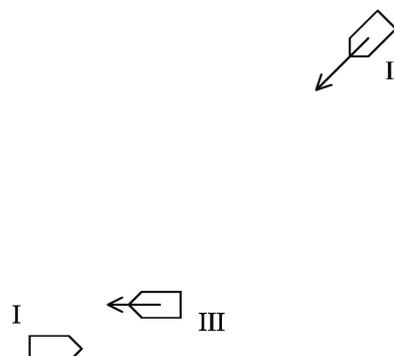


Рис. 3. Положение, курсы и скорости судов-целей *II* и *III* и управляемого судна *I*

Множество опасных значений скорости и курса первого судна для навигационной ситуации рис. 3 показано на рис. 4. Здесь v_x и v_y — компоненты вектора скорости судна I . Пороговое значение времени T_* принималось равным 300 с, радиусы зон навигационной безопасности R_n задавались равными 150 м. Красным цветом показаны опасные значения вектора скорости, определенные для пары судов $I-II$, желтым — для пары судов $I-III$. Видно, что опасными можно считать около 15 % возможных значений скорости и курса управляемого судна.

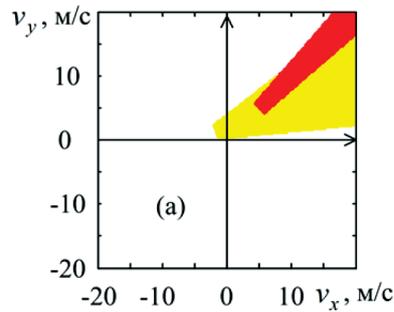


Рис. 4. Визуальное представление опасных и безопасных значений скоростей и курсов

Степень и характер заполнения диаграммы *скорость – курс* дает представление о сложности принятия решений судоводителем в складывающейся навигационной обстановке. Таким образом, метрикой эмоциональной нагрузки на судоводителей можно считать, например, долю опасных значений скоростей и курсов движения судна. Характерные значения указанной метрики для конкретной морской акватории являются важным информативным показателем, определяющим навигационную безопасность движения. Ее высокое значение служит сигналом для тщательного изучения существующей схемы движения и, возможно, выработки новой схемы, обеспечивающей более безопасное движение. Перспективным способом оценки метрики является использование данных автоматической идентификационной системы (АИС) [25], доступных на открытых интернет-ресурсах типа [26].

Ретроспективные данные о движении судов, формируемые на основе информации с ресурсов типа [26], представляют собой множество записей вида

$$\{SID, LAT, LON, SPEED, COURSE, TIME, AGE\}, \quad (3)$$

где SID — идентификатор судна; LAT — географическая широта; LON — географическая долгота; $SPEED$ — скорость движения; $COURSE$ — курс; $TIME$ — время поступления данных; AGE — возраст данных, определяющий фактический момент времени, которому они соответствуют.

Обновление данных происходит один раз в 60 с, фактическое время обновления данных задается параметром AGE и происходит, как правило, реже. Данные по интенсивно маневрирующим судам (например, в акватории морских портов) обновляются один раз в 1–3 мин. Возраст данных для судов, движущихся прямолинейно и равномерно (по морским трассам), может достигать нескольких часов.

При моделировании движения судна по конкретной локальной акватории целесообразно перейти от географических координат судна к местным прямоугольным, преобразовав их по правилу:

$$x = R \cos(LAT) \sin(LON - LON^*);$$

$$y = R \sin(LAT - LAT^*).$$

Здесь R — средний радиус Земли при представлении ее сферой; LAT^* и LON^* — соответственно широта и долгота точки, принимаемой за начало местной прямоугольной системы координат.

Поскольку характерные размеры локальных акваторий обычно не превышают сотни километров, погрешности, обусловленные представлением Земли сферой, а не эллипсоидом или геоидом, будут несущественными. В результате имеем следующие уравнения движения каждого судна, находящегося на акватории:

$$x(t) = x(t_0) + SPEED \sin(COURSE)(t - t_0);$$

$$y(t) = y(t_0) + SPEED \cos(COURSE)(t - t_0).$$

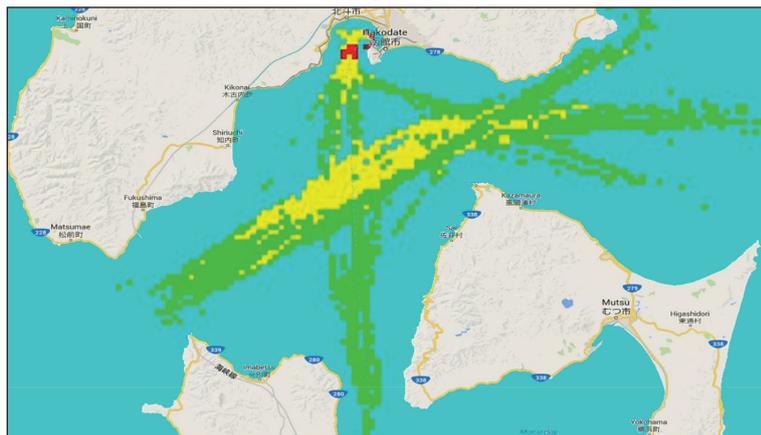
Здесь $x(t)$, $y(t)$ — координаты судна в момент времени t ; t_0 — момент времени, соответствующий возрасту данных, так что $t_0 = TIME - AGE$.

На практике из множества данных вида (3) по каждому судну следует выбирать данные с наименьшим возрастом AGE как наиболее достоверные. Имея множество записей подобного вида, можно, согласно описанной методике, определить долю опасных значений скоростей и курсов движения каждого судна в каждый момент времени. Разбивая акваторию на участки и вычисляя значения указанной метрики для проходящих по ним судов, можно оценить характерные (например, средние) значения метрики для каждого участка акватории.

Результаты (Results)

Исследования проводились на ретроспективных массивах данных о движении судов, полученных с ресурса [26] с помощью специально созданной программной системы [27]; была оценена опасность трафика нескольких акваторий с разной интенсивностью движения. На рис. 5 показаны средние значения доли опасных значений скоростей и курсов судов, движущихся в Сангарском проливе (см. рис. 5, а) и в акватории Внутреннего Японского моря (см. рис. 5, б).

а)



б)

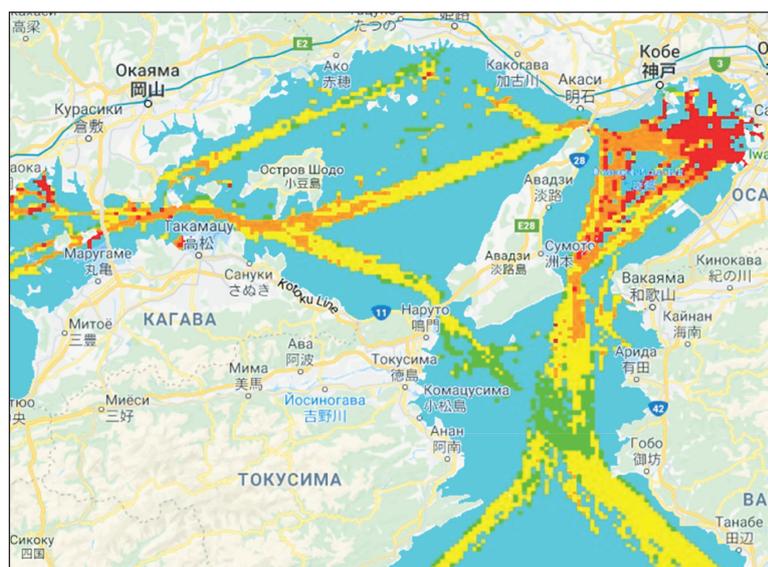


Рис. 5. Средние значения доли опасных скоростей и курсов судов:
 а — Сангарский пролив; б — Харимское море и залив Осака

Акватория разбита на квадратные участки со стороной 1000 м, радиус зоны навигационной безопасности R_n задавался равным длине корпуса судна. Зеленым цветом отмечены участки с долей опасных скоростей и курсов 20–50 %, желтым — 50–80 %, оранжевым — 80–90 %, красным — более 90 %. Можно считать, что на участках зеленого цвета судоводителю легко принимать решение, на участках желтого цвета от него требуется повышенное внимание, участки оранжевого и красного цвета характеризуются сложной навигационной обстановкой и предполагают высокую сосредоточенность и эмоциональную напряженность судоводителей.

На рис. 5, а видно, что нагруженной является лишь центральная часть Сангарского пролива, находящаяся в зоне пересечения судопотоков *север – юг* и *запад – восток*, а также воды, прилегающие к порту Хакодате. Существенное изменение схемы движения в проливе, скорее всего, неактуально.

Внутреннее Японское море — высоконагруженная акватория со сложной гидрографией. На рис. 5, б видно, что основные фарватеры, проходящие в Харимском море, требуют повышенного внимания (основной цвет метрики желтый, имеются небольшие оранжевые участки на западе). Залив Осака также является довольно сложным, суда постоянно движутся в окружении друг друга, особенно в восточной части залива. Это свидетельствует о том, что судоводителям нужно планировать работу с учетом повышенной нагрузки и быстрой усталости (например, ставить на мостик наиболее опытных членов экипажа с дублерами, а также прибегать к услугам лоцмана). Для регулирующих служб это может служить сигналом о необходимости изменения правил движения в этой части акватории).

Обсуждение (Discussion)

Оценка опасности трафика морской акватории может быть проведена с использованием различных подходов. Например, традиционно интенсивность движения оценивается как число судов, проходящих в единицу времени через тот или иной участок акватории. Такая оценка реализована, например, на ресурсе [26], а также в работах [18], [28]. Вместе с тем интенсивность сама по себе свидетельствует об опасности движения лишь косвенно: трафик может быть *плотным, но безопасным* или *разреженным, но опасным*.

Более информативной является оценка характерной частоты наступления опасных ситуаций [29]–[31], моделирующая работу системы предупреждения столкновений, так как она позволяет выделять наиболее проблемные участки акваторий, не давая при этом пути к снижению их загруженности. Известен также подход, связанный с оценкой безопасности движения судов в стесненных условиях: узкие фарватеры, малые допустимые радиусы поворота, сложная гидрография и др. Так, в работе [6] рассматривается модель многофакторного анализа трафика для судов различных классов, приведены примеры оценок для акватории Финского залива, учитываются как факторы, связанные с динамикой движения судна, так и ограниченность множества возможных управленческих решений.

Подход, представленный в настоящем исследовании, позволяет оценить сложность принятия решения судоводителями, работающими как «на борту» (капитан судна), так и «на берегу» (оператор береговой СУДС) с учетом специфики коллективного движения. Метод выявляет потенциальную, скрытую и «нереализованную» опасность трафика, которая может переходить в реальные опасные ситуации при неблагоприятном стечении обстоятельств: ухудшение видимости, сбой в работе навигационного оборудования, неправильные команды диспетчера и т. п.

Предложенные метрики интенсивности и опасности представляют собой попытку формализовать психологическую, эмоциональную нагрузку на участников движения. Представление навигационной ситуации в виде диаграмм *скорость – курс* и их анализ позволяют, в принципе, выработать рекомендации по уменьшению доли опасных значений скоростей и курсов, что является одним из преимуществ изучаемого подхода. Несмотря на то, что в рамках настоящей статьи в качестве препятствий рассматривались только другие суда, предложенная метрика легко может быть дополнена с учетом особенностей фарватеров, береговой линии, запрещенных для плавания районов и т. п.

Анализ данных о движении с точки зрения различных метрик интенсивности и опасности дает возможность дать комплексную оценку трафика морской акватории. Сопоставление результатов оценки опасности движения на акватории указанных ранее методов можно представить в следующем иерархическом порядке по значимости факторов опасности:

- географические и гидрографические факторы;
- характерная частота наступления опасных ситуаций;
- характерная доля опасных значений скоростей и курсов движения (предлагаемый метод);
- интенсивность движения.

Таким образом, предлагаемый в статье подход способен гармонично дополнить существующее множество методов оценки опасности движения на акватории, раскрывая еще один аспект многогранного понятия «опасная ситуация».

В качестве меры нагрузки на судоводителей в работе рассматриваются средние значения доли опасных скоростей и курсов судов. Наряду с этим возможно использование других характеристик диаграммы *скорость – курс*: степени заполненности, моды, числа, распределения и площади областей связности и т. п. Вопрос связи различных параметров диаграммы *скорость – курс* с эмоциональной нагрузкой и формальной неопределенностью при принятии решений требует дополнительного исследования.

Исходные траекторные данные характеризуются большим объемом. Так, например, при построении рис. 5, б был обработан массив из более чем 1 млн записей вида (3), формирование, хранение и обработка которых требуют разработки специальных программных систем и алгоритмов на основе технологий суперкомпьютеров и больших данных.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Оценка степени опасности морского трафика возможна на основе различных метрик. В настоящей работе предложена метрика, оценивающая сложность принятия решений в условиях коллективного движения и формализующая эмоциональную нагрузку на судоводителей на том или ином участке акватории.

2. При проведении исследований коллективного движения хорошо зарекомендовал себя подход, связанный с использованием данных, предоставляемых АИС. Первичные данные АИС имеют ограниченную доступность для научных коллективов, поэтому возможно использование информации со специализированных интернет-ресурсов. Несмотря на невысокую частоту ее обновления (не чаще одного раза в минуту, но, как правило, гораздо реже), она вполне адекватно отражает особенности трафика морских акваторий. В сводном виде эти данные о движении, даже будучи сильно разреженными, вполне позволяют оценивать такие свойства, как характерная плотность движения [18], частота наступления опасных ситуаций [30], характерная доля опасных значений скоростей и курсов движения, что подтверждается их устойчивым характером (см. рис. 5).

3. Проведенные исследования с использованием реальных данных о движении судов подтвердили перспективность предложенного подхода к оценке характера трафика, на основе которого можно построить устойчивую картину участков морских акваторий, характеризующихся высокой эмоциональной нагрузкой на судоводителей. Данная информация представляет большую ценность для служб, обеспечивающих безопасность движения. Предложенная метрика в комплексе с другими дает возможность оценивать степень опасности актуальной схемы движения на акватории и давать рекомендации по ее изменению к менее опасным конфигурациям.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), пр. 18-07-00132.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-07-00132.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарский Э. А. Безопасность судоходства при проектировании морского порта / Э. А. Гагарский, С. Г. Козлов, С. А. Кириченко // Транспорт: наука, техника, управление. — 2018. — № 1. — С. 14–18.
2. Некрасов С. Н. Метод количественной оценки навигационной безопасности плавания / С. Н. Некрасов // Навигация и гидрография. — 2017. — № 48. — С. 7–17.
3. Ольховик Е. О. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
4. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС- 72). — М.: РКонсульт, 2004. — 80 с.
5. Лентарёв А. А. Применение судовой навигационной аппаратуры для определения статистических характеристик судопотоков / А.А. Лентарёв, М.О. Максимов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 156–158.
6. Лебедева М. П. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
7. Zeng Z. A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles / Z. Zeng, L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, A. Lammas // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Part A. — Pp. 303–313. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.
8. Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов / М. Н. Кирсанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.
9. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation / A. Lazarowska // Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
10. Александров В. А. Аппаратно-программный комплекс для моделирования задач группового управления мобильными роботами / В. А. Александров, А. И. Кобрин // Вестник МЭИ. — 2011. — № 3. — С. 88–95.
11. Каляев И. А. Методы и модели коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с.
12. Студеникин Д. Е. Применение систем принятия решений для выбора параметров маневра судна / Д. Е. Студеникин, А. А. Григорян, Н. А. Маковецкая // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4. — С. 58–62.
13. Tam Ch.K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch.K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
14. Пламмер К. Дж. Маневрирование судов в узкостях / К. Дж. Пламмер. — Л.: Судостроение, 1986. — 80 с.
15. Лобанов А. А. Методические аспекты проектных работ по обеспечению навигационной безопасности плавания в современных условиях / А. А. Лобанов, Ю. В. Румянцев, Д. М. Бухов // Навигация и гидрография. — 2013. — № 35. — С. 29–38.
16. Таратынов В.В. Целесообразность разделения морских путей / В.В. Таратынов // Морской флот. — 1969. — № 9. — С. 19–20.
17. Бродский П. Г. К вопросу оценки влияния интенсивности судоходства на аварийность / П. Г. Бродский, Ю. В. Румянцев, С. Н. Некрасов // Навигация и гидрография. — 2010. — № 30. — С. 36–42.
18. Wu L. Mapping global shipping density from AIS data / L. Wu, Y. Xu, Q. Wang, F. Wang, Zh. Xu // Journal of Navigation. — 2016. — Vol. 70. — Is. 1. — Pp. 67–81. DOI: 10.1017/S0373463316000345.
19. Гриняк В. М. Оценка и представление параметров безопасного движения судна / В. М. Гриняк, М. В. Трофимов, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.
20. Гриняк В. М. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 1. — № 3 (33). — С. 269–273.

21. Degre T. A collision avoidance system / T. Degre, X. Lefevre // *Journal of Navigation*. — 1981. — Vol. 34. — Is. 02. — Pp. 294–302. DOI: 10.1017/S0373463300021408.
22. Mitrofanov O. An anti-collision indicator / O. Mitrofanov // *Journal of Navigation*. — 1968. — Vol. 21. — Is. 02. — Pp. 163–170. DOI: 10.1017/S0373463300030319.
23. Szlapczynski R. A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // *Journal of Navigation*. — 2015. — Vol. 68. — Is. 06. — Pp. 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296.
24. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гаращенко // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
25. Ростопшин Д. Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Д. Я. Ростопшин, Д. А. Антонова // *Мехатроника, автоматизация, управление*. — 2007. — № 9. — С. 63–69.
26. MarineTraffic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.marinetraffic.com> (дата обращения: 01.06.19).
27. Головченко Б. С. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 156–162.
28. Zhao L. Ship Trajectories Pre-processing Based on AIS Data / L. Zhao, G. Shi, J. Yang // *Journal of Navigation*. — 2018. — Vol. 71. — Is. 05. — Pp. 1210–1230. DOI: 10.1017/S0373463318000188.
29. Weng J. Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // *Journal of Navigation*. — 2015. — Vol. 68. — Is. 3. — Pp. 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.
30. Гриняк В. М. Оценка опасности трафика морской акватории по данным Автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.
31. Гриняк В. М. Оценка опасности движения на акватории по данным Автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Ю. С. Иваненко // *Транспорт: наука, техника, управление*. — 2017. — № 10. — С. 41–46.

REFERENCES

1. Gagarskiy, E. A., S. G. Kozlov, and S. A. Kirichenko. “Safety of navigation in the design of the seaport.” *Transport: science, equipment, management* 1 (2018): 14–18.
2. Nekrasov, S. “Method of Quantitative Evaluation of Navigation Safety.” *Navigation and Hydrography* 48 (2017): 7–13.
3. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezиков. “Information model of maritime transport flows of the North sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
4. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs-72)*. M: RKonsul't, 2004.
5. Lentarev, A., and M. Maksimov. “Using navigation equipment to determine the vessel traffic statistics.” *Transportnoye delo Rossii* 6 (2015): 156–158.
6. Lebedeva, Marina P., Sergei D. Aizinov, and Aleksei O. Lebedev. “Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
7. Zeng, Z., L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, and A. Lammas. “A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles.” *Ocean Engineering* 110(A) (2015): 303–313. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.
8. Kirsanov, Mihail Nikolaevich. “Analysis of algorithms for the selection of optimal routes the group’s vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.
9. Lazarowska, A. “Ship’s trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation” *Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
10. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. “The hardware-software complex for modeling of grouped control problems for mobile robots.” *MPEI Vestnik* 3 (2011): 88–95.

11. Kaljaev, I. A., A. R. Gajduk, and S.G. Kapustjan. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravlenija v gruppah robotov*. M: Fizmatlit, 2009.
12. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. "The use of decision support systems for choosing parameters of vessel's maneuvering." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2015): 58–62.
13. Tam, Ch. K., R. Bucknall, and A. Greig. "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters." *Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
14. Plammer, K. J. *Manevrirovaniye sudov v uzkostyakh*. L: Sudostroyeniye, 1986.
15. Lobanov, A. A., Yu. V. Rummyantsev, and D.M. Bukhov. "Methodical Aspects of Design Work Intended to Provide the Navigation Safety under the Present-Day Conditions." *Navigation and Hydrography* 35 (2013): 29–38.
16. Taratynov, V. V. "Tselesoobraznost' razdeleniya morskikh putei." *Morskoi flot* 9 (1969): 19–20.
17. Brodskii, P. G., Yu. V. Rummyantsev, and S.N. Nekrasov. "On evaluation of the influence of maritime traffic intensity on accident rate." *Navigation and Hydrography* 30 (2010): 36–42.
18. Wu, L. Y. Xu, Q. Wang, F. Wang, and Zh. Xu. "Mapping global shipping density from AIS data." *Journal of Navigation* 70.1 (2016): 67–81. DOI: 10.1017/S0373463316000345.
19. Grinyak, Victor Mihajlovich, Maxim Valerevich Trofimov, and Victor Ivanovich Lulko. "Data visualization of ship collision avoidance system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.
20. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisil'nyi, and M. V. Trofimov. "Vizual'noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1.3(33) (2016): 269–273.
21. Degre, T., and X. Lefevre. "A collision avoidance system." *Journal of Navigation* 34.2 (1981): 294–302. DOI: 10.1017/S0373463300021408.
22. Mitrofanov, O. "An anti-collision indicator." *Journal of Navigation* 21.2 (1968):163–170. DOI: 10.1017/S0373463300030319.
23. Szlapczynski, R., and J. Szlapczynska. "A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions." *Journal of Navigation* 68.6 (2015): 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296.
24. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. "The methods for conception of ship's domain." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
25. Rostopshin, D. Ia., and D. A. Antontva. "On the Problems of Data Automatic Identification System at the Control Problems by Movement of Crafts." *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 9 (2007): 63–69.
26. MarineTraffic. Web. 1 June 2019 <<http://www.marinetraffic.com>>.
27. Golovchenko, B. S., and V. M. Grinyak. "Information system for vessels traffic data capture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 156–162.
28. Zhao, L., G. Shi, and J. Yang. "Ship Trajectories Pre-processing Based on AIS Data." *Journal of Navigation* 71.5 (2018): 1210–1230. DOI: 10.1017/S0373463318000188.
29. Weng, J., and S. Xue. "Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study." *Journal of Navigation* 68.3 (2015): 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.
30. Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Victor I. Lulko. "Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.
31. Grinyak, V.M., A.S. Devyatisilnyi, and Yu.S. Ivanenko. "Estimation of marine traffic safety based on AIS data." *Transport: science, equipment, management* 10 (2017): 41–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриняк Виктор Михайлович —
доктор технических наук, профессор
Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса
690014, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Гоголя, 41
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grinyak, Victor M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Vladivostok State University of Economics
and Service
41 Gogolya Str., Vladivostok, 690014,
Russian Federation
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Девятисильный Александр Сергеевич —
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Радио, 5
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Шуленина Алёна Викторовна —
старший преподаватель
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: shuleninaav@mail.ru

Devyatisilnyi, Alexander S. —
Dr. of Technical Sciences,
professor
Institute of Automation and Control Processes
FEBRAS
5 Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru
Shulenina, Alena V. —
Senior Lecturer
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091,
Russian Federation
e-mail: shuleninaav@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 21 июня 2019 г.
Received: June 21, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-652-661

WAYS TO ACHIEVE THE POTENTIAL OF THE NAVIGATOR'S PROFESSION AS A FACTOR OF IMPROVING THE MERCHANT SHIPPING SAFETY

D.B. Sigaev, A.P. Shatylo

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

The purpose of this paper is to find the ways of achieving the potential of the navigator's profession. The research results are displayed in the paper. The research tasks are to determine experimentally the potential of the improvement process of navigator's competence during education on the Navigation Department in the maritime educational institutions; identifying and justifying the most effective way to achieve this potential.

The comparison method of subjective perception of the navigators' education quality in the maritime educational institutions and objective level of their competence at the time of teaching on the extension courses is utilized during the research. The potential of the improvement process of the navigators' competence level is 19,1% u 24,0% for cadets of the Navigation Department of the higher educational institutions and specialised secondary educational establishments respectively. Studying the use of psychophysiological analysis methods during the process of professional selection of civil aviation pilots indicates a high effectiveness of such technique: there is a decrease of the expelled cadets number from 60–75% to 25–30%. Taking into account the similarity of pilot's and navigator's professions in the aspect of the psychophysiological requirements for the specialist, as well as cases the experience of successfully using the achievements and developments of the civil and military aviation industry in the maritime field, it is proposed to perform a similar work regarding the navigator's profession. The first task in this direction is the close cooperation work with current working navigators: questioning, observation, study of working conditions, analysis of specific documentation, selection of professionally significant qualities. The study, which is being currently performed on board of seagoing vessel in the navigator's real working environment, will serve for this purpose.

The profессиogram use as the main component of the professional psychophysiological selection is able to become the effective instrument for achieving the potential of the improvement process of the navigator's competence during teaching on the Navigation Department and one of the factors, increasing the safety of navigation and shipboard operations.

Keywords. navigator, navigator's level of competence, merchant fleet, safety of navigation, risk mitigation, potential of the navigator's profession, profессиogram, psychophysiological selection.

For citation:

Sigaev, Dmitrii B., and Aleksandr P. Shatylo. "Ways to achieve the potential of the navigator's profession as a factor of improving the merchant shipping safety." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 652–661. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-652-661.

УДК 551.577.53:574.23:347.796

ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА ПРОФЕССИИ СУДОВОДИТЕЛЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ

Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло

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

Определены пути реализации потенциала профессии судоводителя. Представлены результаты исследования, задачами которых являлось определение экспериментальным путем потенциала процесса повышения уровня подготовки судоводителя при обучении по специальности «Судовождение» в морских учебных заведениях, выявление и обоснование наиболее эффективного пути данного потенциала. В иссле-

довании использован метод сравнения субъективного восприятия уровня подготовки судоводителя, полученной в морском учебном заведении, и объективного показателя уровня подготовки на момент обучения по одной из программ на курсах дополнительного профессионального образования. Потенциал процесса повышения уровня подготовки составил, соответственно, 19,1 % и 24,0 % для обучающихся по специальности «Судовождение» в вуз и ссуз. Изучение применения методов психофизиологического анализа в процессе профессионального отбора пилотов гражданской авиации позволяет сделать вывод о высокой эффективности данного приема: наблюдается снижение количества отчисленных курсантов летных училищ в разных странах с 60–75 % от общего числа зачисленных на обучение до 25–30 %. Учитывая схожесть профессий судоводителя и летчика по психофизиологическим требованиям, предъявляемым к специалисту, а также опыт успешного использования достижений и наработок отрасли гражданской и военной авиации в морском судоходстве, предлагается выполнить аналогичную работу в отношении профессии судоводителя. Первостепенной задачей в этом направлении является работа с действующими судоводителями: опрос, наблюдение, изучение условий трудовой деятельности, анализ нормативной документации, а также проведение подбора профессионально важных качеств. Выполнению поставленной задачи послужит исследование, проведенное в настоящее время на борту морского судна в реальных условиях работы судоводителя. Использование профессиограммы судоводителя как основополагающего компонента профессионального психофизиологического отбора способно стать эффективным инструментом для реализации потенциала процесса повышения уровня подготовки судоводителя при обучении по специальности «Судовождение» и одним из факторов, способствующих повышению безопасности мореплавания и судовых операций.

Ключевые слова: судоводитель, уровень подготовки судоводителя, торговый флот, безопасность мореплавания, снижение рисков, потенциал профессии судоводителя, профессиограмма, психофизиологический отбор.

Для цитирования:

Сигаев Д. Б. Пути реализации потенциала профессии судоводителя как фактор повышения безопасности мореплавания / Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 652–661. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-652-661.

Введение (Introduction)

Повышение качества и уровня подготовки специалистов является процессом, требующим пристального внимания участников соответствующей отрасли, внедрения передовых технологий и методов, а также мониторинга и анализа эффективности предпринимаемых мер. Чем более масштабной является отрасль, тем больший потенциал имеет данный процесс. В отраслях с повышенным уровнем риска должны быть соблюдены наивысшие стандарты безопасности: специалисты должны находиться в постоянном поиске способов совершенствования всех аспектов технологических процессов, минимизируя риски аварийного развития ситуации на разных уровнях управления. Морское судоходство относится к таким отраслям. Штурманский состав на борту морского судна является тем звеном, на которое ложится большая нагрузка, связанная с навигацией судна, управлением персоналом, организацией судовых операций, взаимодействием с заинтересованными сторонами, в том числе операторами, фрахтователями, агентами, третьими лицами, службами организации движения и т. п. Современные скорости процессов перевалки и транспортировки грузов предъявляют высокие требования к профессиональным качествам судоводителя. В то же время судоходное сообщество, осознавая существующую проблему влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания [1], [2], не сформировало четкого профессионального портрета современного судоводителя, т. е. профессиограмма судоводителя морского судна на сегодняшний день отсутствует.

Профессиограмма — это документ, который включает описание профессии, условий профессиональной деятельности и требований, предъявляемых работнику, а также комплексное описание социально-экономических, производственно-технических, санитарно-гигиенических, организационных, психологических и других особенностей рассматриваемой специальности. С точки зрения применения профессиограммы как части психофизиологического отбора наиболее значимым разделом документа является *психограмма* — описание профессионально важных качеств личности, психических состояний и процессов, обеспечивающих эффективное выполнение функций профессиональной деятельности. Согласно проведенным исследованиям, профессии

судоводителя и летчика гражданской авиации являются родственными по психофизиологическим требованиям, предъявляемым к специалисту [3]. Профессиональное обучение как пилота, так и судоводителя — процесс, определяющийся общими для обеих профессий факторами: высокой степенью опасности деятельности человека в условиях профессиональной деятельности; работой в сложных метеорологических условиях; широкой географией операционной среды; повышенной загруженностью летчиков и штурманского состава судов, вызванной снижением количества членов экипажа на борту; повышенными требованиями отечественных и международных документов к уровню безопасности эксплуатации транспортных средств [4], [5].

Примеры успешного интегрирования достижений и наработок отраслей гражданской и военной авиации в отрасль морского судоходства отражены в международных правовых документах, направленных на обеспечение безопасности мореплавания. Например, применение концепции владения ситуацией, предложенной профессором М. Эндслей, которое было введено в «Международную конвенцию о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года» (ПДНВ-78) «Манильскими поправками 2010 г.» [6], [7].

Уровень нагрузок на судоводителей и пилотов гражданской авиации в процессе трудовой деятельности высок — нарастание интенсивности воздушного движения и трафика судов увеличивает вероятность возникновения нестандартных ситуаций, ведет к ужесточению требований к психологическим качествам пилотов и судоводителей. Современный анализ аварий указывает на прямую связь между состоянием здоровья (как физического, так и психологического) пилотов и судоводителей и безопасностью движения. Несоответствие в полной мере определенных профессионально важных качеств требованиям профессии, особенно при развитии нестандартной ситуации, зачастую становится причиной принятия неверных решений [8], [9]. Успешная профессиональная подготовка летного персонала и штурманского состава морских судов невозможна без учета тех профессионально значимых индивидуально-психологических качеств, которые ее обеспечивают [10].

В связи с ранее изложенным авторы продолжили работу в направлении повышения качества подготовки судоводителей. Была поставлена цель найти пути реализации потенциала профессии судоводителя. Данная статья является продолжением исследования, начало которого было посвящено определению субъективного уровня восприятия действующими судоводителями уровня подготовки, полученного в учебном заведении. В результате проведенных исследований стала очевидной необходимость проведения объективного исследования с целью сравнения и анализа результатов, определения потенциала использования профессиограммы судоводителя как части психофизиологического отбора в процессе поступления для обучения по специальности «Судовождение» в морских учебных заведениях, а также в ходе последующего мониторинга студентов на всех этапах обучения. Было проведено исследование среди слушателей курсов в Институте дополнительного профессионального образования Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, задачами которого явилось:

- экспериментальное определение потенциала процесса повышения уровня подготовки судоводителя при обучении по специальности «Судовождение» в морских учебных заведениях;
- выявление, обоснование и конкретизация наиболее эффективного пути реализации потенциала профессии судоводителя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ходе исследования использовались данные аттестационных листов слушателей курсов подготовки капитанов и старших помощников капитана о продлении дипломов капитана, старшего и вахтенного помощников капитана, а также подготовке при длительном перерыве в работе в должности вахтенного помощника капитана. Всего был исследован 271 аттестационный лист из числа судоводителей, которые обучались в 2018 г. Аттестационный лист включает данные о слушателе, а также о результатах входного и выходного тестирования при прохождении курсов. Результат входного тестирования был принят в качестве объективного показателя уровня подготовки, которым обладают судоводители на момент начала обучения. Данные были категоризованы

и структурированы по следующим критериям: уровень образования, возраст и должность. Результаты представлены в виде графиков.

Категорирование по критерию «возраст» было выполнено в соответствии с теорией этапов и кризисов профессионального становления, описанной в книге Г. Шихи «Возрастные кризисы»¹ как наиболее близкой к этапам профессионального роста судоводителя:

- 18–22 года — кризис «вырывания корней»;
- 23–29 лет — кризис «искания в двадцать лет»;
- 30–35 лет — кризис «осознания себя в тридцать лет»;
- 36–45 лет — кризис «середины жизни»;
- 46–50 лет — кризис «обновления или покорности».

По критерию «уровень образования» — в соответствии с вариацией уровней, имеющих в образовательной системе, а также их применимости к опрашиваемым специалистам: высший и средний (средне-специальный) уровни образования.

По критерию «должность» — в соответствии с той должностью, на которую проходит обучение специалист согласно существующим уровнями дипломирования судоводителей:

- капитан (КМ);
- старший помощник капитана (СПКМ);
- вахтенный помощник капитана (ВПКМ).

Категорирование, структурирование и анализ данных исследования по определению объективного уровня подготовки судоводителей были произведены по тому же набору критериев, которые использовались в первой части исследования с целью сравнения данных об уровне подготовке судоводителей, полученных по итогам субъективного [11] и объективного исследований. Входное и выходное тестирования судоводителей при обучении на курсах производится с использованием специализированного программного обеспечения — TDMS «Фарватер». Предусмотрен критерий минимально необходимого количества набранных баллов для оценки результата как положительного, который составляет 70 баллов. Преодоление данного «порога» использовано в исследовании как критерий успешности прохождения тестирования, а, следовательно, и достаточности уровня подготовки судоводителя для работы применительно к должности по диплому судоводителя, по которой проводится обучение.

Результаты (Results)

На рис. 1 показан график результатов анализа данных входного тестирования по критерию «уровень образования».

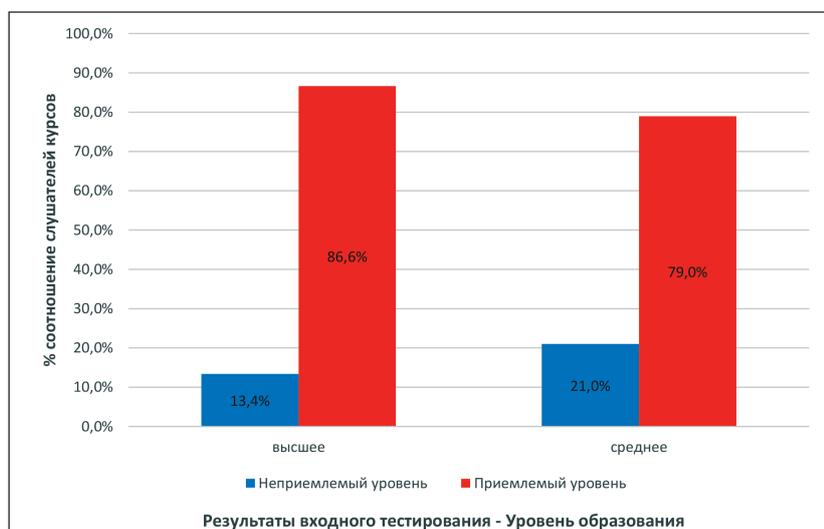


Рис. 1. Результаты анализа данных по критерию «уровень образования»

¹ Шихи Г. Возрастные кризисы. М.: Ювента, 1999.

Соотношение слушателей по критерию «уровень образования»: 546 (73,7 %) судоводителей с высшим образованием и 195 (26,3 %) судоводителей со средним образованием. Слушатели с высшим образованием имеют более высокий процент успешного прохождения входного тестирования. Зависимость, установленная в ходе проведения исследования на основании субъективных данных, подтверждается — уровень подготовки в вуз выше, чем в ссуз (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение данных субъективного и объективного исследования по критерию «уровень образования»

Вид оценки	Уровень образования	
	Процент слушателей с достаточным уровнем знаний	
	Высшее	Среднее
Субъективная	67,5 %	55,0 %
Объективная	86,6 %	79,0 %
Разность	19,1 %	24,0 %

На рис. 2 показан график, демонстрирующий результаты анализа результатов входного тестирования по критерию «должность».

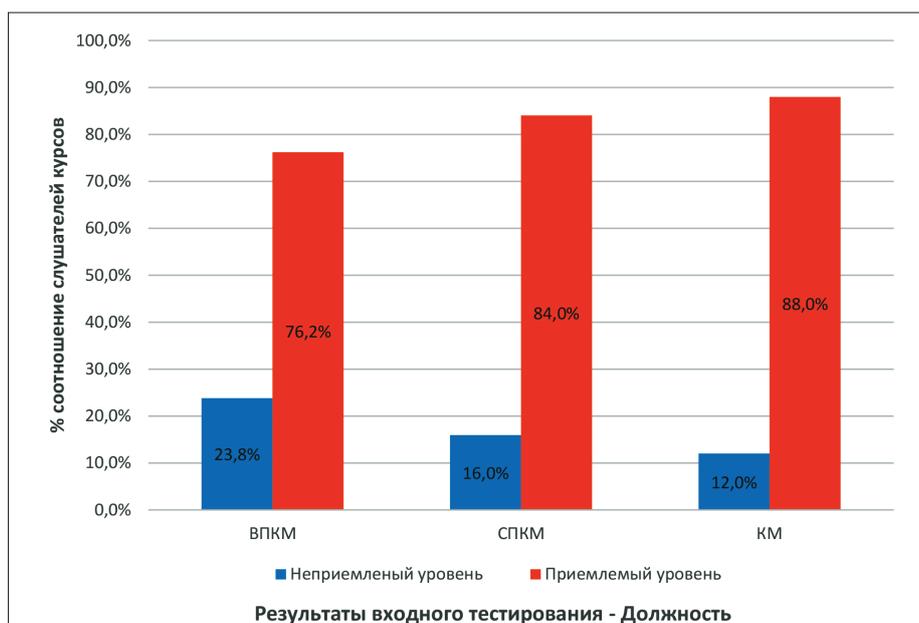


Рис. 2. Результаты анализа данных по критерию «должность»

В соответствии с критерием «уровень образования», соотношение слушателей, работающих в должности ВПКМ, составляет 126 (17,0 %), соотношение слушателей, работающих в должности СПКМ — 257 (34,7 %), слушателей, работающих в должности КМ — 358 (48,3%). Слушатели, проходящие обучение для получения более высокого уровня дипломирования, имеют более высокий процент успешного прохождения входного тестирования. Зависимость, установленная в ходе проведения исследования на основе субъективных данных (данные субъективного исследования не содержат данных об уровне подготовки слушателей, работающих в должности КМ), частично подтверждается: с повышением должности уровень подготовки относительно рассматриваемой должности повышается (табл. 2). Данная тенденция может свидетельствовать о влиянии приобретенного профессионального опыта, а также более высоком качестве полученной подготовки в учебном заведении.

Таблица 2

**Сравнение данных субъективного и объективного исследования
 по критерию «должность»**

Вид оценки	Должность		
	Процент слушателей с достаточным уровнем знаний		
	ВПКМ	СПКМ	КМ
Субъективная	63,0 %	68,0 %	–
Объективная	76,2 %	84,0 %	88,0 %
Разность	13,2 %	16,0 %	–

На рис. 3 дан график, показывающий результаты анализа результатов входного тестирования по критерию «возраст».

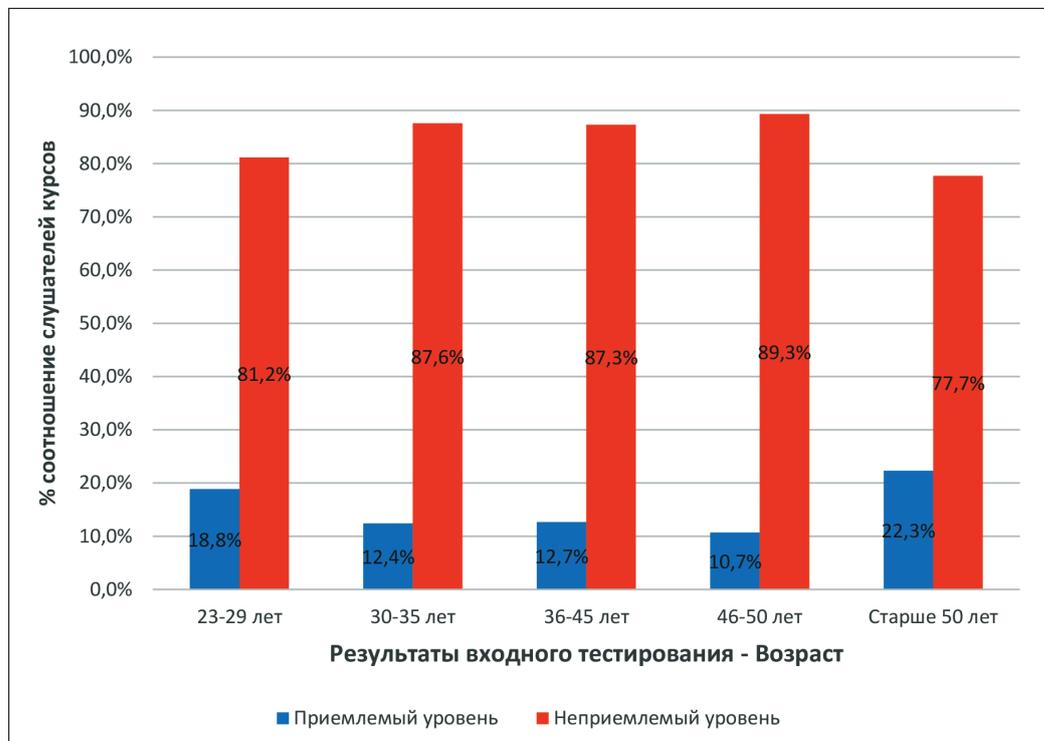


Рис. 3. Результаты анализа данных по критерию «возраст»

Соотношение слушателей в соответствии с данным критерием: два слушателя (0,3 %) возрастной группы 18–22 года (результаты не включены анализ вследствие недостаточного количества обучающихся в группе); 138 (18,6 %) слушателей группы 23–29 лет; 153 слушателя (20,6 %) группы 30–35 лет; 197 слушателей (26,6 %) группы 36–45 лет; 103 слушателя (13,9 %) группы 46–50 лет; 148 слушателей (20,0 %) группы старше 50 лет. Данные объективного исследования свидетельствуют об увеличении уровня подготовки с увеличением возрастной категории за исключением возрастной группы лиц старше 50 лет.

Тенденция, установленная при проведении исследования на основании субъективных данных, не подтверждается: данные субъективного исследования указывают на снижение уровня подготовки, полученной в учебном заведении с увеличением возрастной категории, за исключением возрастной группы 46–50 лет (табл. 3).

**Сравнение данных субъективного и объективного исследования
по критерию «возраст»**

Вид оценки	Возраст				
	Процент слушателей с достаточным уровнем знаний				
	21–29 лет	30–35 лет	36–45 лет	46–50 лет	Старше 50 лет
Субъективная	69,0 %	63,0 %	56,0 %	91,0 %	–
Объективная	81,2 %	87,6 %	87,3 %	89,3 %	77,7 %
Разность	12,2 %	24,6 %	31,3%	–1,7 %	–

Подобное соотношение данных может свидетельствовать о следующем:

- с увеличением возраста, при объективном увеличении уровня накопленных знаний, уровень подготовки, полученной в учебном заведении, воспринимается как менее существенный и достаточный для работы;

- представители возрастной категории старше 50 лет демонстрируют меньший уровень как субъективного восприятия знаний, полученных в учебном заведении, так и объективно оцененного уровня текущих знаний. Это может быть связано с большим количеством полученных в процессе работы знаний и опыта в совокупности с утратой интереса к новым знаниям специалистов данной возрастной группы;

- представители возрастной группы 46–50 лет продемонстрировали высокий уровень объективной подготовки, а также субъективного восприятия уровня знаний, полученных в учебном заведении, что может свидетельствовать о высоком уровне профессиональной подготовки в совокупности с уверенностью в собственном уровне знаний.

Обсуждение (Discussion)

Выполненное исследование позволило установить общий потенциал процесса повышения уровня подготовки обучающихся на специальность «Судовождение» методом сравнения субъективного восприятия уровня подготовки судоводителя, полученной в морском учебном заведении, и объективного показателя уровня подготовки на момент обучения по одной из программ на курсах Института дополнительного профессионального образования Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Разность между количеством судоводителей с объективно достаточным уровнем знаний на момент поступления на курсы (86,6 % для высшего образования) и количеством судоводителей с достаточным уровнем знаний после окончания морского учебного заведения (67,5 % для высшего образования) характеризует собой потенциал процесса повышения уровня подготовки судоводителя. Следует отметить ограничения вычислений, связанных с влиянием накопленного опыта на объективный уровень подготовки судоводителя, вычисление величины которого не представляется возможным на основании имеющихся данных. В качестве окончательных данных по результатам проведенного исследования получено в процентном соотношении то количество обучающихся, которых можно вывести на уровень приемлемости знаний на момент окончания обучения в морском учебном заведении: 19,1 % и 24,0 % для обучающихся по специальности «Судовождение» в вуз и ссуз соответственно.

Заключение (Conclusion)

Сравнение субъективного восприятия судоводителями уровня подготовки, полученной в оконченных ими учебных заведениях, и объективного уровня подготовки при поступлении на курсы повышения квалификации или для продления рабочего диплома наглядно демонстрирует

руют наличие потенциала процесса повышения уровня подготовки судоводителя при обучении по специальности «Судовождение» в морских учебных заведениях. Принимая во внимание тот факт, человеческий фактор является доминирующей причиной аварий на морском флоте (85 % согласно проведенным исследованиям) [1], [12], [13], реализация указанного потенциала должна рассматриваться как первостепенная задача при работе в направлении повышения безопасности мореплавания.

Изучение применения методов психофизиологического отбора в процессе профессионального отбора пилотов гражданской позволяет сделать вывод о высокой эффективности данного метода: наблюдается снижение количества отчисленных курсантов из летных училищ в разных странах с 60–75 % из общего числа зачисленных на обучение до 25–30 % [14]. Учитывая схожесть профессий судоводителя и летчика по психофизиологическим требованиям, предъявляемым к специалисту, а также опыт успешного использования достижений и наработок отраслей гражданской и военной авиации в морском судоходстве, предлагается выполнить аналогичную работу в отношении профессии судоводителя. Первостепенной задачей в этом направлении является работа с действующими судоводителями, а именно: опрос, наблюдение, изучение условий трудовой деятельности, анализ нормативной документации, проведение подбора профессионально важных качеств с помощью зарекомендовавшего себя метода экспертной оценки [15]. Выполнению поставленной задачи послужит исследование, проведенное в настоящее время на борту морского судна в реальных условиях работы судоводителя.

Использование профессиограммы судоводителя как основополагающего компонента профессионального психофизиологического отбора может явиться эффективным инструментом для реализации потенциала процесса повышения уровня подготовки судоводителя при обучении их по специальности «Судовождение» и, как следствие, одним из факторов, способствующих повышению безопасности мореплавания и судовых операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Н. Н. Формы и эффективность Международной морской организации при борьбе с усталостью моряков / Н. Н. Григорьев, Д. Б. Сигаев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 506–515. DOI: 10/21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.
2. Berg H. P. Human factors and safety culture in maritime safety / H. P. Berg // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: STCW, Maritime Education and Training (MET), Human Resources and Crew Manning, Maritime Policy, Logistics and Economic Matters. — 2013. — Vol. 107. — Pp. 107–115.
3. Двинин А. П. Психодиагностика: образование и кадровый менеджмент. Учебно-диагностическое пособие / А.П. Двинин, И. А. Романченко. — СПб.: Люмбер, 2015. — 148 с.
4. Благинин А. А. Психологические детерминанты успешности обучения пилотов / А. А. Благинин, С. Н. Синельников, А. А. Шевелько // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. — 2015. — Т. 5. — № 4. — С. 12–20.
5. Basak S. K. A Framework on the Factors Affecting to Implement Maritime Education and Training System in Educational Institutions: A Review of the Literature / S. K. Basak // Procedia engineering. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 345–350. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.155.
6. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. — Третье сводное изд. 2011 года. — Лондон, 2013. — 355 с.
7. Сигаев Д. Б. Роль и влияние восприятия судоводителя как важнейшего элемента владения ситуацией на безопасность мореплавания / Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло // Материалы IX межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». — 2018. — С. 80–86.
8. Ильина Л. В. Профотбор и психофизиологический мониторинг функционального состояния судовых специалистов морского и речного флота (анализ состояния проблемы и перспективы развития) / Л. В. Ильина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2016. — № 6. — С. 245.

9. Шафран Л. М. Физиологогигиенические особенности профессиональной деятельности моряков специализированного флота / Л. М. Шафран, В. В. Голикова // Украинський журнал з проблем медицини праці. — 2014. — № 3. — С. 29–39.
10. Загородников А. Г. Взаимосвязь физиологических и психических возможностей организма курсантов различных соматотипов с успешностью обучения / А. Г. Загородников [и др.] // Вестник Российской военно-медицинской академии. — 2015. — № 2 (50). — С. 106–112.
11. Сигаев Д. Б. Способы повышения уровня подготовки судоводителей на разных этапах их профессионального развития / Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 499–508. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-499-508.
12. Григорьев Н. Контроль безопасности. В поисках панацеи / Н. Григорьев, М. Наконечный // Морской флот. — 2018. — № 05 (1539). — С. 20–24.
13. Chauvin C. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS / C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J. P. Clostermann, B. Langard // Accident Analysis & Prevention. — 2013. — Vol. 59. — Pp. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
14. Розайненко И. Ю. Особенности профессионального отбора пилотов гражданской авиации / И. Ю. Розайненко, О. Е. Подвербных // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2015. — Т. 2. — № 11. — С. 721–723.
15. Романова Е. С. 99 популярных профессий. Психологический анализ и профессиограммы / Е. С. Романова. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2003. — 464 с.

REFERENCES

1. Grigoriev, Nikolay N., and Dmitrii B. Sigaev. “Forms and effectiveness of imo in seamen fatigue mitigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 506–515. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.
2. Berg, H. P. “Human factors and safety culture in maritime safety.” *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: STCW, Maritime Education and Training (MET), Human Resources and Crew Manning, Maritime Policy, Logistics and Economic Matters* 107 (2013): 107–115.
3. Dvinin, A. P., and I. A. Romanchenko. *Psikhodiagnostika: obrazovanie i kadrovyi menedzhment. Uchebno-diagnosticskoe posobie*. SPb.: Lyum'er, 2015.
4. Blaginina, A. A., S. N. Sinelnikov, and A. A. Shevelko. “Psychological determinants of the success of the pilot training.” *Vestnik of Pushkin Leningrad State University* 5.4 (2015): 12–20.
5. Basak, Sujit Kumar. “A Framework on the Factors Affecting to Implement Maritime Education and Training System in Educational Institutions: A Review of the Literature.” *Procedia engineering* 194 (2017): 345–350. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.155.
6. *Mezhdunarodnaya konvetsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenii vakhty. Tret'e svodnoe izdanie 2011 goda*. London, 2013.
7. Sigaev, D. B., and A. P. Shatylo. “Rol' i vliyanie vospriyatya sudovoditelya kak vazhneishego elementa vladeniya situatsiei na bezopasnost' moreplavaniya.” *Materiály IX mezhdvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. 2018. 80–86.
8. Ilina, L. V., A. A. Abakumov, V. V. Petrash, S. N. Chuprova, and M. P. Litaeva. “Professional selection and psychophysiological monitoring the functional status of ship specialists sea and river fleet (problem analysis and development perspectives).” *Modern problems of science and education* 6 (2016): 245.
9. Shafran, L. M., and V. V. Golikova. “Fiziologogigienicheskie osobennosti professional'noi deyatel'nosti moryakov spetsializirovannogo flota.” *Ukrains'kii zhurnal z problem meditsini pratsi* 3 (2014): 29–39.
10. Zagorodnikov, A. G., V. I. Popov, G. G. Zagorodnikov, and V. A. Gorichny. “Assessment of correlation between physiological and psychological possibilities of organism of students of different somatotypes with success of learning.” *Herald of the Russian Military Medical Academy* 2(50) (2015): 106–112.
11. Sigaev, Dmitrii B., and Aleksandr P. Shatylo. “Methods of improvement of navigator's competence level on different stages of their professional development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 499-508. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-499-508.
12. Grigor'ev, N., and M. Nakonechnyi. “Kontrol' bezopasnosti. V poiskakh panatsei.” *Morskoi flot* 05(1539) (2018): 20–24.

13. Chauvin, Christine, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, and Benoît Langard. "Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS." *Accident Analysis & Prevention* 59 (2013): 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

14. Rozaynenko, I. Yu., and O. E. Podverbnikh. "The features of the recruitment of civil aviation pilots." *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* 2.11 (2015): 721–723.

15. Romanova, E. S. *99 populyarnykh professii. Psikhologicheskii analiz i professiogrammy*. 2nd ed. SPb.: Piter, 2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сигаев Дмитрий Борисович — аспирант

Научный руководитель:

Григорьев Николай Николаевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

Шатыло Александр Петрович — аспирант

Научный руководитель:

Григорьев Николай Николаевич

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: shatyloksusha@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

Sigaev, Dmitrii B. — Postgraduate

Supervisor:

Grigoriev, Nikolay N. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

Shatylo, Aleksandr P. — Postgraduate

Supervisor:

Grigoriev, Nikolay N.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: shatyloksusha@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2019 г.

Received: May 13, 2019.

MODELING THE OPTIMAL SEAPORT CONFIGURATION

A. V. Vasin, D. S. Zakharov, L. V. Annenkov

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

Ports play one of the most important roles in the whole transport system, being a complex technological multi-link system designed to change the type of transport in the shortest possible time and at the best prices. Several different configurations of the seaport terminal for ships service (handling operations) are compared in the paper. As an example, data on the schedule of ship calls to the seaport "St. Petersburg" are used. To simulate and analyze the optimality of various port terminal configurations, the following models of queuing systems are used: single-channel with failures, multichannel with failures and multichannel with a limited queue length. The flow of vessels arriving at the port is considered as an incoming flow of applications, as serving channels. The existing works on this topic are analyzed in the paper.

For a large port, such as the St. Petersburg seaport, the service probability is calculated, thereby confirming the inexpediency of choosing a single-channel queuing system, and at given input data, the best option is identified namely a multi-channel queuing system. In addition, the calculations to estimate the required number of service channels (for the given statistics on the St. Petersburg seaport terminal operation) are made and the average waiting time of a vessel in the terminal queue is calculated. The software calculations are performed using the Maple mathematical package. The algorithms for calculating the required number of channels in two cases (with failures and with a limited queue length) of multi-channel queuing systems are presented in the paper.

Keywords: queuing system, seaport, ship call schedule, seaport terminal, service channels, terminal queue

For citation:

Vasin, Andrei V., Dmitrii S. Zakharov, and Leonid V. Annenkov. "Modeling the optimal seaport configuration." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.

УДК 519.872.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ МОРСКОГО ПОРТА

А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков

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

Отмечается, что в транспортной системе порт играет одну из важнейших ролей, являясь сложной технологически многозвенной системой, предназначенной для смены вида транспорта в кратчайшие сроки и по оптимальным ценам. Сравниваются несколько различных конфигураций терминала морского порта для обслуживания (оказания погрузочно-разгрузочных работ) судов. В качестве примера используются данные о графике судозаходов в морской порт «Санкт-Петербург». Для моделирования и анализа оптимальности различных конфигураций терминала порта использовались следующие модели систем массового обслуживания: одноканальная с отказами, многоканальная с отказами и многоканальная с ограниченной длиной очереди. В качестве входящего потока заявок в представленной работе рассматривается поток приходящих в порт судов в качестве обслуживающих каналов. Выполнен анализ существующих на эту тему работ. Для большого порта, такого, как морской порт «Санкт-Петербург» была вычислена вероятность обслуживания, тем самым подтверждена нецелесообразность выбора одноканальной системы массового обслуживания, а при заданных входных данных был выявлен оптимальный вариант – многоканальная система массового обслуживания с очередью. Кроме того, в работе выполнены вычисления для оценки необходимого количества каналов обслуживания (для приведенной статистики работы терминала морского порта «Санкт-Петербург») и вычислено среднее время ожидания судна в очереди терминала. Программные вычисления были выполнены с помощью математического пакета Maple. В работе представлены алгоритмы для вычисления необходимого количества каналов в двух случаях: с отказами и с ограниченной длиной очереди многоканальных систем массового обслуживания.

Ключевые слова: система массового обслуживания, морской порт, график судозаходов, терминал морского порта, каналы обслуживания, очередь терминала

Для цитирования:

Васин А. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта / А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.

Введение (Introduction)

Существует большой класс транспортных систем, работу которых сложно изучить аналитическими способами, но которые легко поддаются изучению с помощью использования методов статистического моделирования. К таким системам можно отнести морской порт, представив его в виде системы массового обслуживания (СМО).

В транспортной системе порты занимают одно из важных мест как сложные технологически многозвенные подсистемы, предназначенные для смены вида транспорта в кратчайшие сроки и по конкурентным ценам. В таких транспортных подсистемах, как правило, всегда имеют место непроизводительные простои судов и груза [1]. Существует ряд работ, таких, например, как [2] и [3], в которых авторы в процессе рассмотрения различных моделей пытаются определить, какая из конфигураций порта является наиболее оптимальной в той или иной ситуации. Все модели СМО формируются из небольшого набора элементов: канал, источник заявок, очередь, заявка, дисциплина обслуживания, что позволяет имитировать эти задачи типовым образом.

Как отмечается в работе [4], зачастую в деятельности по обслуживанию портов существует дисбаланс, обусловленный многими факторами, такими как количество погрузочно-разгрузочного оборудования, расположение обслуживающего персонала и масштаб погрузочно-разгрузочных работ. Например, если количество машин будет недооценено, это приведет к тому, что товар не будет разгружен вовремя, а это уже влечет за собой финансовые потери. И если будет слишком много погрузочно-разгрузочного оборудования, то это приведет к ненужной трате финансовых и материальных ресурсов.

Для работы портов характерным является поток входных заявок от судов, поступающих в порт на производство погрузочно-разгрузочных работ (ПРР). В соответствии с этими заявками суда могут ставиться для производства ПРР на один из нескольких причалов порта, образующих причальный фронт. Эксплуатационная деятельность порта, связанная с обработкой судов, может условно (схематично) рассматриваться как функционирование локальной СМО, предназначенной для обслуживания транспортных судов по случайно возникающим запросам [5].

В случае моделирования работы морского порта в качестве основных рассматриваются следующие характеристики:

- количество судозаходов в день;
- среднее время обслуживания суда;
- среднее время ожидания обслуживания;
- необходимое количество мест для ожидания;
- необходимое количество мест для обслуживания.

Актуальной задачей является поиск оптимальных вариантов использования ресурсов транспортных систем, таких как порт. В данной статье рассматривается один из подобных вариантов с применением теории СМО.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье использованы следующие обозначения, наиболее часто применяемые в работах как [6]–[8]:

- λ — интенсивность входящего потока заявок (судов);
- μ — интенсивность обслуживания заявок (судов);

- t — время обслуживания;
 t_1 — среднее время пребывания заявки в очереди (при наличии очереди);
 p_0 — вероятность того, что все каналы свободны;
 ρ — приведенная интенсивность, нагрузка СМО;
 P_{obs} — вероятность обслуживания;
 n — количество каналов;
 m — длина очереди;
 $L_{оч}$ — среднее число заявок в очереди.

Рассмотрим работу морского порта на основе графика судозаходов в порт «Санкт-Петербург». В таблице приведен фрагмент данных источника [9], откуда видно, что среднее время обслуживания составляет 52 ч, а количество судозаходов в день — 12.

График судозаходов в порт «Санкт-Петербург»

№ п/п.	Название	Время захода	Время выхода
1	«Меркс Джафна»	02.04.2019 04:22	04.04.2019 11:19
2	«Энни»	02.04.2019 04:30	03.04.2019 23:44
3	«Сормовский-53»	02.04.2019 04:50	03.04.2019 11:31
4	«Финнсан»	02.04.2019 08:12	03.04.2019 01:00
5	«Несс»	02.04.2019 08:14	04.04.2019 23:12
6	«Солонг»	02.04.2019 08:46	02.04.2019 20:52
7	«Газпромнефть Зюйд-Ист»	02.04.2019 09:09	05.04.2019 19:59
8	«Леди Нора»	02.04.2019 09:15	05.04.2019 11:14
9	«Русич-11»	02.04.2019 11:33	05.04.2019 22:44
10	«Газпромнефть Зюйд»	02.04.2019 15:00	03.04.2019 10:37
11	«Василий Шукшин»	02.04.2019 19:25	05.04.2019 21:55
12	«Пола Анатолия»	02.04.2019 19:50	21:31

На рис. 1 представлена гистограмма, отражающая среднее время нахождения одного судна в порту «Санкт-Петербург». На ней статистика приведена по месяцам. Время обслуживания зависит от следующих факторов: размер судна и сложность выполнения погрузочно-разгрузочных работ, количество приходящих в порт единиц техники и, как следствие, время ожидания обслуживания. Кроме того, навигация не прекращается круглый год и зимой, в ледовых условиях, провозка судов осуществляется ледоколами, что также увеличивает время обслуживания.

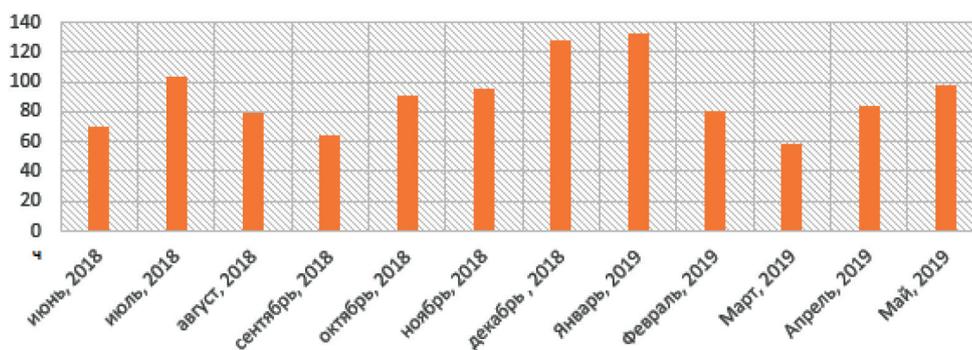


Рис. 1. Среднее время обслуживания одного танкера в часах (июнь 2018 г. – май 2019 г.)

Технологический процесс обслуживания судна включает ряд событий:

1. Погрузочно-разгрузочные работы.
2. Дополнительные операции у причала (крепление груза, перешвартовка и др.).
3. Необходимый интервал времени между подходами судов.

Вначале следует рассчитать вероятность обслуживания судов в простейшем случае — одноканальная СМО с отказами. Для этого необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$\mu = \frac{1}{t}; \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}; \quad (2)$$

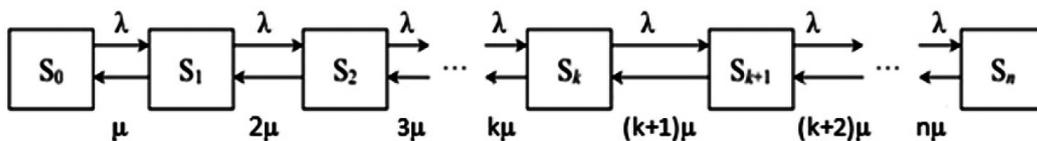
$$p = \frac{1}{1+\rho}. \quad (3)$$

Для многоканальных СМО рассмотрим два случая:

- многоканальные СМО с отказами,
- многоканальные СМО с ограниченной очередью.

На рис. 2 приведены графы соответствующих систем. В каждом из представленных типов систем в качестве потока входящих заявок λ выступают прибывающие в порт суда, интенсивность обслуживания заявки (судна) равна μ . Состояние S_0 означает, что все каналы свободны, состояние S_k — обслуживанием заявок заняты k каналов, состояние S_n — все каналы заняты. Состояние S_{n+1} в первом случае будет означать отказ, во втором — начало очереди. Для системы с ограниченной очередью отказы начинаются в случае занятости всех мест в очереди.

а)



б)

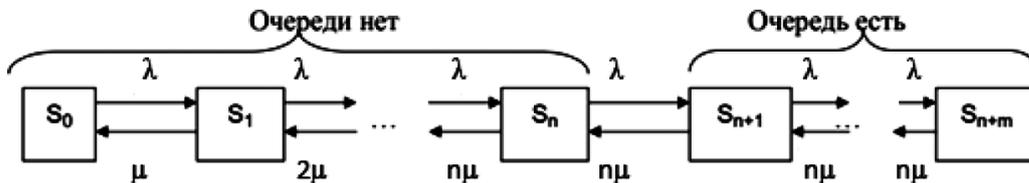


Рис. 2. Многоканальные СМО: а — с отказами; б — с ограниченной очередью

Необходимо рассчитать оптимальное число обслуживающих каналов в порту для случаев с наличием / отсутствием мест ожидания. Схемы таких моделей приведены на рис. 3.

Расчет вероятности обслуживания для случая многоканальной СМО с отказами выполняется по следующим формулам:

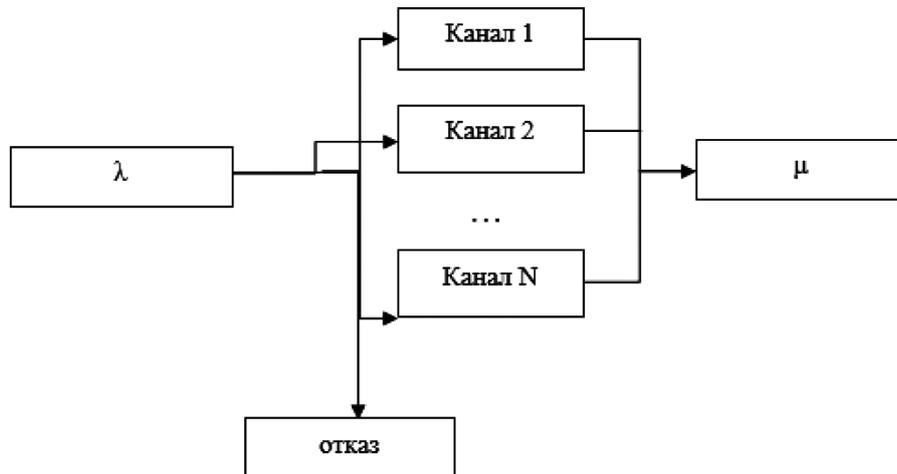
$$p_0 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1 \right)^{-1}; \quad (4)$$

$$P_{\text{obs}} = 1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (5)$$

Расчет вероятности обслуживания для случая многоканальной СМО с очередью выполняется согласно приведенной формуле:

$$P_{\text{obs}} = 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m} p_0. \quad (6)$$

а)



б)

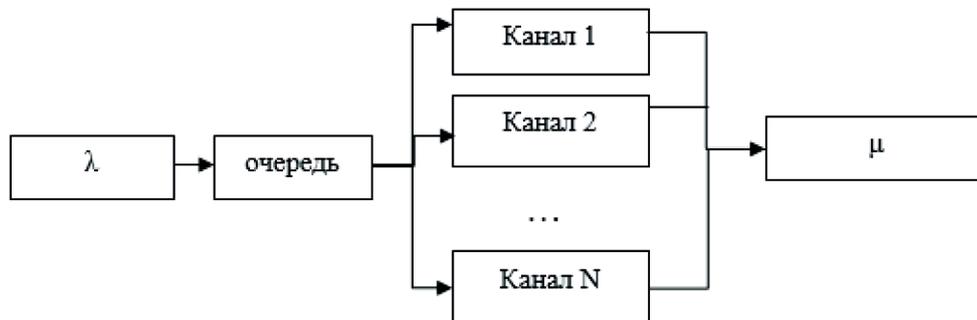


Рис. 3. Схема многоканальной СМО с отказами (а), с очередью (б)

Поиск оптимального количества каналов для обоих случаев выполнен в системе Maple, аналогично представленным в работе [10] вычислениям:

while Pobs<0.99 do;

p0:=evalf($\left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1\right)^{-1}$):

Pobs:=evalf($1 - \frac{\rho^n}{n!} \cdot p_0$):

n:=n+1: od:

n;

Аналогично для случая с очередью:

while Pobs<0.99 do

p0:=evalf($\left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1\right)^{-1}$):

Pobs:=evalf($1 - \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m} \cdot p_0$):

n:=n+1: od:

n.

Среднее число заявок в очереди определяется по следующей формуле:

$$L_{оч} = M(m) = \left(\sum_{i=1}^m i p_{n+i} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Среднее время пребывания заявки в очереди находится по следующей формуле:

$$t_l = \frac{L_{оч}}{\lambda}. \quad (8)$$

Результаты (Results)

При рассмотрении одноканальной СМО получим вероятность обслуживания $p = 0,037$. Очевидно, что в данном случае большая часть заявок не будет обслужена. Для того, чтобы обеспечить обслуживание всех судов в случае СМО с отказами, требуется не менее 73 каналов. На рис. 4 показан график, отображающий среднее время нахождения заявок в очереди в соответствии с ранее приведенными данными о времени обслуживания одного судна при фиксированном количестве судозаходов в месяц.

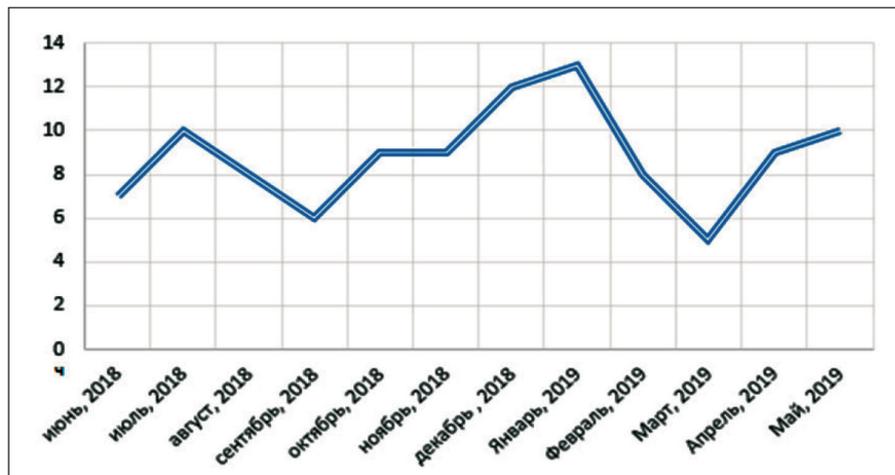


Рис. 4. Среднее время нахождения одного танкера в очереди, ч

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты не противоречат другим работам по моделированию транспортных систем, выполненным как с помощью теории массового обслуживания [11], так и с помощью методов имитационного моделирования [12].

Для обеспечения обслуживания судов в случае многоканальной СМО с очередью количество необходимых каналов может быть сокращено на количество мест ожидания. Рациональность выбора соотношения каналов обслуживания к местам ожидания может быть определена в зависимости от стоимости и допустимого времени ожидания в очереди. При принятии решений управленческого характера всегда существует несколько вариантов, но экономически целесообразно выбрать оптимальный.

Критерии оптимальности:

- производительность;
- среднее время ожидания судов в очереди;
- постоянное время обслуживания судов или время обслуживания, изменяющееся по показательному закону;
- себестоимость погрузки единицы массы груза;
- количество погрузочно-разгрузочного оборудования, занятого перегрузкой груза на причале.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование показало, что с помощью модели СМО с очередью можно спроектировать необходимую конфигурацию порта на основе статистической информации о количестве приходящих судов в единицу времени, длительности и стоимости обслуживания судна.

Качество аналитического исследования должно удовлетворять двум основным требованиям:

- реалистическому описанию изучаемой системы;
- модель должна быть простой для ее эффективного использования.

Критерием качества погрузочно-разгрузочных работ, проводимых на судах, является математическое ожидание числа простаивающих судов. Информационные технологии предоставляют инструмент для прогнозирования эффективности управления портовых операций на причальных фронтах порта. Компьютерные программы для проведения экспериментов с моделями, описывающими процесс функционирования причальных фронтов порта, можно включить в состав экспертных систем поддержки принятия решений для администрации морских портов [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устинов В. В. Системный анализ технологических процессов погрузо-разгрузочных работ в порту на примере эксплуатации нефтеналивного причала / В. В. Устинов, Г. А. Зеленков // Транспортное дело России. — 2012. — № 3. — С. 58–62.

2. Agerschou H. Planning and design of ports and marine terminals / H. Agerschou, I. Dand, T. Ernst, H. Ghos, O. J. Jensen, J. Korsgaard, J. Land, S. T. McKay, H. Oumeraci, J. B. Peterson, L. R. Schmidt, H.L. Svendsen. — 2nd Edition. — London: Thomas Telford Ltd, 2004. — 72 p.

3. Alvarez J. F. A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies / J. F. Alvarez, T. Longva, E. S. Engebretsen // Maritime Economics & Logistics. — 2010. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 327–346. DOI: 10.1057/mel.2010.11.

4. Понятовский В. В. Основные технологические требования к морским портам / В. В. Понятовский. — М.: ТРАНСЛИТ, 2014. — 288 с

5. Аблязов К. А. Использование информационных технологий для анализа моделей, описывающих процесс функционирования причальных фронтов порта / К. А. Аблязов, Э. К. Аблязов // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 1 (82). — С. 22–29.

6. Лаврусъ О. Е. Теория массового обслуживания / О. Е. Лаврусъ, Ф. С. Миронов. — Самара: Самарская государственная академия путей сообщения, 2002. — 40 с.

7. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 3–7.

8. Маликова Т. Е. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

9. Судозаходы в порты РФ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://portcall.marinet.ru/table/> (дата обращения: 01.06.2019).

10. Васин А. В. Многоканальные системы массового обслуживания на примере передачи голосового трафика на водном транспорте / А. В. Васин, Д. С. Захаров // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2018. — С. 81–86.

11. Кузнецов А. Л. Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

12. Schepler X. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

REFERENCES

1. Ustinov, V., and G. Zelenkov. “System analysis of technological processes of loading and unloading at the port on the example of oil-loading terminal operation.” *Transport business of Russia* 3 (2012): 58–62.

2. Agerschou, H., I. Dand, T. Ernst, H. Ghoo, O. J. Jensen, J. Korsgaard, J. Land, S. T. McKay, H. Oumeraci, J.B. Peterson, L. R. Schmidt, and H.L. Svendsen. *Planning and design of ports and marine terminals*. 2nd Edition. London: Thomas Telford Ltd, 2004.

3. Alvarez, J. Fernando, Tore Longva, and Erna S. Engebretsen. "A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies." *Maritime Economics & Logistics* 12.4 (2010): 327–346. DOI: 10.1057/mel.2010.11.

4. Ponyatovskii, V. V. *Osnovnye tekhnologicheskie trebovaniya k morskim portam*. M.: TRANSLIT, 2014.

5. Ablyazov, K. A., and E. K. Ablyazov. "Usage of information technology for an analysis of models describing process of a functionality of berth fronts of the port." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(82) (2017): 22–29.

6. Lavrus', O.E., and F.S. Mironov. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Samara: Samarskaya gosudarstvennaya akademiya putei soobshcheniya, 2002.

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

8. Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. "The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

9. Sudozakhody v porty RF. Web. 1 June 2019 <<https://portcall.marinet.ru/table/>>.

10. Vasin, A. V., and D. S. Zakharov. "Mnogokanal'nye sistemy massovogo obsluzhivaniya na primere peredachi golosovogo trafika na vodnom transporte." *Sbornik nauchny statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O.Makarova»*. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2018. 81–86.

11. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

12. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. "Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васин Андрей Васильевич —

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

Захаров Дмитрий Сергеевич — аспирант

Научный руководитель:
 Васин Андрей Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: dmit.zakharov@gmail.com, kaf_pm@gumrf.ru

Анненков Леонид Владимирович — аспирант

Научный руководитель:
 Васин Андрей Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: annenkov89@mail.ru, kaf_pm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasin, Andrei V. —

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

Zakharov, Dmitrii S. — Postgraduate,

Supervisor:
 Vasin, Andrei V.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: dmit.zakharov@gmail.com, kaf_pm@gumrf.ru

Annakov, Leonid V. — Postgraduate,

Supervisor:
 Vasin, Andrei V.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: annenkov89@mail.ru, kaf_pm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2019 г.

Received: June 11, 2019.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-670-682

A CONCEPT OF BUILDING THE «KOTOVITSY» RIVER PORT COMBINED WITH A TRANSPORT-LOGISTIC CENTER ON THE VOLKHOV RIVER

V. I. Shabanov¹, S. L. Belenko¹, P. A. Garibin²

¹ — LLC Baltmorproekt, St. Petersburg, Russian Federation

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

The conceptual states for creating an unified internal system in the North-Western Federal District and the related problem of reconstructing the waterway along the Volkhov river are discussed in the paper. The estimation of the necessary amount of work to increase the transit depths to international standards is given. The proposals on integrating the system of internal waterways of the Russian Federation into the European system of internal waterways are given, that will provide the possibility of through navigation along the route of the large European water transport ring for ships of the Russian and Western European fleets. The principal decision on renovation of the navigation passes of the Volkhov hydroelectric station is given. The issues of development of cargo and passenger fleet and water transport infrastructure necessary to ensure the economic growth of the region are considered. Special attention is paid to the problems of the organization of tourist cruise shipping within the framework of the “Silver necklace” project. For the freight traffic intensification it is proposed to create a new river port “Kotovitsy” outside Veliky Novgorod. Kotovitsy settlement has a very favorable location, located at the intersection of transport routes: waterway along the Volkhov river, the railway located near the Krechevitsa airport and the Federal highway M-11, at the exit of the Ust-Luga – Veliky Novgorod road, which is being built anew. On the basis of retrospective analysis of cargo flows of different types of transport the efficiency of construction of multimodal transport and logistic center on the Volkhov river is proved. The stages and necessary amount of work on the construction of the multimodal transport and logistics center are estimated. The design work results on justifying the layout of the main structures of the “Kotovitsy” river port with the logistics center are given. The tasks for further research are outlined.

Keywords: waterway, system, navigable depths, transport infrastructure, multimodal transportation, port, logistics center, layout, shipping lock, tourism, channel.

For citation:

Shabanov, Victor I., Sergey L. Belenko, and Pavel A. Garibin. “A concept of building the «Kotovitsy» river port combined with a transport-logistic center on the Volkhov River.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 670–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-670-682.

УДК 656.628

КОНЦЕПЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА РЕЧНОГО ПОРТА «КОТОВИЦЫ» НА РЕКЕ ВОЛХОВ, СОВМЕЩЕННОГО С ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИМ ЦЕНТРОМ

В. И. Шабанов¹, С. Л. Беленко¹, П. А. Гарибин²

¹ — Общество с ограниченной ответственностью «Балтморпроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Рассматриваются концептуальные положения по созданию единой внутренней системы в Северо-Западном федеральном округе и связанной с этим проблемы реконструкции водного пути по реке Волхов. Выполнена оценка необходимого объема работ по увеличению транзитных глубин до международных

стандартов. Сформулированы предложения по интеграции системы внутренних водных путей Российской Федерации в европейскую систему внутренних водных путей, что обеспечит возможность сквозного плавания по маршруту большого Европейского воднотранспортного кольца судов российского и западно-европейского флота. Дано принципиальное решение по реновации судопропускных сооружений Волховского гидроузла. Рассмотрены вопросы развития грузового и пассажирского флота и инфраструктуры водного транспорта необходимой для обеспечения экономического роста региона. Особое внимание уделено проблемам организации туристического круизного судоходства в рамках реализации проекта «Серебряное ожерелье». Для интенсификации грузовых перевозок предложено создать новый речной порт Котовицы вне пределов г. Великий Новгород. Отмечается, что поселение Котовицы имеет очень благоприятное местоположение, находясь на пересечении транспортных путей: водного по реке Волхов, железной дороги, расположен рядом с аэропортом Кречевицы и федеральной автомобильной трассой М-11, у выхода вновь строящейся дороги Усть-Луга – Великий Новгород. На основе ретроспективного анализа грузопотоков различных видов транспорта обоснована эффективность строительства мультимодального транспортно-логистического центра на реке Волхов. Дана оценка стадийности и необходимого объема работ по возведению мультимодального транспортно-логистического центра. Приводятся результаты проектных работ по обоснованию компоновки основных сооружений речного порта Котовицы с логистическим центром. Намечены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: водный путь, система, судоходные глубины, транспортная инфраструктура, мультимодальные перевозки, порт, логистический центр, компоновка, судоходный шлюз, туризм, канал.

Для цитирования:

Шабанов В. И. Концепция строительства речного порта «Котовицы» на реке Волхов совмещенного с транспортно-логистическим центром / В. И. Шабанов, С. Л. Беленко, П. А. Гарибин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 670–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-670-682.

Введение (Introduction)

Транспорт является необходимым элементом экономики любой страны, развитие которого всегда должно происходить превентивно по отношению к другим отраслям. На современном этапе развития экономики от него требуется, в первую очередь, снижение транспортной составляющей в цене товара и соблюдение высоких стандартов с позиций минимизации вмешательства в природную среду, что невозможно обеспечить без использования новых технологий в организации перевозок пассажиров и грузов. Мультимодальность, т. е. доставка «от двери к двери», достигается за счет унификации транспортных средств под стандарты тары и упаковки. Логистика позволяет минимизировать время на перевозку и ее стоимость. Развитие железнодорожного электрифицированного и внутреннего водного транспорта решает проблемы экологии [1].

С интеграцией российской экономики в процесс международного разделения труда произошло перераспределение грузопотоков в интересах экспортных перевозок. В настоящее время половина экспортных грузов из страны пересекает границу России на территории Северо-Западного Федерального округа, однако железнодорожные и автомобильные подходы к ним оказались лимитирующим участком в транспортной цепи. На российском побережье Финского залива развиваются, фактически, новые крупные порты: Приморск, Высоцк и Усть-Луга, Бронка. Постоянно наращивает мощности и Большой порт Санкт-Петербург, размещая перегрузочные комплексы в Кронштадте и вблизи комплекса защитных сооружений города от наводнений.

Кроме того, желание развивать транзитный потенциал государств послужило тому, чтобы создавать транспортно-логистические центры (ТЛЦ), имеющие рассеивающий характер. Так, например, некоторые страны в целях развития транзитных грузопотоков (Испания, Нидерланды, Бельгия) создали ТЛЦ на границах с сопредельными государствами. Проводимая в Нидерландах политика позволяет не только перевозить грузы, но и получать дополнительную прибыль от проходящего через страну потока посредством функционирования на пути транспортировки складов и оптимального управления запасами.

Опыт стран Западной Европы показывает существенную роль транзитных логистических центров в формировании бюджета. Так, в Голландии деятельность транзитных логистических

центров приносит 40 % дохода транспортного комплекса, во Франции — 31 %, в Германии — 25 %. В странах Центральной и Восточной Европы эта доля в среднем составляет 30 %. Всего общий оборот европейского рынка логистических услуг достигает более 600 млрд евро [2].

В результате ранжирования регионов Северо-Западного федерального округа (СЗФО) по интегральному показателю установлено, что ядром единой социально-экономической системы являются Новгородская, Вологодская и Ленинградская области. Эффективность развития Северо-Запада во многом определяется использованием территории для транзита [3], [4]. Новгородская земля, история которой неразрывно связана с водными путями является крупным средневековым центром торговли и ремесел. На протяжении многих веков Новгородская республика была центром международной торговли и главным партнером Ганзейского союза [5]. Современная Новгородская область занимает лишь небольшую часть территории Новгородской вечаевой республики, которая существовала до присоединения Великого Новгорода к Москве. Область имеет хорошую транспортную доступность: автомобильную и железнодорожную, однако водный транспорт используется недостаточно, хотя и имеет существенный потенциал развития. Уже сегодня, фактически, наблюдается дефицит провозной способности железнодорожных и автомобильных дорог, которые в перспективе, даже с учетом проводимой модернизации, не в состоянии освоить планируемые грузопотоки.

Одной из основных причин ослабления позиций водного транспортного сообщения на территории Новгородской области является наличие на реке Волхов участков, ограничивающих пропускную способность для судов. Перевозки по главной реке Новгородской области — самый недоиспользованный ресурс региона. Объем водного трафика сейчас составляет менее 2 млн т в год. По мнению региональных властей, этого явно недостаточно. Общий объем грузоперевозок в Новгородской области сейчас превышает 7 млн т в год и именно в усилении роли речного транспорта эксперты видят немалые резервы.

Актуальность проведенного в работе исследования связана одновременно с несколькими проблемными задачами:

- опережающее развитие инфраструктуры водного транспорта Новгородской области;
- создание водной системы СЗФО;
- обеспечение судоходных условий по реке Волхов для увеличения грузовых и пассажирских перевозок.

Предложение по увеличению экономического потенциала Новгородской области за счет строительства мультимодального транспортно-логистического центра у поселения Котовицы носит новаторский характер.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При разработке технико-экономического обоснования путей решения ранее изложенных проблем использовалась совокупность теоретических методов исследования, основанных на главных положениях системного анализа: выделении связей между элементами, изучении особенностей и обобщении результатов для достижения цели. Был проанализирован как отечественный, так и зарубежный опыт реализации проектов и опыта эксплуатации воднотранспортных соединений [6]– [11] и строительства гидротехнических сооружений. Рассматривались наиболее успешные инструменты, применяемые в Европе и Америке [12]–[14]. Для их более эффективной адаптации в России были проанализированы тенденции развития транспортных систем и найдены отличия между ними. Интенсивное функционирование водного транспорта позволяет значительно снизить нагрузку на общую транспортную сеть страны. Западноевропейский опыт показывает, каким образом можно эффективно использовать речные суда для постоянной плановой перевозки грузов. В исследовании при выявлении проблемных областей и поиске способов их решения использовались в основном проекты, реализованные в России. Методика проведения исследования включала приведенную последовательность действий:

1. Сбор доступной информации об основных промышленных зонах г. Москвы, реализованных проектах и подлежащих преобразованию объектах транспортной инфраструктуры.
 2. Анализ исходных данных, приведение их в виде аналитической записки.
 3. Формулирование общих свойств, выявление проблемных областей и механизмов их решения.
- Исследование выполнено в форме технико-экономического обоснования с представлением сводных данных в таблицах и количественных показателей.

Результаты (Results)

Для снятия существующих проблем необходимо использовать внутреннюю водную систему СЗФО (рис. 1). В дополнение к Волго-Балтийскому водному пути, входящему в Единую глубоководную систему Российской Федерации, предлагается задействовать водную систему р. Свирь, Оять, Паша, Волхов, Тигода, Оредеж, Луга, объединив их в единую внутреннюю водную сеть Северо-Запада России [7]–[10]. На стыках сухопутных магистралей и внутренних водных путей органично возникнут транспортно-логистические центры (узлы), в которых будет аккумулироваться и перерабатываться значительная часть экспортных и импортных грузов, что будет служить точками роста экономики на территории Северо-Западного Федерального округа.



Рис. 1. Единая внутренняя водная система Северо-Запада России

По данным [1], основные параметры создаваемой внутренней водной системы СЗФО должны быть следующие:

- количество вновь прокладываемых соединительных каналов — шесть, их суммарная протяженность составляет 151 км;
- количество вновь создаваемых транспортно-логистических узлов на пересечении внутренних водных путей СЗФО с железными и автомобильными дорогами — 12;
- общий объем гидротехнических работ, по оценкам экспертов, равен 180 млрд рублей;
- мощность по перегрузке и переработке грузов в транспортно-логистических узлах внутренней водной системы СЗФО составит около 22 млн т в год.

За счет устройства соединительных каналов, реконструкции гидротехнических сооружений и проведения на водотоках гидротехнических работ страна может получить единую внутреннюю водную систему, органично связанную с железными и автомобильными дорогами и Балтийским морем. Значительная часть экспортных и импортных грузов железнодорожного и автомобильного транспорта будет накапливаться и перерабатываться в транспортно-логистических узлах на стыке сухопутных и внутренних водных магистралей. На стыке железных дорог и внутренних водных

скую область. Длина реки превышает длину прямой линии, соединяющей исток с устьем, всего на 17 %. Ширина реки Волхов у Великого Новгорода достигает 220 м, ниже по течению ширина реки увеличивается, достигая 350–370 м. Уровень падения его невелик — 13–15 м, причем наиболее низкий уровень отмечается в верховье.

Гарантированные габариты судового хода реки Волхов: глубина — 1,95 м, ширина — 50 м, радиус закругления — 500 м. Береговые и плавучие средства навигационного оборудования несветящиеся и обеспечивают плавание только в светлое время суток. На реке Волхов в 26,5 км от устья находится Волховский гидроузел (напор — 14,5 м, шлюз с простой распределительной системой питания габаритами 149 × 17,07 × 3,0 м). Подпор уровней от плотины в отдельные периоды распространяется до озера Ильмень. В настоящее время уровневый режим реки Волхов зарегулирован системой Волховского гидроузла.

Волховский шлюз (рис. 3) включен в список объектов особой важности категории А-1 и относится к Свирскому району гидросооружений и судоходства, являясь составной частью Волго-Балтийского управления водных путей и судоходства. Общая длина шлюза между гранями устоев составляет 225,5 м. Длина верхнего подходного канала — 230 м, длина нижнего подходного канала — 313 м с шириной, соответственно, 38 м и 52 м. Волховский шлюз введен в эксплуатацию 28 июля 1926 г. и в настоящее время нуждается в реконструкции. В период навигации происходит в среднем от 100 до 200 шлюзований. Основные перевозимые грузы: песок, щебень, лес. Контейнерных и многоцелевых терминалов нет.

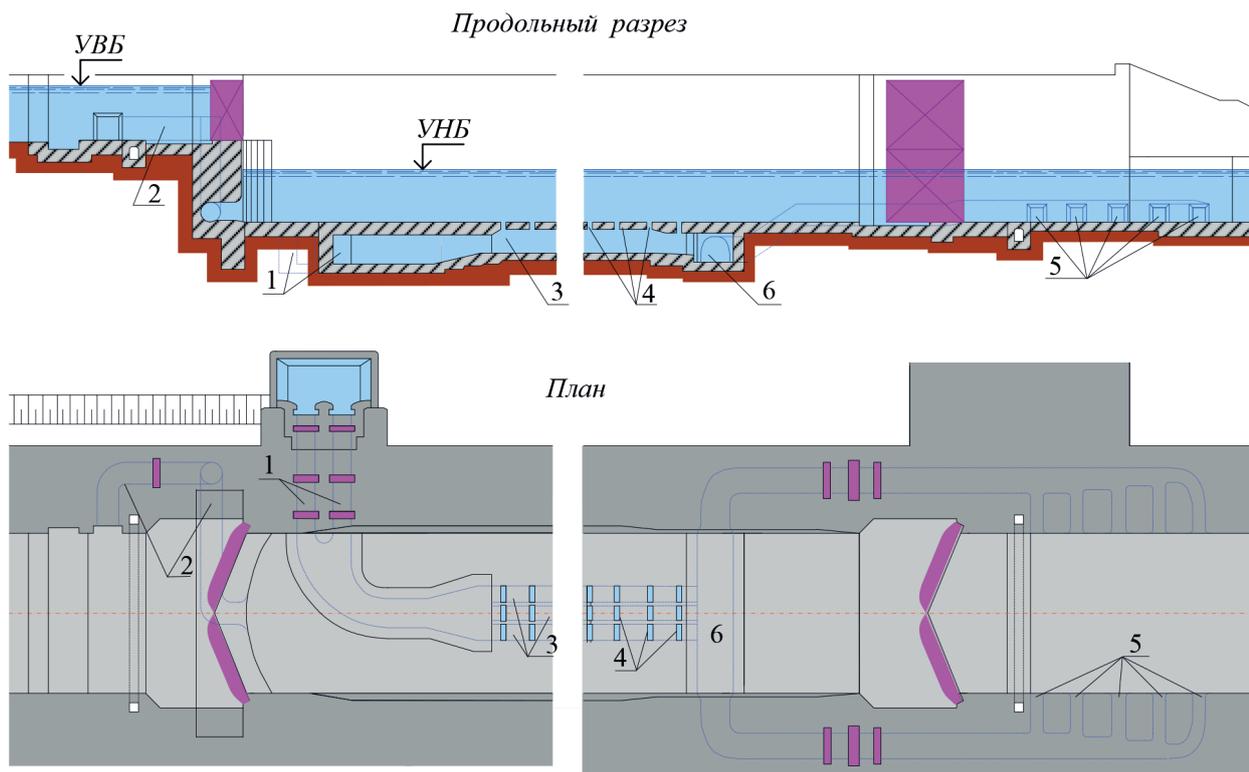


Рис. 3. Схема судовой шлюза Волховского гидроузла:
 1 — водозаборные галереи; 2 — дополнительная галерея; 3 — донные галереи;
 4 — водовыпуски; 5 — выходные отверстия; 6 — поперечная галерея

Во многих местах реку Волхов пересекают мосты. Так, например, на участке Волховского шлюза (27 км) до устья лимитирующим по высоте является мост в селе Иссад на 6,2 км судового хода. Высота его равна 11,4 м от проектного и 8 м от расчетного уровня. На участке от истока до Волховского шлюза лимитирующим является мост в селе Волхово на 140,8 км судового хода. Высота его составляет 11,3 м от проектного уровня и 7,1 м от расчетного.

Особое место в решении общей проблемы создания внутренней водной системы СЗФО занимает реновация судоходного шлюза Волховского гидроузла, находящегося в эксплуатации почти 100 лет и имеющего значительный физический и моральный износ. Волховский шлюз, вступивший в эксплуатацию 28 июля 1926 г., был первым в России для того времени высоконапорным гидротехническим судопропускным сооружением. Шлюз сооружен из железобетона и оснащен двухстворчатыми воротами, затворами водопроводных галерей наполнения и опорожнения. Габариты его не в полной мере отвечают требованиям пропуска современных транспортных и круизных пассажирских судов. Шлюз является культурным наследием — памятником инженерного искусства, к которому могут быть применены только щадящие методы реконструкции без использования деструктивных строительных технологий.

Практически единственным, удовлетворяющим всем требованиям решением по обеспечению прохода судов с увеличенной по сравнению с проектной осадкой, является строительство дополнительной камеры (ступени). Использование схемы многоступенчатого (многокамерного) шлюза с одновременным углублением нижнего подходного канала позволяет обеспечить на порогах шлюзовой лестницы необходимую глубину 4,5 м. При этом необходимо увеличить глубину над порогом верхней головы (за счет уменьшения высоты стенки падения) и организовать систему питания нижней камеры через короткие обходные галереи или устройство клинкетов в нижних двухстворчатых воротах). Береговую стенку камеры можно выполнить в виде облицовки, а внешнюю (со стороны акватории) — из наплавных элементов.

Новгородская область входит в состав межрегионального туристического проекта «Серебряное ожерелье России», состоящего из комплекса маршрутов, объединяющих исторические города, областные центры и крупные населенные пункты Северо-Запада России, в которых сохранились уникальные памятники истории и культуры, а также природные объекты, в том числе включенные в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Основными факторами привлекательности региона для туристов являются многочисленные природно-рекреационные ресурсы и богатое культурное наследие области. Более 90 % российских и иностранных туристов прибывает в Новгородскую область автомобильным и железнодорожным транспортом, в связи с этим с 2009 г. ведется активная работа по возрождению водного сообщения между туристическими центрами Северо-Запада и увеличению объемов пассажирских перевозок водным транспортом. Основные затруднения для круизного водного туризма на реке Волхов связаны с недостаточными глубинами на судовом ходу в меженный период времени. Для увеличения гарантированной глубины до 2,4 м на судоходном плесе необходимо выполнить землечерпательные работы в истоке реки, на Пчевских порогах и в нижнем бьефе Волховской ГЭС общим объемом 73,46 тыс. м³. Это позволит обеспечить транзитное судоходство на реке Волхов при малой величине расходов воды в реке в летне-осеннюю межень.

Другая проблема, связанная с обеспечением безопасного судоходства на реке Волхов, заключается в том, что на судоходном участке реки имеется ряд инфраструктурных ограничений, препятствующих движению судов. Прежде всего, это большое количество мостов с недостаточными подмостовыми габаритами, что также ограничивает судоходство в период стояния высокого уровня воды во время весеннего половодья на реке. Таким образом, реализация водных туристических маршрутов зависит от двух факторов: состояния судоходных глубин на затрудненных участках и положения уровней воды в верхнем бьефе. Судоходные условия в нижнем бьефе зависят от положения уровня воды в Ладожском озере, величины расхода воды, сбрасываемого через гидроагрегаты ГЭС, и отметок дна реки на судовом ходу.

Строительство регионального транспортно-логистического порта (РТЛЦ) Котовицы (рис. 4) и реконструкция водного пути по реке Волхов¹ позволят включить Великий Новгород в систему глубоководных путей (ЕГС) Европейской части России, связав его с южными (порты Астрахань, Ростов-на-Дону) и северными (порты Беломорск, Кандалакша) регионами России.

¹ Реконструкция судового хода реки Волхов. Предпроектные предложения: пояснительная записка 2011-0270-ПП-02: в 6 т. Т. 2. ООО «Балтморпроект», 2012. Арх. № 01186.

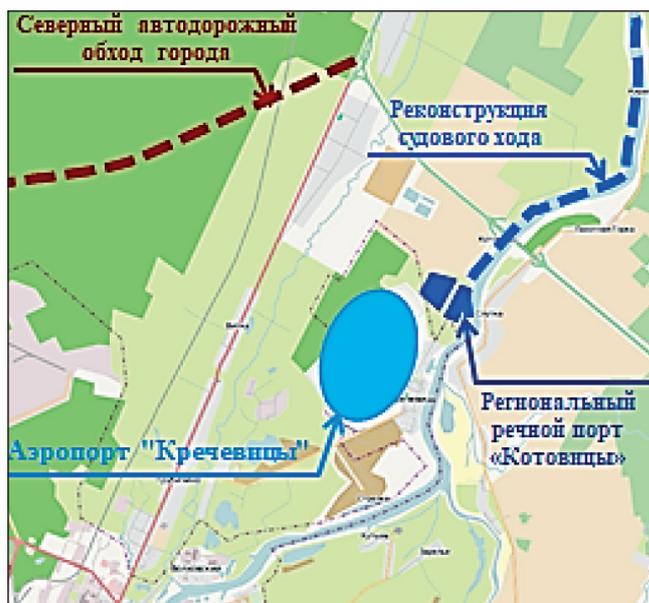


Рис. 4. Ситуационный план расположения регионального речного порта Котовицы

ООО «Балтморпроект» был разработан инвестиционный проект развития региональных комбинированных перевозок грузов с использованием автомобильного, речного, воздушного и железнодорожного видов транспорта, терминалов аэропорта Кречевицы и речного порта Котовицы, совмещенного с Логистическим центром. Целью предложений являлась оценка эффективности включения реки Волхов в транспортную систему России и в долгосрочной перспективе интеграция системы внутренних водных путей Российской Федерации в европейскую систему внутренних водных путей. В качестве основных направлений грузопотоков, отправляемых и принимаемых внутренним водным транспортом из перспективного порта Котовицы, приняты водные пути Европейской части России (Центральный район, Верхняя, Средняя и Нижняя Волга, Донской район, Северо-Западный и Северо-Двинский районы).

Предпосылки для строительства регионального речного порта:

1. Ввод нового аэропорта Кречевицы, расположенного в 14 км северо-восточнее центра города и в 2,5 км северо-западнее микрорайона Кречевицы.
2. Строительство северного автодорожного обхода города по направлению Москва – Великий Новгород – Усть-Луга с использованием существующей дороги Новгород – Луга.
3. Строительство транспортного и технического флота.
4. Реконструкция судового хода реки Волхов (Новгородская область — 124 км; Ленинградская область — 100 км).

Экономически обоснованно, что для развития региональных грузоперевозок в Новгородской области необходимо произвести реконструкцию судового хода реки Волхов для соответствия реки IV и Vb классам внутренних водных путей согласно международной классификации.

Реконструкцию судового хода, в соответствии с решением о разделении на этапы строительства Регионального транспортно-логистического центра и речного порта Котовицы — рис. 5, планируется выполнить в два этапа, соответствующие третьему и четвертому этапам строительства РТЛЦ. Этап 1 рассчитан на первую очередь строительства порта Котовицы (третий этап строительства РТЛЦ). На данном этапе строительства речного порта Котовицы проводятся работы по реконструкции Волховского шлюза и дноуглублению реки Волхов для прохода судов с осадкой до 2,5 м. Этап 2 рассчитан на стадию полного развития порта Котовицы (четвертый этап строительства РТЛЦ). На данном этапе завершается строительство речного порта Котовицы и строительство всего РТЛЦ, проводятся работы по дноуглублению реки Волхов для прохода судов с осадкой до 3,55 м.

В качестве расчетных приняты следующие суда, соответствующие техническим требованиям, предъявляемым к внутренним водным путям в соответствии с международной классификацией:

– этап 1 — речные баржи проектов P165, 81100, 82260, грузовые суда класса Rhine-Herne Canal Vessel типа Johann-Welker;

– этап 2 — все суда этапа 1, а также грузовые суда класса Large Rhine Vessel типа проект NG 273 и толкаемые составы из барж с буксиром толкачом общей длиной до 180 м.

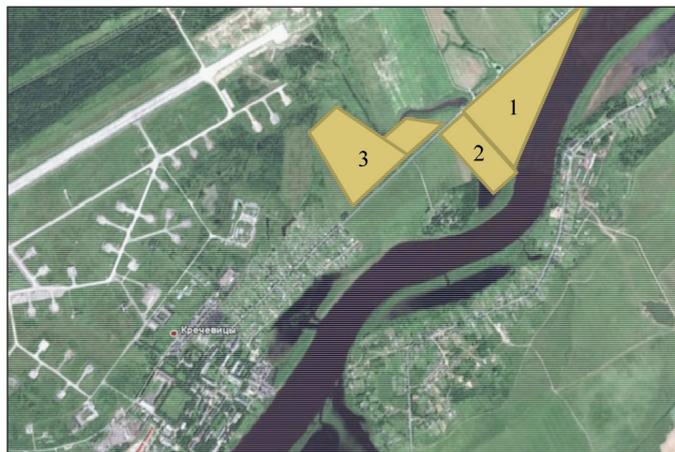


Рис. 5. Совмещение речного порта Котовицы и транспортно-логистического комплекса

Габариты судового хода реки Волхов определены в соответствии с принятыми расчетными судами согласно требованиям «Норм технологического проектирования портов на внутренних водных путях» за исключением глубины реки. Для обеспечения судоходства расчетных судов необходимо проведение дноуглубительных работ. Ориентировочно объемы дноуглубительных работ, определенные в соответствии с использованием комплекса GeoniCS2007, составят 11 378 000 м³. Для обеспечения комбинированных перевозок в составе РТЛЦ планируется строительство следующих объектов: речной порт, логистический центр, железнодорожная станция.

Площадка 1 — причальный фронт, контейнерная площадка, рефконтейнерная площадка, склад для скоропортящихся грузов, открытая площадка, АЗС.

Площадка 2 — административное здание, парковка для грузовых автомобилей, топливный терминал для судов, пожарная часть.

Площадка 3 — торгово-гостиничный комплекс, крытые склады, парковка для грузовых и легковых автомобилей, гаражный блок, автомастерская, ТЭЦ, очистные сооружения.

Виды грузов, планируемых к перевозкам приведены в таблице:

- стандартные 20- и 40-футовые морские контейнеры;
- стандартные 40-футовые рефрижераторные морские контейнеры;
- прочие грузы (тарно-штучные и упаковочные, металлогрузы, оборудование, железобетонные изделия, лесные грузы).

Прогнозируемый грузооборот РТЛЦ на реке Волхов

Наименование грузов	Годовой грузооборот РТЛЦ, тыс. т			
	Логистический центр		Речной порт Котовицы	
	1-й этап	2-й этап	3-й этап	4-й этап
Тарно-штучные и упаковочные	500	4000	200*(140)	250*(175)
Металлогрузы и оборудование	–	–	520*(364)	640*(448)
Контейнеры	650	2500	760*(532)	1520*(1064)
Лесные грузы	–	–	–	450*(315)
<i>Всего</i>	1150	6500	1480*(1036)	2860*(2002)

* — данные грузооборота, определенные при наиболее оптимистичном варианте работы речного порта Котовицы (в скобках представлены реальные значения).

Гидротехнические сооружения речного порта Котовицы указаны на рис. 6.

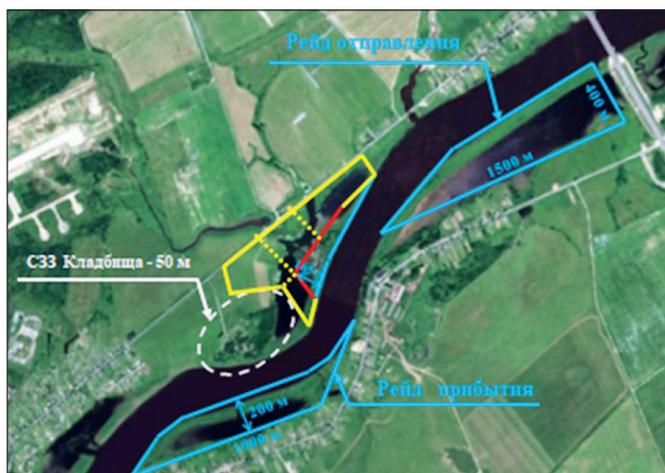


Рис. 6. Состав гидротехнических сооружений речного порта Котовицы

Причалы

Длина причалов для самоходных судов с габаритной длиной более 100 м и несамоходных с габаритной длиной 65–100 м (без учета необходимости перемещения судна вдоль причалов в процессе перегрузочных работ) составляет 125 м, с учетом излома причального фронта под углом 120–150° в сторону акватории — 128 м.

Количество причалов:

- пусковой комплекс — 2;
- полное развитие — 3–5.

Акватория причалов:

- ширина до кромки судового хода при расположении причалов вдоль берега и отсутствии необходимости выполнения оборота судна при его отвале от причала принята равной 57 м;
- с учетом необходимости выполнения оборота судна при его отвале от причала — 165 м.

Проектная глубина акватории у причалов, отсчитываемая от низкого судоходного уровня воды, с учетом навигационного запаса, запасов глубины на дифферент судна, волнения и заносимости принята равной 3,85 м.

Акватория рейдов

Рейды располагаются вне границ акватории береговых причалов порта и транзитного судового хода. При определении размеров акватории рейдов расстановка судов (составов) на рейдах предусмотрена линиями, т. е. в кильватер, параллельно судовому ходу или берегу.

Расстояние между смежными линиями для сухогрузных судов с неогнеопасными грузами назначается не менее 1,5 ширин расчетного судна (состава) — 21,3 м.

Расстояние между судами первой линии и границей проектных глубин со стороны берега, а также между крайними судами и кромкой транзитного судового хода равно не менее 1,5 ширины — 21,3 м.

Расстояние между поперечными рядами судов должно быть не менее 50 м для сухогрузных судов.

Габариты акватории рейдов прибытия и отправления:

- ширина при постановке судов в две линии — 92,5 м;
- длина при постановке трех судов в линии — 530 м;
- площадь каждого рейда — 5,0 га;
- расчетная вместимость каждого рейда — шесть барж.

Территория порта занимает площадь 12 га.

Территориально-технологические зоны порта:

- прикормонная зона, на которой размещают причальные сооружения, перегрузочное оборудование, склады, прикормонные и тыловые железнодорожные и крановые пути;
- тыловая зона, примыкающая непосредственно к прикормонной, включает склады длительного хранения грузов, сооружения и здания производственно-вспомогательного и бытового назначения;
- предпортовая зона, на которой размещают портоуправление, пожарное депо, столовую, магазин, здания, связанные с обслуживанием судоходства и клиентуры порта, площадки для стоянки грузового и легкового автотранспорта.

Территориально-технологические зоны логистического центра:

- тарно-штучных грузов;
- крупнотоннажных универсальных контейнеров;
- рефрижераторных контейнеров;
- лесов и лесных грузов;
- металлогрузов и оборудования.

Площадь территории логистического центра — 24 га.

В процессе эксплуатации РТЛЦ основные выбросы в атмосферу будут образовываться при работе двигателей автотехники и судов, участвующих в работе РТЛЦ. Основное воздействие на водную среду при нормальной эксплуатации РТЛЦ будет осуществляться от сброса бытовых, дождевых и дренажных сточных вод. Разрабатываемый транспортно-логистический комплекс относится, в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов», к V классу и должен иметь санитарно-защитную зону 50 м.

Малоразмерный модульно-логистический речной порт разместится в районе поселков Кречевицы и Котовицы, в 15 км от Великого Новгорода. В зависимости от выбранного варианта стоимость его строительства может составить 5–6 млрд руб. Новый порт ориентирован на работу с контейнерами и будет интегрирован в единую логистическую систему обработки грузов. В концепции проекта предусмотрено строительство причальной стенки, рефрижераторных терминалов, очистных сооружений, торгово-гостиничного комплекса и прочих объектов.

По предварительным расчетам, грузооборот порта составит свыше 2 млн т (60–85 тыс. контейнеров) при навигации, которая продлится 210 дней. Его предназначением является перевалка и хранение скоропортящихся продуктов из северных и балтийских портов на юг и обратно. Перспективный порт будет иметь II категорию (табл. Б5 СП 58.13330.2012.). При строительстве порта в течение трех лет будет задействовано до 2 тыс. рабочих мест. Работающий порт обеспечит от 3 тыс. рабочих мест непосредственно в собственных структурах и сопутствующих бизнес-процессах.

Обсуждение (Discussion)

Внутренние водные пути проходят в шестидесяти регионах, в которых проживает 80 % населения Российской Федерации, производится до 90 % валового внутреннего продукта (ВВП) страны. Затраты на внутренние перевозки в ВВП России оцениваются от 20–30 % от стоимости груза. В Китае — 16 % в Индии — 13 %, в США и Германии — примерно 9 %. Отсюда следует, что сокращение затрат до среднемирового уровня позволит сэкономить более 6 % ВВП, что сопоставимо с расходами на оборону и здравоохранение.

В настоящее время в Российской Федерации доля автоперевозок в общем объеме составляет 80 %, речных — менее 1 %. В США — более 15 %, а в Китае — более 26 %. Грузооборот водного транспорта уменьшился в 3,3 раза, в то время, как в 1990 г. он был сопоставим с автомобильным. Содержание 1 км водного пути обходится в 130 тыс. руб., а 1 км дороги — в 4, 5 млн руб. Глубины внутренних водных путей сократились за 30 лет в среднем на четверть, а их протяженность с гарантированными габаритами судового хода — на 30 %. Более половины судов не могут ходить с полной загрузкой из-за мелководья на реках. Количество речных непассажижских судов сократилось с 31, 8 тыс. единиц в 2000 г. до 15, 6 тыс. в 2015 г. Исправить столь негативную экономическую ситуацию можно за счет использования новых прогрессивных технологий организации грузопе-

ревозок — строительства мультимодальных транспортно-логистических центров и развития водного туризма.

Заключение (Conclusion)

Оптимальное решение по обеспечению судоходных условий на реке Волхов с учетом перспективы повышения интенсивности судоходства и необходимости увеличения гарантированных глубин на судовом ходу может быть получено в сочетании варианта изменения регулирования стока на Волховской гидроэлектростанции с проведением землечерпательных работ на затрудненных для судоходства участках. Эти рекомендации затрагивают интересы всех водопользователей в бассейне реки Волхов и требуют проведения научных исследований, посвященных разработке водных балансов в соответствии с прогнозами социально-экономического развития не только Новгородской, но и Ленинградской, Псковской и Тверской областей.

Совместное решение рассмотренных проблем в развитии водного транспорта позволит повысить эффективность использования речных путей, связывающих Новгородскую область с промышленными и туристскими центрами Северо-Западного федерального округа, позволит создать новые как межрегиональные, так и международные водные маршруты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев А. А.* Транспортная инфраструктура для мультимодальных перевозок в Северо-Западном федеральном округе / А. А. Зайцев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 242–245.
2. *Сергеев В. И.* Общие тенденции развития логистических центров за рубежом / В.И. Сергеев // Логистика и управление цепями поставок. — 2012. — № 5 (52). — С. 7–18.
3. *Никифоров В. Г.* Тенденции развития портов и флота европейского внутреннего водного транспорта / В. Г. Никифоров, А. В. Бурков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 73а–81.
4. *Броило Е. В.* Основные проблемные тенденции развития Северо-западного федерального округа в условиях рынка / Е. В. Броило // Региональная экономика: теория и практика. — 2007. — № 5. — С. 97–103.
5. *Родионов Е. И.* Проблемы использования водных путей Новгородской области / Е. И. Родионов // Гидротехника XXI век. — 2011. — № 3 (6). — С. 46–47.
6. *Эглит Я. Я.* Особенности развития внутренних водных путей Европы / Я. Я. Эглит, А. В. Галин // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1. — С. 38.
7. *Беляков А. А.* Водяная сеть России. Экономико-исторические этюды / А. А. Беляков. — М.; СПб.: Нестор-История, 2014. — 168 с.
8. *Беляков А. А.* Транспортно-энергетическая водная сеть как основа комплексного регулирования ресурсов поверхностных вод России: автореферат дис. ... д-ра географ. наук: 11.00.07. — СПб., 2000. — 35 с.
9. *Гарибин П. А.* Обходные водные пути на Северо-Западе России / П. А. Гарибин, В. В. Клюев, Ю. И. Кононов, С. В. Ларионов, В. И. Шабанов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. — 2006. — № 1 (43). — С. 219–227.
10. *Гарибин П. А.* О путях решения транспортно-экологических проблем Санкт – Петербурга, Ленинградской области и всего Северо-Запада России / П. А. Гарибин [и др.] // Научно-технические проблемы проектирования, строительства и эксплуатации водного транспорта: сб. науч. тр. к 120-летию ОАО «Ленморниипроект». — СПб.: Судостроение, 2005. — С. 30–57.
11. *Беляков А. А.* Единая сеть европейских внутренних водных путей и перспективы присоединения к ней России / А. А. Беляков [и др.] // Современные производительные силы. — 2014. — № 2. — С. 58–71.
12. *Никифоров В. Г.* О возможностях сквозного плавания по маршруту большого Европейского водно-транспортного кольца судов российского и западноевропейского флотов / В. Г. Никифоров, А. В. Никифоров, В. В. Клюев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 112–118.
13. *Милославская С. В.* Внутренний водный транспорт России, Евросоюза и США / С. В. Милославская, А. Б. Мыскина. — М.: Транслит, 2017. — 144 с.
14. *Харламова Ю. А.* Мировая транспортная система: учебное пособие / Ю. А. Харламова. — М.: МИИТ, 2014. — 126 с.

REFERENCES

1. Zaitsev, A. A. "Transport infrastructure for multimodal transport in the north-western federal district." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 1 (2012): 242–245.
2. Sergeev, V. I. "Obshchie tendentsii razvitiya logisticheskikh tsentrov za rubezhom." *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* 5(52) (2012): 7–18.
3. Nikiforov, V. G., and A. V. Burkov. "Tendencies in European inland ports and fleet development." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 1 (2012): 73a–81.
4. Broilo, E. V. "Osnovnye problemnye tendentsii razvitiya Severo-zapadnogo federal'nogo okruga v usloviyakh rynka." *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* 5 (2007): 97–103.
5. Rodionov, E.I. "Problemy ispol'zovaniya vodnykh putei Novgorodskoi oblasti." *Gidrotehnika XXI vek* 3(6) (2011): 46–47.
6. Eglit, Ya. Ya., and A. V. Galin. "Osobennosti razvitiya vnutrennikh vodnykh putei Evropy." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 1 (2014): 38.
7. Belyakov, A. A. *Vodyanaya set' Rossii. Ekonomiko-istoricheskie etyudy*. M.; SPb.: Nestor-Istoriya, 2014.
8. Belyakov, A. A. Transportno-energeticheskaya vodnaya set' kak osnova kompleksnogo regulirovaniya resursov poverkhnostnykh vod Rossii. Abstract of Dr. diss. Sankt-Peterburg, 2000.
9. Garibin, P. A., V. V. Klyuev, Yu. I. Kononov, S. V. Larionov, and V.I. Shabanov. "Obkhodnye vodnye puti na Severo-Zapade Rossii." *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGTU* 1(43) (2006): 219–227.
10. Garibin, P. A., Klyuev, S. V. Larionov, and V.I. Shabanov. "O putyakh resheniya transportno-ekologicheskikh problem Sankt – Peterburga, Leningradskoi oblasti i vsego Severo-Zapada Rossii." *Nauchno – tehnicheskie problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii vodnogo transporta: Sbornik nauchnykh trudov k 120-letiyu OAO «Lenmorniproekt»*. SPb.: Sudostroenie, 2005. 30–57.
11. Belyakov, A. A., E. T. Shcherbakov, T. G. Loginova, and V. O. Nazarova. "Edinaya set' evropeiskikh vnutrennikh vodnykh putei i perspektivy priso-edineniya k nei Rossii." *Sovremennye proizvoditel'nye sily* 2 (2014): 58–71.
12. Nikiforov, V. G., A. V. Nikiforov, and V. V. Klyuev. "O vozmozhnomykh skvoznogo plavaniya po marshrutu bol'shogo Evropeiskogo vodno-transportnogo kol'tsa sudov rossiiskogo i zapadnoevropeiskogo flotov." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 112–118.
13. Miloslavskaya, S. V., and A. B. Myskina. *Vnutrennii vodnyi transport Rossii, Evrosoyuza i SShA*. M.: TRANSLIT, 2017.
14. Kharlamova, Yu. A. *Mirovaya transportnaya sistema: uchebnoe posobie*. M.: MIIT, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шабанов Виктор Иванович —
доцент, генеральный директор
ООО «Балтморпроект»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Гапсальская, 3
e-mail: bmp@baltmp.ru, kaf_port@gumrf.ru
Беленко Сергей Леонидович —
главный инженер проекта
ООО «Балтморпроект»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Гапсальская, 3
e-mail: bmp@baltmp.ru
Гарибин Павел Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shabanov, Victor I. —
CEO, associate professor
LLC Baltmorproekt
3 Gapsal'skaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: bmp@baltmp.ru, kaf_port@gumrf.ru
Belenko, Sergey L. —
Chief project engineer
LLC Baltmorproekt
3 Gapsal'skaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: bmp@baltmp.ru
Garibin, Pavel A. —
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: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2019 г.
Received: June 23, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695

PROSPECTS FOR UNESCORTED NAVIGATION OF TRANSIT VESSELS IN THE REGION OF THE NEW SIBERIAN ISLANDS

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 Arc4 ice class transit vessels in the waters adjacent to the archipelago of the New Siberian Islands during the summer-autumn navigation period are explored. Considering the global tendencies of climate warming, the growing interest of researchers and shipowners to the Northern Sea Route as an alternative route from Europe to Asia via the Suez Canal is noted. However, currently the risks for commercial shipping companies are too high to venture the consistent cargo transportation voyages along the route; the main hazard is a heavy and unpredictable ice situation, as well as poor hydrometeorological support of the Arctic seas.

The ICDC reanalysis is proposed to use to estimate the ice conditions and their change trends. The applicability of this method is confirmed by comparing its results with the actual ice measurements carried out at polar weather stations “Ostrov Kotelnyi” and “Proliv Sannikova” in 1979–2017 period. According to the reanalysis data the mean values of ice thickness in the waters surrounding the New Siberian Islands in summer/autumn months of the above period are derived and the probability estimates to meet ice of unacceptable thickness, which exceeds 0.8 m for Arc4 ice class vessels, are obtained. The mean rates of such probabilities change for all sites of the studied water area are determined that allows us to reveal the main trends in ice conditions changes over the next decade. The results are presented graphically on contour maps by use of Delaunay triangulation technique.

It was concluded that, in general, ice situation in the region is gradually improving, but in different areas of the region the improvement rates greatly varies. Challenging conditions are predicted to remain in the Sannikov Strait and on the approaches to it. Due to the increasing greenhouse effect and anticipated intensification of monsoons, the coastal water areas are expected to encounter the growing water surges from the Arctic, which in turn will bring the arctic ice to the coastal areas and make the ice situation worse. It is demonstrated that the high-latitude routes to the north of the New Siberian Islands tend to clear of ice more quickly in the summer/autumn period and thus become safer and more preferable for navigation by transit vessels. Further studies on continuous basis to estimate the trends in ice situation development in the rapidly changing Arctic and the impact of this situation on the shipping routes and navigation safety are required.

Keywords: Northern Sea Route, New Siberian Islands, Sannikov Strait, safety of shipping, summer/autumn navigation, ice class, trend, transit passage, reanalysis

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.

УДК 656.61.052: 551.583

ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЗЛЕДОКОЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ТРАНЗИТНЫХ СУДОВ В РАЙОНЕ НОВОСИБИРСКИХ ОСТРОВОВ

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 транзитных судов ледового класса Arc4 в акваториях, прилегающих к архипелагу Новосибирские острова, в летне-осенний навигационный период. Отмечен возрастающий интерес исследователей и судовладельцев к Северному морскому пути

как альтернативному маршруту из Европы в Азию в свете глобальных тенденций потепления климата. Указаны риски, которые на сегодняшний день сдерживают рост транзитных грузоперевозок в Арктике. В качестве основного препятствия отмечаются сложная ледовая обстановка и недостаточное гидрометеорологическое обеспечение маршрута. Для оценки ледовых условий и тенденций их изменения предложено использовать результаты реанализа ICDC. Их адекватность подтверждена путем сравнения с данными реальных измерений параметров льда, полученных на полярных станциях «Остров Котельный» и «Пролив Санникова» за период с 1979 по 2017 гг. По данным реанализа, получены средние значения толщины льда в акваториях, прилегающих к Новосибирским островам. Оценены вероятности, с которыми суда с ледовым классом Arc4 могут встретить лед недопустимой толщины в месяцы летне-осенней навигации. Определены средние скорости изменения таких вероятностей для всех участков исследуемой акватории, что позволило выявить основные тенденции изменения ледовых условий на ближайшее десятилетие. Результаты представлены графически на контурных картах с использованием метода триангуляции Делоне. Сделаны выводы о том, что в целом ледовые условия улучшаются, но на разных участках это происходит с разной скоростью. Отмечается, что сложная обстановка останется в проливе Санникова и на подходах к нему. Из-за усиливающегося парникового эффекта и активизации муссонов ожидается усиление нагонов арктических вод вместе со льдом к прибрежным участкам. Показано, что высокоширотный маршрут при этом будет становиться более доступным и безопасным для судоходства в летне-осенний период. Отмечается необходимость дальнейшего изучения тенденций изменения условий судоходства в Арктике, вызванных климатическими изменениями.

Ключевые слова: Северный морской путь, Новосибирские острова, пролив Санникова, безопасность судоходства, летне-осенняя навигация, ледовый класс, тенденция, транзитный проход, реанализ.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетов «Транспортной стратегии Российской Федерации» является развитие Северного морского пути (СМП) как важной магистрали для внутренних и транзитных морских грузоперевозок [1]. В настоящее время суровый климат и ледовая обстановка арктических морей не позволяют большинству торговых судов заходить на СМП. Вместе с тем, согласно современным научным прогнозам, в первой половине XXI в. ожидается стабильное облегчение ледовых условий в Арктике, что улучшает перспективы развития судоходства на СМП в ближайшие десятилетия [2]. В связи с этим развитие представлений об изменениях гидрометеорологической обстановки и их влиянии на безопасность плавания по СМП с учетом глобальных тенденций изменения климата можно считать актуальной задачей океанографии и эксплуатации водного транспорта.

Вопросам безопасности и экономической целесообразности транзитного судоходства в Арктике в свете происходящих климатических изменений посвящено значительное количество научных публикаций [2]–[7]. В частности, в работе [2] даются прогнозные оценки доступности судоходных путей в Арктике в XXI в. Отмечается, что при сохранении нынешних темпов таяния арктических льдов к середине текущего столетия для массового судоходства будут открыты высокоширотные, в том числе трансполярные арктические маршруты. В работах [3]–[6] исследованы вопросы использования СМП в целях торгового судоходства между Европой и Азией и сделаны выводы о том, что такая торговля выгодна при безледокольном прохождении трассы СМП, что в настоящее время возможно лишь при наличии у судна ледового класса и только в ограниченный период года — как правило, с августа по октябрь. Аналогичные заключения сделаны также авторами работы [7]. В исследовании [8] выполнен анализ текущих возможностей круглогодичной навигации на СМП на примере наиболее сложного его участка — Восточно-Сибирского моря. Особый акцент при этом сделан на необходимости восстановления гидрометеорологического обеспечения данного района, с указанием при этом на высокие риски безледокольной навигации из-за крайне неустойчивого климата региона.

Крупные компании-операторы торгового флота («Stena», «Cosco», «Maersk» и др.) проводят свои оценки транзитных возможностей СМП, выполняя пробные рейсы этим маршрутом [4]. Так, в августе–сентябре 2018 г. крупнейший оператор контейнерного флота «Maersk Line» предпринял попытку оценить риски и экономические выгоды СМП, проведя по нему в западном направлении свой новый контейнеровоз «Venta Maersk» (ледовый класс Arc4). Этот переход широко освещался в прессе и был достаточно показательным. В результате судовладелец допустил возможность разовых переходов своих судов по СМП, однако его массовое использование в качестве транзитного маршрута на данный момент признано нецелесообразным из-за наличия высоких рисков¹.

Наиболее сложными с точки зрения навигационной и ледовой обстановки участками СМП являются районы архипелагов, разделяющих арктические моря. В летне-осенний навигационный период наиболее тяжелые ледовые условия обычно наблюдаются в районе архипелага Новосибирские острова, разделяющего море Лаптевых и Восточно-Сибирское море². Как показал опыт прохода «Venta Maersk», несмотря на благоприятный сезон, этот участок маршрута пришлось преодолевать под проводкой атомного ледокола.

Район Новосибирских островов включает участки акватории моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана, расположенные между меридианами 135°E и 165°E и параллелями 78°N с севера и побережьем Евразии с юга (рис. 1).



Рис. 1. Район Новосибирских островов
 Условные обозначения:

— — — — — основная трасса Севморпути, проходящая по проливу Санникова

Основной маршрут СМП проходит по проливу Санникова, расположенному между островами Котельный (острова Анжу) и Малый Ляховский (Ляховские острова). Длина пролива — 238 км, ширина — до 55 км; глубина на фарватере — 24 м. Для судов с малой осадкой в указанном районе может использоваться альтернативный путь через пролив Дмитрия Лаптева. Последний расположен южнее, между островом Большой Ляховский (Ляховские острова) и материковым берегом (на юге). Протяженность этого пролива составляет 115 км, его ширина — 50–61 км, а глубины на фарватере 11–16 м [9]. Ежедекадные (с мая по ноябрь ежедневные) наблюдения

¹ Maersk concludes trial passage of Northern Sea Route [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.maersk.com/news/2018/09/28/maersk-concludes-trial-passage-of-northern-sea-route> (дата обращения: 01.04.2019).

² Pub. 183 Sailing Directions (Enroute). North Coast of Russia. Twelfth Edition, 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/SD/Pub183/Pub183bk.pdf (дата обращения: 01.04.2019).

за изменениями толщины льда в районе пролива Санникова 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 в других частях акватории района Новосибирских островов этой информации недостаточно. Недостаток подобных данных существенно осложняет планирование рейсов в указанном районе и выбор наиболее безопасных и быстрых для определенного месяца маршрутов. Одним из способов решения указанной проблемы является применение для оценки параметров льда метода математического моделирования.

Существующие математические модели, в том числе [10], 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, позволяет оценить вероятность появления в интересующем районе льда, представляющего опасность для конкретного судна, а также выявить современную тенденцию ее изменения. Тем не менее для водных путей района архипелага Новосибирские острова подобные исследования ранее не проводились. Выбираемые для прохода данного района маршруты не всегда являются оптимальными по критерию безопасность – затраты. Таким образом, выявление особенностей, происходящих в современном периоде изменений ледовых условий в районе Новосибирских островов, а также оценка вероятностей появления здесь льда недопустимой по ледовому классу толщины представляют немалый теоретический и практический интерес. Наиболее актуальными такие оценки можно считать для судов класса Arc4, которые, в принципе, могут применяться для осуществления безледокольного транзита по СМП в условиях в летне-осенней навигации².

Целью настоящей работы является оценка перспектив безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов в летне-осенний навигационный период. Для достижения указанной цели были рассмотрены следующие задачи:

1-я задача — определение средних значений толщины льда на различных участках акваторий, прилегающих к Новосибирским островам, для месяцев летне-осенней навигации в современном периоде;

2-я задача — оценка вероятности появления в рассматриваемом районе льдов, представляющих опасность для судов класса Arc4, в период летне-осенней навигации;

3-я задача — выявление тенденций изменения вероятности появления таких льдов в летне-осенний период в данном районе с учетом динамики изменения ледовой обстановки с 1979 по 2017 гг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Знак «Arc4», присваиваемый судам Российским морским регистром судоходства (РМРС), представляет собой самый низкий арктический класс ледового усиления. Его эквивалентом является знак «IA», применяемый Американским бюро судоходства, Бюро «Веритас», Британским Ллойдом, Регистром DNV-Gl и другими классификационными обществами. Согласно правилам РМРС, суда данного класса допущены к самостоятельному плаванию в летне-осеннюю навигацию в разреженных однолетних арктических льдах толщиной до 0,8 м. Плавание в канале за ледоколом разрешено в однолетних льдах толщиной до 1,0 м [11].

В соответствии с правилами плавания в акватории СМП, судам класса Arc4 разрешено самостоятельное плавание в юго-западной части Восточно-Сибирского моря при легком типе ледовых условий в течение года, плавание под проводкой ледокола — при легком и среднем типе ледовых условий с июля по ноябрь и при легком типе ледовых условий с декабря по июнь. Среди судов, работающих на трассе СМП в летне-осеннюю навигацию, доля судов ледового класса Arc4 (или

¹ Основные сведения о действующих гидрометеорологических станциях [Электронный ресурс]. Режим доступа: Станции <http://data.oceaninfo.ru/meta/gms/index.jsp> (дата обращения: 01.04.2019).

² Правила плавания в акватории Северного морского пути (утверждена приказом № 7 Министерства транс-порта РФ от 17 января 2013 г.). С изменениями и дополнениями от 9 января 2017 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsr.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya.html (дата обращения: 01.04.2019).

эквивалентного) составляет приблизительно 40–50 % от общего количества судов арктического класса (Arc4–Arc7) [12]. Это, как правило, суда-снабженцы, исследовательские суда, танкеры, суда типа «General Cargo» и др.¹. Допустимые для них ледовые условия вследствие потепления климата Арктики встречаются все чаще. Поэтому представляется вероятным, что именно суда класса Arc4 составят основу флота, используемого на СМП для транзитной перевозки грузов, в обозримой перспективе.

Учитывая ограниченность данных фактических измерений параметров льда в исследуемом районе, для решения поставленных задач было решено использовать результаты реанализа, проводимого на постоянной основе Объединенным центром климатических данных Гамбургского университета (Integrated Climate Data Center — ICDC)². 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. Подробно математическая основа реанализа представлена в работе [10].

Используемый в настоящей работе реанализ ICDC содержит результаты математического моделирования изменений среднемесячных значений толщины льда для любых районов Мирового океана с дискретностью 13×13 км, в том числе для арктических акваторий. На момент написания статьи указанная информация доступна с официального сайта ICDC за период с января 1979 г. по декабрь 2017 г.

Применимость данных реанализа ICDC для района Новосибирских островов не очевидна и требовала подтверждения. Ее проверка была проведена 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 ЕСИМО³. Измерения проводились полярниками в фиксированных пунктах акватории, удаленных от берега, соответственно, на 200 м и 360 м. В качестве примера в таблице приведены усредненные за период 1979–2017 гг. среднемесячные значения толщины льда в проливе Санникова для различных месяцев по данным обеих станций.

Усредненные за 1979–2017 гг. среднемесячные значения толщины льда (*H*) в проливе Санникова в разные месяцы

Пролив Санникова				Остров Котельный			
Месяц	<i>H</i> , см	Месяц	<i>H</i> , см	Месяц	<i>H</i> , см	Месяц	<i>H</i> , см
Январь	120,00	Июль	86,52	Январь	117,5051	Июль	159,98
Февраль	148,93	Август	3,77	Февраль	149,8491	Август	–
Март	172,65	Сентябрь	0,67	Март	177,6959	Сентябрь	1,10
Апрель	178,85	Октябрь	12,55	Апрель	198,6366	Октябрь	26,54
Май	194,57	Ноябрь	41,27	Май	212,6996	Ноябрь	47,73
Июнь	180,23	Декабрь	80,29	Июнь	205,4183	Декабрь	81,18

¹ Разрешения на плавание судна в акватории Северного морского пути (официальный сайт Администрации Северного морского пути) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsga.ru/ru/rassmotrenie_zayavleniy/razresheniya.html (дата обращения: 01.04.2019).

² Integrated Climate Data Center. Ocean. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/> (дата обращения: 01.04.2019).

³ Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.oceaninfo.ru/> (дата обращения: 01.04.2019).

Доступная с указанных полярных станций информация не является полной. Для ряда месяцев летне-осенней навигации за многие годы данных вообще нет, а для тех лет, когда они имеются, наблюдения проводились лишь в отдельные сутки, когда путь в точки наблюдения (по льду) был относительно безопасен. Наиболее полной является информация, полученная за июнь, поэтому верификация данных реанализа была выполнена только для этого месяца. Установлено, что измеренные на полярных станциях значения толщины льда несколько меньше аналогичных показателей реанализа. Это позволяет предположить, что по мере удаления от берега толщина льда в проливе может возрастать. При проведении проверки применимости реанализа оценивалась достоверность статистических выводов о том, что межгодовые изменения в 1979–2017 гг. среднемесячных значений толщины льда в июне (по данным реанализа), усредненных по всем участкам рассматриваемого района, статистически значимо связаны с изменениями того же показателя, полученного по данным полярных станций.

Принято допущение, согласно которому реанализ ICDC 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 [13]. 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. По результатам проверки установлено, что значения отношения коэффициента корреляции указанных временных рядов к пороговому уровню для полярной станции «Пролив Санникова» составляют 1,18, а для полярной станции «Остров Котельный» — 1,05, откуда следует, что результаты реанализа межгодовых изменений среднемесячных значений средней толщины льда в июне в акватории Новосибирских островов связаны с данными фактических измерений той же характеристики на полярных станциях статистически значимо. Таким образом, принято решение о допустимости применения реанализа ICDC в качестве источника фактического материала.

При решении первой задачи учитывалось, что в рассматриваемом периоде в Арктике происходило потепление климата, вследствие чего процесс изменения средней толщины льда на участках акватории изучаемого района и их ледовитости являлся нестационарным. Поэтому было признано целесообразным рассматривать в качестве современного период 2008–2017 гг. В течение этого десятилетия оценивались средние значения ледовитости участков акватории изучаемого района, а также толщины встречающихся на нем льдов.

В рамках второй задачи проводилась приближенная оценка вероятностей появления льдов, представляющих опасность для судов класса Arc4, за период 2008–2017 гг. для каждого участка района Новосибирских островов. Вероятность оценивалась как отношение количества относящихся к этому периоду лет, в течение которых среднемесячное значение толщины льда превышало допустимый предел (при условии плавания в однолетних разреженных льдах), к общему количеству таких лет. Поскольку в Правилах РМРС [11] указано максимально разрешенное значение толщины льда (0,8 м), соотношение которого к среднему значению не является очевидным (дисперсия распределения толщины льда зависит от множества факторов и слабо поддается оценке), при проведении дальнейшей оценки представляющими опасность были приняты полученные, по данным реанализа, среднемесячные значения толщины льда, превышающие 0,5 м. Дрейфующий лед такой (либо меньшей) толщины в рассматриваемом районе, как правило, является однолетними (толщина многолетних паковых льдов гораздо больше). Кроме того, в связи с отсутствием точных данных о сплоченности льда было принято считать разреженным лед, если покрытие соответствующей акватории льдом не превышало 60 %.

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 и оцененную сверху вероятность встретить на нем лед

недопустимой толщины в период 2008–2017 гг. ($P_{2008-2017}$), можно оценить вероятность аналогичного события для следующего десятилетия P_{18-27} :

$$P_{2018-2027} = P_{2008-2017} + 10B.$$

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 и в будущем. Результаты, полученные при решении указанных задач, отображались на контурной карте изучаемого региона с использованием метода триангуляции Делоне [14].

Результаты (Results)

При решении первой задачи для месяцев с июля по ноябрь периода 2008–2017 гг. для каждого участка изучаемого района определены значения его средней ледовитости и средней толщины встречающегося на нем льда. Установлено, что средние за современный период значения ледовитости участков акватории изучаемого района минимальны в сентябре. В августе и октябре средние значения ледовитости акватории пролива Санникова, а также подходов к нему не превышали уровня 0,4, что свидетельствует о том, что преобладавшие здесь ледовые условия, как правило, были легкими. В ноябре значения средней ледовитости по всей акватории изучаемого района составляли единицу (образование льда здесь всюду начинается в октябре). Ноябрьские льды, таким образом, были в основном сплошными или сплоченными.

В июле периода 2008–2017 гг. средняя ледовитость участков акватории изучаемого района, расположенных на подходах к проливу Санникова со стороны Восточно-Сибирского моря, превышала уровень 0,6–0,8, а толщина льда доходила до 1,5 м, что делало безледокольную навигацию судов класса Arc4 недопустимой. В любые месяцы 2008–2017 гг. значения средней ледовитости участков акватории изучаемого района, относящихся к морю Лаптевых, были заметно меньше, чем для его участков, принадлежащих Восточно-Сибирскому морю. Данная особенность является следствием того, что в море Лаптевых впадают реки Лена, Хатанга, Оленек, Анабар и Яна, которые приносят в него за год более 730 км³ пресной воды, значительная часть которой поступает в летние месяцы. Эта вода, обладая относительно малой плотностью, растекается по всей поверхности моря Лаптевых тонким слоем. В рассматриваемые месяцы она является теплой, что способствует ускорению таяния морских льдов и снижению ледовитости участков акватории изучаемого района, на которых она присутствует.

На рис. 2, а, д отображены построенные по результатам решения первой задачи распределения по акватории района Новосибирских островов средней толщины льдов, встречающихся в современном периоде на различных ее участках с июля по ноябрь.

Из рис. 2 следует, что в современном периоде льды, представляющие опасность для судов ледового класса Arc4, в изучаемом районе встречались лишь в июле и ноябре. В 2008–2017 гг. в июле они встречались практически на всей акватории района. В августе (см. рис. 2, б) льды со средней толщиной более 0,5 м располагались в северо-восточной части данного района. Пролив Санникова для судов Arc4 был вполне проходим с августа по октябрь (см. рис. 2, б – в). Установлено также, что в ноябре во всей западной части Восточно-Сибирского моря преобладали льды со средней толщиной более 0,8 м, что делало невозможным выход в него из пролива Санникова судам рассматриваемого ледового класса. Поэтому безледокольная навигация таких судов в изучаемом районе в 2008–2017 гг. в ноябре была невозможна (см. рис. 2, д).

В результате решения второй задачи, для каждого рассматриваемого месяца и каждого участка акватории изучаемого района за период 2008–2017 гг. оценено значение $P_{2008-2017}$. Распределения значений этого показателя для месяцев летне-осенней навигации представлены на рис. 3.

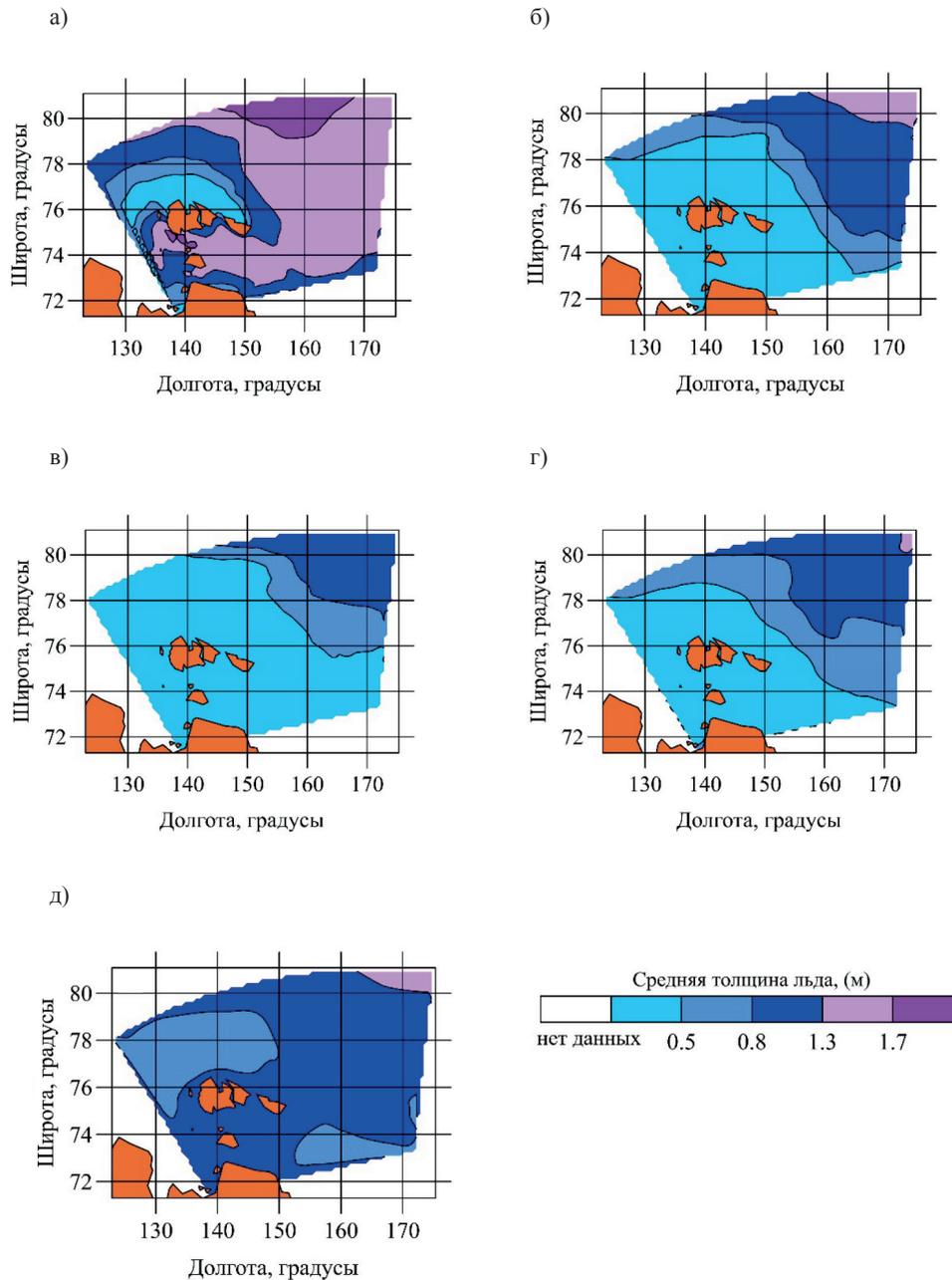


Рис 2. Средние среднемесячные значения толщины льдов (м) на различных участках акватории района пролива Санникова за период 2008–2017 гг.: *а* — в июле; *б* — в августе; *в* — в сентябре; *г* — в октябре; *д* — в ноябре

Из рис. 3 следует, что значения $P_{2008-2017}$ для рассматриваемых судов с августа по октябрь на всем участке СМП из моря Лаптевых в Восточно-Сибирское море, включая пролив Санникова, не превышали 0,3. Учитывая представленные на рис. 2 распределения в районе средней толщины льда, очевидно, что навигация судов ледового класса Arc4 здесь была на них достаточно безопасна. В июле значения $P_{2008-2017}$ на участках, расположенных на подходах к проливу Санникова со стороны как моря Лаптевых, так и Восточно-Сибирского моря, находились в пределах 0,5–1, что делало безледокольную навигацию здесь весьма рискованной.

В результате решения третьей задачи для каждого рассматриваемого месяца и каждого участка акватории изучаемого района оценена средняя скорость изменения вероятности встречи судами льдов с толщиной, выходящей за допустимые для класса Arc4 пределы. По этим данным

построены соответствующие распределения по акватории района Новосибирских островов значений указанных показателей, которые представлены на рис. 4.

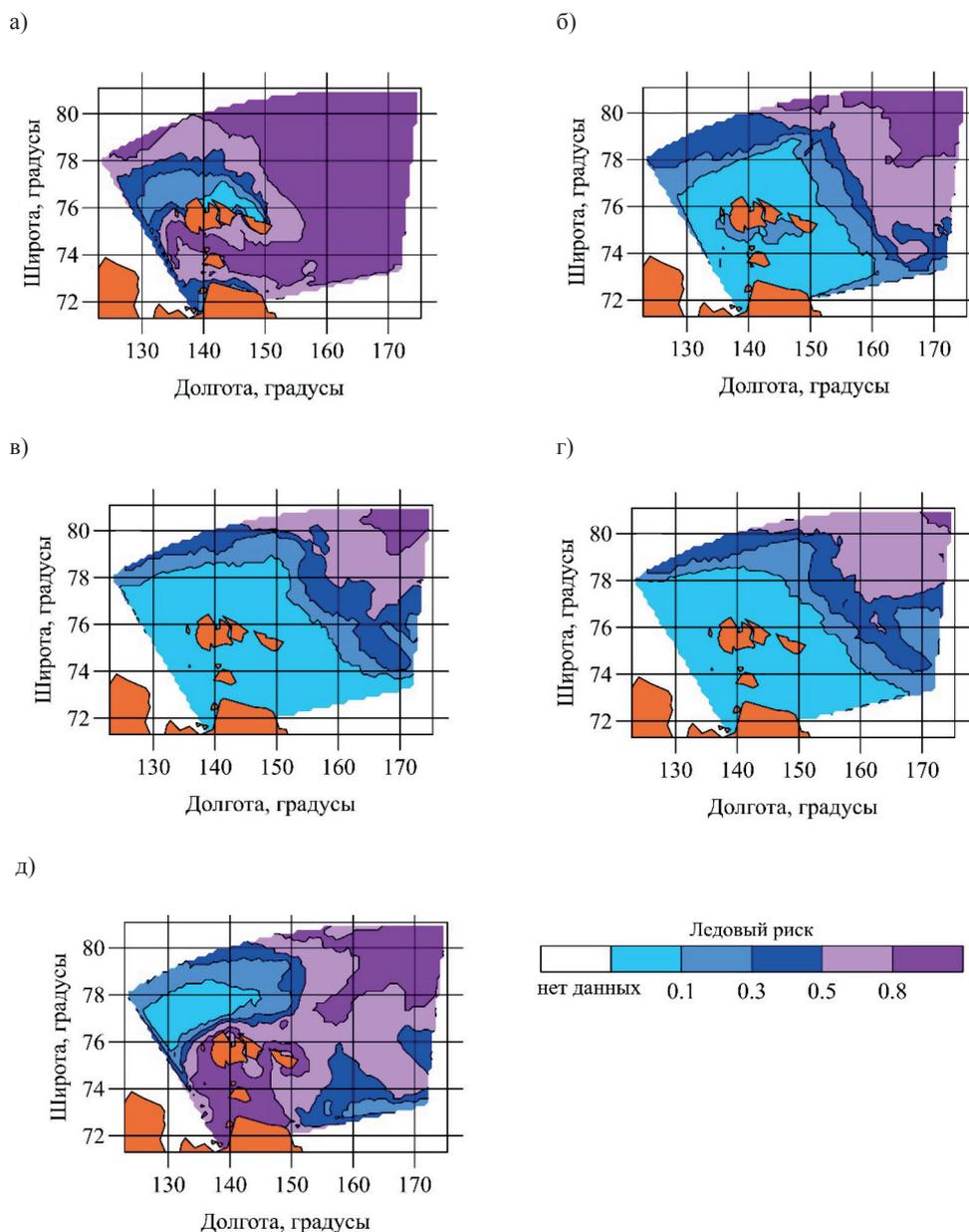
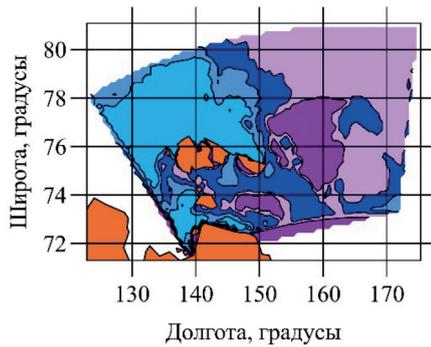


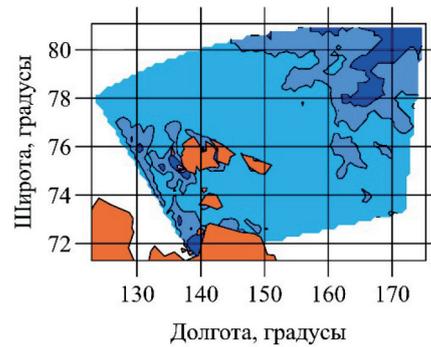
Рис. 3. Распределение по акватории изучаемого региона оцененных за период 2008–2017 гг. значений $P_{2008-2017}$ для судов ледового класса Arc4 для месяцев: а — в июле; б — в августе; в — в сентябре; г — в октябре; д — в ноябре

Из рис. 4 следует, что в августе–октябре вероятность появления льдов недопустимой толщины быстрее всего снижалась на участках, расположенных в его южной и северо-западной части (в море Лаптевых). В проливе Дмитрия Лаптева навигация судов с малой осадкой в 1979–2017 гг. становилась более безопасной. В июле вероятность появления льдов недопустимой толщины не снижалась практически на всей акватории района Новосибирских островов. Во все месяцы летне-осеннего навигационного периода невысокой была скорость снижения данной вероятности и непосредственно в акватории пролива Санникова, а также на подходах к нему как с запада, так и с востока. Последнее позволяет предположить, что характеристики ледовых условий на участке трассы СМП, проходящем по изучаемому району, отображенные на рис. 2–4, могут рассматриваться как их вероятные оценки сверху для периода 2018–2027 гг.

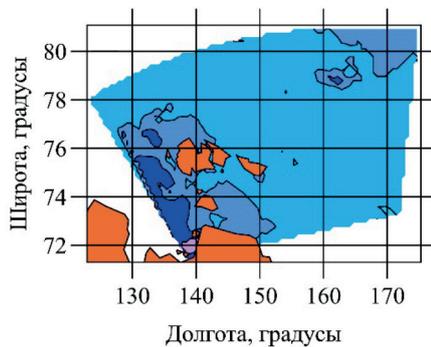
а)



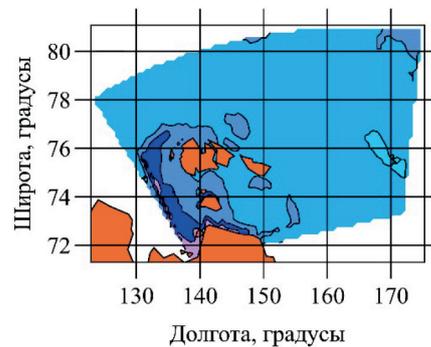
б)



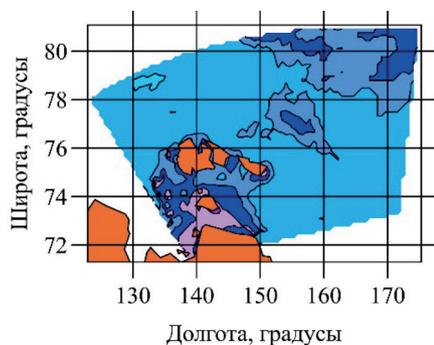
в)



г)



д)



Скорости изменения частоты встречи льда, (год⁻¹)
нет данных -0.03 -0.01 -0.005-0.001 0.001

Рис. 4. Распределение по акватории района Новосибирских островов средней за период 1979–2017 гг. скорости изменения рисков появления опасных льдов: а — в июле; б — в августе; в — в сентябре; г — в октябре; д — в ноябре

Обсуждение (Discussion)

Выявленные особенности распределений по акватории района Новосибирских островов средних значений толщины льда, вероятности появления льдов недопустимой толщины, а также скорости изменения таких вероятностей в 1979–2017 гг. соответствуют современным представлениям о последствиях происходящего потепления климата Арктики, откуда следует, что безледокольная навигация судов ледового класса Arc4 в данном районе возможна и относительно безопасна в августе–октябре. Наиболее благоприятные условия в эти месяцы для нее складываются на высокоширотном маршруте, огибающем архипелаг с севера. За период 1979–2017 гг. вероятность появления здесь льдов с толщиной, превышающей допустимую для судов класса Arc4, снижалась быстрее всего.

В июле путь в обход островов Анжу с севера в современном периоде невозможен, так как в Восточно-Сибирском море располагается ледовый массив, практически непроходимый для судов рассматриваемого класса. Непрост в этом месяце и путь по проливу Санникова. Тем не менее представляется вероятным, что в ближайшем десятилетии для июля все более предпочтительным будет также являться высокоширотный маршрут СМП, что подтверждает справедливость выводов [2]. Выявленные закономерности не являются случайными. В летние месяцы вследствие усиления парникового эффекта в атмосфере происходит потепление климата внутренних районов Евразии. При этом над ними происходит снижение общего фона атмосферного давления. В то же время над акваториями Арктики, многие из которых летом сохраняют ледовый покров, температура воздуха меняется гораздо менее заметно. В результате в летние месяцы из-за парникового эффекта увеличивается разность атмосферных давлений *суша – море*, что, в свою очередь, вызывает усиление любых муссонов. Усиление муссонов в Арктике активизирует нагоны ее вод, а, следовательно, и дрейфующих льдов к побережьям, что способствует «запечатыванию» льдом прибрежных акваторий и проливов. При этом акватории, по которым проходит высокоширотный маршрут СМП, будут быстрее освобождаться от льда. Такое развитие событий будет происходить до тех пор, пока будет продолжаться усиление парникового эффекта в атмосфере. Высокоширотный маршрут СМП по этой причине будет становиться все более доступным.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реанализ ICDC может быть использован для получения информации об изменениях среднемесячных значений средней толщины дрейфующих льдов в любых частях акватории района Новосибирских островов в период 1979–2017 гг. Он пригоден также для разработки долгосрочных прогнозов таких изменений, которые могут оправдаться в случае, если современные процессы потепления в Арктике продолжатся.
2. Безледокольная транзитная навигация судов ледового класса Arc4 в настоящее время возможна и относительно безопасна с августа по октябрь. Наилучшие условия для нее существуют в сентябре.
3. Происходящие перемены климата способствуют быстрому уменьшению толщины льда в южной части района Новосибирских островов и проливе Дмитрия Лаптева, однако в проливе Санникова скорость этого процесса относительно невелика, а ледовые риски здесь, по-видимому, будут оставаться высокими в ближайшие годы.
4. При дальнейшем потеплении климата Арктики все более доступным и безопасным будет становиться высокоширотный маршрут СМП, который проходит к северу от островов Анжу. Ожидается, что для транзитных судов в летне-осенний период он станет безопаснее традиционного маршрута, проходящего через пролив Санникова.
5. Актуальной проблемой развития СМП является совершенствование применяемых технологий менеджмента ледовых рисков при допуске на акваторию СМП водного транспорта, в том числе для выполнения безледокольного транзита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олерский В. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия – XXI век. — 2015. — № 29. — С. 8–9.
2. 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.
3. 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.

4. Beveridge L. Interest of Asian Shipping Companies in Navigating the Arctic / L. Beveridge, M. Fournier, F. Lasserre, L. Huang, P. L. Têtu // *Polar Science*. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 404–414. DOI: 10.1016/j.polar.2016.04.004.
5. 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.
6. 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.
7. Абрамов А. В. Организация ледокольной проводки транспортных судов / А. В. Абрамов, М. А. Загородников // *Управленческое консультирование*. — 2017. — № 10 (106). — С. 111–117. DOI: 0.22394/1726-1139-2017-10-111-117.
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. 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.
11. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010. — Т. 1. — 479 с.
12. Ольховик Е. О. Исследование изменения структуры транспортного флота в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-51802018-10-6-1225-1233.
13. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
14. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. — Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2002. — 128 с.

REFERENCES

1. Olerskii, V. “Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti.” *Transportnaya strategiya – XXI vek* 29 (2015): 8–9.
2. 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.
3. Lee, Sung-Woo, and Ju-Mi Song. “Economic possibilities of shipping though Northern Sea route.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30.3 (2014): 415–430. DOI: 10.1016/j.ajsl.2014.12.009.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Abramov, Aleksey V., and Mikhail A. Zagorodnikov. “Organization of Icebreaking Conducting of Transport Courts.” *Administrative Consulting* 10(106) (2017): 111–117. DOI: 0.22394/1726-1139-2017-10-111-117.
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. Kostyanoj, and A.V. Semenov. *Vostochno-Sibirskoe more: entsiklopediya*. Edited by G. G. Matishova. M.: Mezhdunar. otnosheniya, 2014.

10. 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

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

12. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of changes in the transport fleet structure in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.

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

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

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 2 июня 2019 г.

Received: June 2, 2019.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704

KINETICS OF METAL MATERIALS HARDENING AT THE CAVITATION WEAR

Y. O. Gorbachenko, Y. N. Tsvetkov, Y. K. Loparev

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

The kinetics of metal alloys hardening within the incubation period of cavitation wear is explored in the paper. The tests are carried out on five materials — Al-Si-alloy AK12pch, brass L40Mtz3Zh, aluminum bronzes BrA9Zh4N4L and BrA7Mtz15Zh3N2Tz2L, and electrolytic chrome coating. All alloys listed above are used to manufacture either ship propellers (the copper alloys) or ship diesel parts (the aluminum-silicon alloy and chrome coating). An ultrasonic vibratory apparatus is used to conduct the experiments. The frequency and amplitude of the apparatus horn vibration are 22 kHz and 25 μm respectively. The fresh tap water is used in all experiments. The periodical weighing of the materials samples occurs during the tests. As a result the plots of mass losses versus time are obtained to estimate the incubation period duration. The microhardness of the samples surface exposed to cavitation attack is measured after the definite spans of time within the incubation period, and these measurements are carried out at different loads on the penetrator of the microhardness tester. It is shown, that during the incubation period the microhardness increases first and then decreases. Accordingly, the incubation period can be divided into two stages: the stage of hardening and stage of softening, the durations of these two stages are approximately equal. Hence, the microhardness reaches its maximum not at the end of the incubation period, but at the end of the hardening stage. The microhardness of the less ductile alloys such as a chrome coating after the incubation period completion as a rule decreases below the value corresponding to the initial state; whereas for the brass the microhardness after the incubation period completion is essentially higher than the microhardness before the cavitation attack. Thus, the microhardness measurements during the second half or at the end of the incubation period do not give the true information about the hardening degree of a metal.

Keywords: cavitation wear, ultrasonic vibratory apparatus, metal materials, incubation period of wear, plastic deformation, microhardness, metal hardening, metal softening.

For citation:

Gorbachenko, Yevgeniy O., Yuriy N. Tsvetkov, and Yuriy K. Loparev. “Kinetics of metal materials hardening at the cavitation wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704.

УДК 620.193.16+531.3

КИНЕТИКА УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ

Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков, Ю. К. Лопарев

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

Выполнено исследование кинетики упрочнения сплавов в пределах инкубационного периода кавитационного изнашивания. Проведены испытания металлических материалов: силумина АК12пч, латуни ЛЦ40Мц3Ж, бронз BrA9Ж4Н4Л и BrA7Мц15Ж3Н2Ц2Л и электролитического хромового покрытия, применяемых для изготовления блоков цилиндров судовых дизелей, судовой арматуры, гребных винтов и для нанесения на поверхность втулок цилиндров дизелей соответственно. Эксперименты проводились в пресной воде на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе при частоте колебаний концентратора, равной 22 кГц и амплитуде колебаний его торца около 25 мкм. В процессе испытаний проводили периодическое взвешивание образцов, по результатам которых строили кинетические кривые изнашивания, и по ним оценивали продолжительность инкубационного периода. В течение инкубационного периода также проводили измерения микротвердости изнашиваемой поверхности при разных нагрузках на индентор. По-

казано, что в течение инкубационного периода сначала происходит увеличение микротвердости поверхности, а потом ее уменьшение. Соответственно инкубационный период можно разделить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения, при этом продолжительность этих стадий примерно одинакова, и микротвердость достигает своего максимального значения не в конце инкубационного периода, а по окончании его первой стадии — стадии упрочнения. Продолжительности стадий упрочнения и разупрочнения примерно одинаковы. Для менее пластичных материалов, таких как хромовое покрытие, микротвердость после окончания стадии разупрочнения, как правило, снижается ниже значения, соответствующего исходному состоянию, тогда как для более пластичной латуни микротвердость после окончания стадии разупрочнения существенно выше микротвердости поверхности до кавитационного воздействия. Таким образом, измерения микротвердости во второй половине инкубационного периода или в момент его окончания не дадут истинной информации об упрочнении металла.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, металлические материалы, инкубационный период изнашивания, пластическая деформация, микротвердость, упрочнение металла, разупрочнение металла.

Для цитирования:

Горбаченко Е. О. Кинетика упрочнения металлических материалов при кавитационном изнашивании / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков, Ю. К. Лопарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704.

Введение (Introduction)

На водном транспорте кавитационный износ — разрушение поверхности в потоке жидкости при воздействии струй и ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных каверн — возникает на лопастях и направляющих насадках гребных винтов [1], [2], а также на омываемых водой поверхностях втулок и блоков цилиндров судовых высокооборотных дизелей [3]. Очаги кавитационного износа влияют не только на прочность изнашиваемых деталей, но и на КПД оборудования, поэтому предотвращению этого явления уделяется особое внимание. Одним из эффективных способов борьбы с кавитационным изнашиванием является выбор и применение износостойких сплавов и покрытий [3]–[8], что требует разработки надежных критериев кавитационной износостойкости. Многочисленные исследования этого вопроса [3], [8]–[11] показали, что наилучшим образом отражают кавитационную износостойкость энергетические критерии. Первый критерий подобного рода был предложен А. Тирувенгадамом [9]. Этот критерий определяется как площадь под диаграммой *напряжение – деформация* материала, доведенного до разрушения, т. е., по сути, критерий представляет собой удельную энергию разрушения (деформации) и имеет размерность Дж/м³. Дальнейшим этапом развития энергетических критериев износостойкости при кавитационном изнашивании и капельной эрозии можно считать критерий, предложенный Л. И. Погодаевым [3], представляющий собой критическую плотность потока мощности деформации; при разработке указанного критерия предполагалось, что в условиях циклически изменяющихся нагрузок единичный объем материала обладает ограниченной способностью аккумулировать энергию не только по величине, но и по времени, т. е. предложенный критерий имел размерность Вт/м².

Широкому применению энергетических критериев износостойкости мешает то обстоятельство, что они требуют знания схемы напряженного состояния поверхности, подвергающейся кавитационному воздействию, так как от напряженного состояния зависит пластичность металла, а, следовательно, и его энергоемкость. Очевидно, что значения удельной энергии деформации, получаемой по результатам стандартных испытаний на одноосное растяжение, не могут служить достоверной оценкой энергоемкости поверхностных слоев, деформируемых в условиях кавитационного воздействия. При холодной пластической деформации металла происходит его упрочнение (наклеп), что отражается в повышении его твердости. Известно, что зависимость твердости (или микротвердости) от интенсивности пластической деформации едина и не зависит от схемы напряженного состояния, при которой происходило деформирование металла [12]. Поэтому измерением твердости поверхности при кавитационном воздействии можно определить интенсивность деформаций, соответствующую началу разрушения поверхности, т. е. отделения с нее частиц износа.

Вместе с тем вопрос, в какой момент следует измерять твердость поверхности в процессе кавитационного воздействия, остается открытым. Известно, что кавитационное изнашивание металлических материалов характеризуется наличием инкубационного периода, в течение которого происходит накопление пластических деформаций в поверхностном слое. Очевидно, что измерение твердости должно производиться в пределах инкубационного периода. Однако подробных исследований кинетики упрочнения металлов в это период не проводилось, а имеющиеся данные не дают полную картину изменения твердости в течение инкубационного периода. Так, в работах [7], [8] показано, что при испытании на струеударных стендах и магнитоотриксционных вибраторах в пределах инкубационного периода твердость поверхности возрастает, достигая насыщения. В то же время в работе [3] получено, что микротвердость технического алюминия при испытании на струеударном стенде проходит через максимум.

Целью работы является исследование кинетики упрочнения сплавов при кавитационном воздействии в пределах инкубационного периода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на магнитоотриксционном вибраторе (МСВ) в мягкой пресной воде при температуре 20 ± 3 °С. Частота колебаний концентратора составляла около 22 кГц, а амплитуду колебаний торца концентратора МСВ поддерживали равной 25 мкм [2]. Из большого объема материалов, применяемых для изготовления деталей судового оборудования, подвергающихся кавитационному воздействию, а именно: гребных винтов, втулок и блоков цилиндров судовых дизелей, судовой арматуры, были выбраны материалы, отличающиеся по твердости и склонности к упрочнению: хромовое электролитическое покрытие на сером чугуна, латунь ЛЦ40Мц3Ж, силумин АК12пч и алюминиевые бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л и БрА9Ж4Н4Л.

Хромовое покрытие наносили способом проточного анодноструйного хромирования на пластины толщиной 7 мм из серого чугуна. Толщина покрытия составила в среднем 90 мкм. Для испытаний из пластин вырезали квадратные образцы с размерами в плане 16×16 . Латунь выплавляли в электропечи. Образцы также были квадратной формы и имели размеры $16 \times 16 \times 8$. Образцы из бронзы вырезали из гребных винтов, бывших в эксплуатации, они представляли собой цилиндрики диаметром и высотой, соответственно, 16 и 10 мм. Аналогичной формы и размеров были образцы из силумина. Поверхность образцов, которую предполагалось подвергнуть кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали шкурками разной зернистости, а затем полировали. Для крепления испытываемого образца в емкости с водой использовали специальную оправку. Расстояние между плоской поверхностью образца и торцом концентратора устанавливали равным 0,5 мм.

В процессе испытаний образцы периодически вынимали из оправки, промывали, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200 с дискретностью показаний 0,05 мг, а затем проводили измерения профиля поверхности и измерения микротвердости. По результатам измерения потерь массы строили зависимости *износ – время*. Продолжительность инкубационного периода оценивали по точке пересечения с осью времени касательной, проведенной к участку наибольшей скорости изнашивания [13]. Так как диаметр микроструй жидкости в условиях испытаний на ультразвуковых МСВ составляет примерно 1–10 мкм, для исследования упрочнения поверхностных слоев применяли *метод микротвердости*. Измерения проводили на микротвердомере ПМТ-3. Во избежание влияния на результат измерения явления нарушения подобия отпечатков, нанесенных на поверхность после разной продолжительности кавитационного воздействия, что может иметь место вследствие изменения характера распределения деформации по толщине поверхностных слоев, значения микротвердости определяли при трех нагрузках на индентор Виккерса: для хромового покрытия — при 0,490; 0,980 и 1,96 Н; для силумина, латуни и бронз — при 0,196; 0,490 и 0,980 Н.

Испытанию подвергались по два образца хромового покрытия, силумина и латуни и по одному образцу каждой бронзы. На хромовом покрытии, силумине и латуни при каждой нагрузке наносили шесть отпечатков — по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов (всего 18 отпечатков) и за результат брали среднее арифметическое значение; на образцах бронзы при каж-

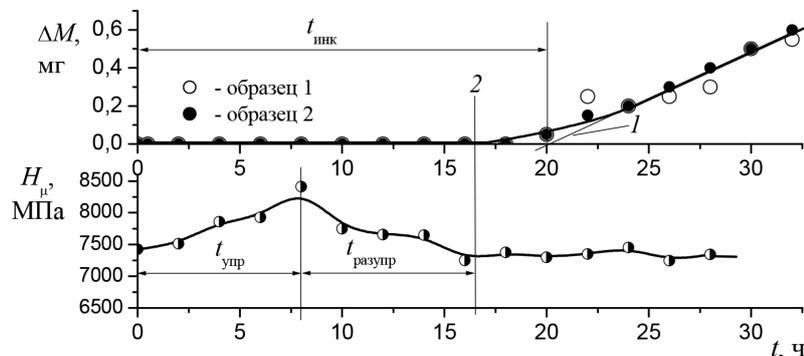
дой нагрузке наносили пять отпечатков (всего 15 отпечатков) и за окончательный результат также брали среднее арифметическое. Измерения микротвердости в течение инкубационного периода проводили до тех пор, пока рельеф поверхности, подвергаемой кавитационному воздействию, позволял наносить четкие по форме отпечатки индентора.

Результаты (Results)

На рис. 1 представлены зависимости потерь массы от времени кавитационного воздействия на МСВ и соответствующие изменения микротвердости поверхности в течение инкубационного периода кавитационного изнашивания хромового покрытия, латуни и силумина. Как видно, на всех испытанных металлах прослеживается одна и та же закономерность: сначала микротвердость возрастает, а затем снижается, и наблюдается тенденция к стабилизации ее значения, это видно по результатам испытания хрома (рис. 1, а) и частично — латуни (рис. 1, б). Тем не менее сделать однозначный вывод для всех сплавов о том, стабилизируется ли окончательно микротвердость после окончания инкубационного периода, или происходит ее дальнейшее периодическое изменение не представляется возможным, так как когда происходит отделение частиц износа и на поверхности появляется развитый рельеф, наносить четкие отпечатки на такую поверхность не представляется возможным. Например, на силумине (рис. 1, в) измерения пришлось прекратить до выхода зависимости $H_{\mu}(t)$ на горизонтальный участок, из-за того, что сильно развитый рельеф поверхности не позволил наносить четкие отпечатки.

Если отметить выход зависимости $H_{\mu}(t)$ на горизонтальный участок вертикальной линией 2 (см. рис. 1, а и б), то видно, что положение линии 2 примерно соответствует окончанию инкубационного периода, определенного, согласно рекомендациям [13], по точке пересечения касательной 1 с осью абсцисс. Таким образом, можно условно разбить инкубационный период на две стадии: *стадию упрочнения* $t_{упр}$ и *стадию разупрочнения* $t_{разупр}$, продолжительность которых примерно одинаковая.

а)



б)

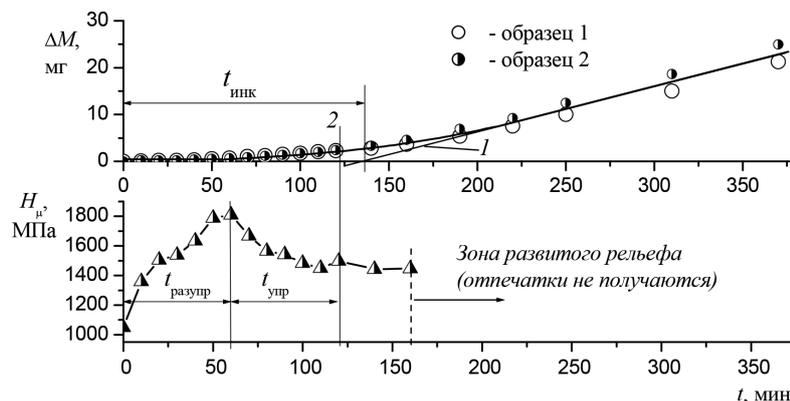


Рис. 1. (Начало)

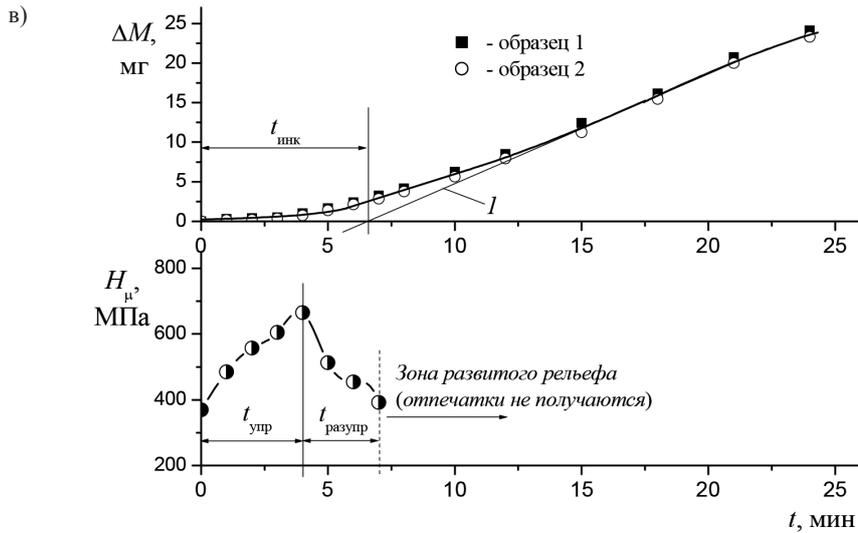


Рис. 1. Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании: а — хромового покрытия; б — латуни ЛЦ40МцЗЖ; в — силумина АК12пч

Аналогичный характер имеют также зависимости $H_{\mu}(t)$, полученные на бронзах. Измерения на косых шлифах, приготовленных из образцов силумина после различной продолжительности кавитационного воздействия в течение инкубационного периода, показали, что на стадии упрочнения идет постепенный рост толщины поверхностного слоя, пластически деформированного при кавитационном воздействии. При этом на стадии упрочнения микротвердость H_{μ} слоев плавно снижается с увеличением расстояния h от поверхности (рис. 2, а) и выходит на горизонтальный участок; по значению h , соответствующему выходу зависимости $H_{\mu}(h)$ на горизонтальный участок, можно определить глубину проникания пластической деформации. С приближением к максимуму на кривой $H_{\mu}(t)$ — см. 1, в — разброс точек на зависимости $H_{\mu}(h)$ увеличивается, что объясняется, по-видимому, постепенным насыщением поверхностных слоев энергией пластической деформации, при этом вследствие анизотропии и случайного положения в объеме металла не все кристаллиты имеют равную способность к аккумулярованию пластической деформации. Однако при общем увеличении разброса точек среднее значение микротвердости при приближении к концу стадии упрочнения выравнивается по глубине, т. е. наклон начального участка зависимости $H_{\mu}(h)$ становится менее выраженным (рис. 2, б).

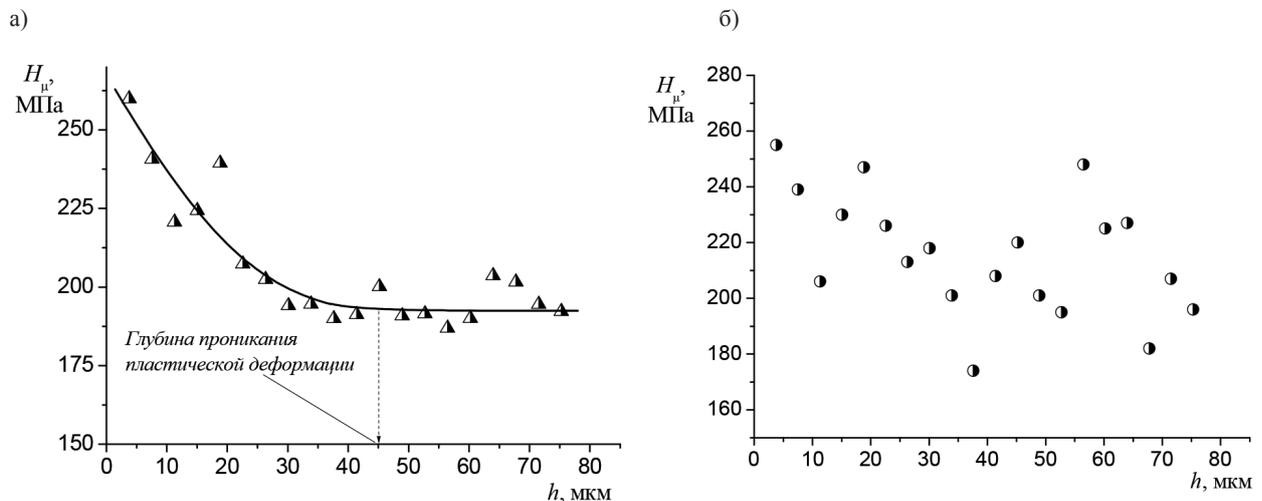


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя силумина, после кавитационного воздействия на МСВ течение 0,75 мин (а) и 3,5 мин (б)

Следует отметить, что характер изменения микротвердости металлов с увеличением продолжительности кавитационного изнашивания не противоречит характеру изменения остаточных напряжений в поверхностном слое, измеренных рентгеновским методом, возникающих в результате кавитационного воздействия на ультразвуковом МСВ [14] и в условиях гидродинамической кавитации [15]. При кавитационном изнашивании пластической деформации подвержен тонкий поверхностный слой металла, и деформация распределена неравномерно по толщине слоя: пластическая деформация постепенно распространяется вглубь материала, толщина деформированного слоя увеличивается и проходит через максимум в момент, предшествующий началу трещинообразования в слое, в котором достигается предельная деформация. Таким образом, так как индентор микротвердомера проникает на некоторую глубину, значения микротвердости поверхности после кавитационного воздействия характеризуют интегральную микротвердость, определяемую микротвердостью всех слоев, расположенных по глубине вдавливания индентора. В этих условиях очень важно правильно выбрать нагрузку на индентор.

В таблице приведены результаты обработки зависимостей микротвердости поверхности испытанных сплавов от времени кавитационного воздействия, полученных при разных нагрузках P на индентор — пирамидку Виккерса — прибора для измерения микротвердости. В целом характер этих зависимостей аналогичен характеру зависимостей на рис. 1, полученных осреднением по всем нагрузкам на индентор, однако имеются особенности, на которые следует обратить внимание. Для получения представления о толщине слоев, участвующих в формировании значения микротвердости, в таблице представлены глубины h проникновения пирамидки при вдавливании с разной нагрузкой в исходную поверхность, а также значения H_n исходной микротвердости, максимальные значения H_{max} микротвердости, достигаемые в пределах инкубационного периода, и значения H_k микротвердости по окончании периода разупрочнения. Кроме того, рассчитаны значения упрочнения $\Delta H_{упр} = H_{max} - H_n$ и разупрочнения $\Delta H_{разупр} = H_{max} - H_k$ поверхности.

Характеристики упрочнения и разупрочнения материалов, определенные по зависимостям микротвердости от времени кавитационного воздействия, построенным для различных нагрузок на индентор

Сплав	P , Н	h , мкм	Микротвердость, МПа			$\Delta H_{упр}$, МПа	$\Delta H_{разупр}$, МПа
			H_n	H_{max}	H_k		
Хромовое покрытие	0,49	1,6	7450	8478	6166	1028	2312
	0,98	2,3	7340	8440	7112	1100	1328
	1,96	3,2	7484	8326	7464	842	862
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л	0,196	2,6	1087	1330	956	243	374
	0,49	3,4	1640	1891	1520	251	371
	0,98	4,6	1818	2103	1601	285	502
БрА9Ж4Н4Л	0,196	3,0	694	901	716	207	185
	0,49	3,5	1255	1554	1232	299	322
	0,98	4,6	1504	1765	1534	261	231
ЛЦ40Мц3Ж	0,196	3,2	732	1330	924	598	406
	0,49	4,0	1186	2074	1596	888	478
	0,98	5,5	1231	2057	1814	826	243

Из таблицы видно, что в целом (за исключением бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л) для сплавов прослеживается следующая тенденция: максимум упрочнения достигается не при самой малой глубине проникания индентора, т. е. не в тех слоях, которые примыкают к поверхности, а на некоторой глубине под поверхностью. Что касается бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л, то, по всей видимости, чтобы зарегистрировать для нее максимальное значение $\Delta H_{упр}$, необходимо было провести измерения при нагрузке $P > 0,98$ Н, т. е. для нее максимум упрочнения получают слои, лежащие на глубине, превышающей 4,6 мкм. То обстоятельство, что максимум упрочнения реализуется на некоторой глубине под поверхностью, объясняется следующим. Известно, что при вдавливании сферического индентора максимальные пластические деформации возникают на некоторой

глубине под поверхностью [16] и в этих же районах, вероятно, появляются первые трещины. Если уподобить внедрение струи жидкости при схлопывании кавитационной каверны внедрению шара в поверхность, то можно предположить, что это справедливо и для случая кавитационного воздействия.

Пользуясь результатами исследований, изложенными в работе [2], можно утверждать, что в условиях настоящего эксперимента математическое ожидание размера частиц износа в зависимости от испытываемого сплава колеблется в пределах 1,5–4,0 мкм, т. е. у тонкого слоя, лежащего на этой глубине, раньше всего происходит исчерпание пластичности, и в этом слое возникают первые трещины. Следовательно, нагрузка на индентор должна быть оптимальной. Не имеет смысла выбирать нагрузку как можно меньшую, т. е. чтобы глубина проникания индентора была минимально возможной, так как, во-первых, слои, примыкающие к поверхности, не получают наибольшего упрочнения, и, во-вторых, чем меньше получают отпечатки, тем больше погрешность в измерении их размеров. В то же время бессмысленно выбирать высокую нагрузку, обеспечивающую глубину проникания индентора, существенно превышающую размер продуктов износа, ведь тогда на результат измерений будет оказывать влияние твердость нижележащих менее наклепанных слоев. В любом случае оценка упрочнения методом микротвердости будет всегда иметь некоторую ошибку в меньшую сторону по сравнению с идеальной ситуацией, когда удалось бы измерить микротвердость тончайшего слоя, получившего наибольшее упрочнения и изолированного от менее деформированных выше- и нижележащих слоев.

Как видно из таблицы, для таких материалов, как хромовое покрытие и бронза БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л, $\Delta H_{\text{упр}} < \Delta H_{\text{разупр}}$, т. е. микротвердость после окончания стадии разупрочнения, как правило, снижается, становясь ниже значения, соответствующего исходному состоянию, тогда как для сравнительно пластичных материалов, таких как латунь ЛЦ40МцЗЖ, наоборот: $\Delta H_{\text{упр}} > \Delta H_{\text{разупр}}$. Это видно на примере зависимостей (см. рис. 1, а, б), полученных осреднением по всем нагрузкам. Алюминиевая бронза БрА9Ж4Н4Л занимает промежуточное положение: для нее $\Delta H_{\text{упр}} \approx \Delta H_{\text{разупр}}$. По всей видимости, соотношение между $\Delta H_{\text{упр}}$ и $\Delta H_{\text{разупр}}$ зависит от особенностей трещинообразования в поверхностных слоях разных сплавов, что, в свою очередь, определяется микроструктурой и пластичностью ее отдельных составляющих. При образовании разветвленной сетки микротрещин, что, можно предположить, наблюдается у такого сравнительно малопластичного материала, как хромовое электролитическое покрытие, происходит «разрыхление» материала и микротвердость может опуститься ниже исходного уровня.

Заключение (Conclusion)

Твердость металлических материалов в результате пластической деформации в пределах инкубационного периода кавитационного изнашивания сначала увеличивается, а затем уменьшается, соответственно инкубационный период можно разделить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения. Указанные стадии примерно равны по продолжительности. Таким образом, максимальное упрочнение поверхности имеет место не в конце, а примерно в середине инкубационного периода, когда заканчивается стадия упрочнения. Поэтому измерения микротвердости во второй половине инкубационного периода или в момент его окончания не дадут истинной информации об упрочнении металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ponkratov D.* DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller / D. Ponkratov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2015. — Vol. 656. — Pp. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
2. *Цветков Ю. Н.* Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
3. *Погодаев Л. И.* Структурно-энергетические модели надёжности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. — СПб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2006. — 608 с.

4. Kwok C. T. Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion / C. T. Kwok, H. C. Man, F. T. Cheng, K. H. Lo // *Surface and Coatings Technology*. — 2016. — Vol. 291. — Pp. 189–204. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.02.019.
5. Qiao Y. Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel / Y. Qiao, X. Cai, Y. Chen, J. Cui, Y. Tang, H. Li, Z. Jiang // *Materials and technology*. — 2017. — Vol. 51. — No. 6. — Pp. 933–938.
6. Momeni S. Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films / S. Momeni, W. Tillmann, M. Pohl // *Materials & Design*. — 2016. — Vol. 110. — Pp. 830–838. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.054.
7. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
8. Muñoz-Cubillos J. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels / J. Muñoz-Cubillos, J. J. Coronado, S. A. Rodríguez // *Wear*. — 2019. — Vol. 428–429. — Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
9. Eisenberg P. On the mechanism of cavitation damage and methods of protection / P. Eisenberg, H. S. Preiser, A. Thiruvengadam // *SNAME Transactions*. — 1965. — Vol. 73. — Pp. 241–286.
10. Sreedhar B. K. Cavitation damage: Theory and measurements – A review / B. K. Sreedhar, S. K. Albert, A. B. Pandit // *Wear*. — 2017. — Vol. 372–373. — Pp. 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009.
11. Richman R. H. Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals / R. H. Richman, W. P. McNaughton // *Wear*. — 1990. — Vol. 140. — Is. 1. — Pp. 63–82. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90122-Q
12. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости / Г. Д. Дель. — М.: Машиностроение, 1971. — 199 с.
13. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. — ASTM International, 2010. — 19 p.
14. Terauchi Y. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements / Y. Terauchi, H. Matuura, M. Kitamura // *Bulletin of the JSME*. — 1973. — Vol. 16. — No. 102. — Pp. 1829–1838. DOI: 10.1299/jsme1958.16.1829.
15. Krause H. Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis / H. Krause, M. Matheus // *Wear*. — 1987. — Vol. 119. — Is. 3. — Pp. 343–352. DOI: 10.1016/0043-1648(87)90040-8.
16. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.

REFERENCES

1. Ponkratov, Dmitriy. “DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 656. IOP Publishing, 2015. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
2. Tsvetkov, Yu. N. *Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
3. Pogodaev, L. I., and V. N. Kuz'min. *Strukturno-energeticheskie modeli nadezhnosti materialov i detalei mashin*. SPb.: Akademiya transporta Rossiiskoi Federatsii, 2006.
4. Kwok, C. T., H. C. Man, F. T. Cheng, and K.H. Lo. “Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion.” *Surface and Coatings Technology* 291 (2016): 189–204. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.02.019.
5. Qiao, Yanxin, Xiang Cai, Yipeng Chen, Jie Cui, Yanbing Tang, Huabing Li, and Zhouhua Jiang. “Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel.” *Materials and technology* 51.6 (2017): 933–938.
6. Momeni, Soroush, Wolfgang Tillmann, and Michael Pohl. “Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films.” *Materials & Design* 110 (2016): 830–838. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.054
7. Fomin, V. V. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroenie, 1977.
8. Muñoz-Cubillos, J., J. J. Coronado, and S.A. Rodríguez. “On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels.” *Wear* 428–429 (2019): 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
9. Eisenberg, P., H. S. Preiser, and A. Thiruvengadam. “On the mechanism of cavitation damage and methods of protection.” *SNAME Transactions* 73 (1965): 241–286.
10. Sreedhar, B. K., S. K. Albert, and A. B. Pandit. “Cavitation damage: Theory and measurements – A review.” *Wear* 372–373 (2017): 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009.

11. Richman, R. H., and W. P. McNaughton. "Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals." *Wear* 140.1 (1990): 63–82. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90122-Q.
12. Del', G. D. *Opređenje napryazhenii v plasticheskoj oblasti po raspredeleniyu tverdosti*. M.: Mashinostroenie, 1971.
13. *ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. ASTM International, 2010.
14. Terauchi, Yoshio, Hiroshi Matuura, and Minoru Kitamura. "Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements." *Bulletin of JSME* 16.102 (1973): 1829–1839. DOI: 10.1299/jsme1958.16.1829.
15. Krause, H., and M. Mathias. "Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis." *Wear* 119.3 (1987): 343–352. DOI: 10.1016/0043-1648(87)90040-8.
16. Myshkin, N. K., and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. M.: Fizmatlit, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбаченко Евгений Олегович — аспирант

Научный руководитель:

Цветков Юрий Николаевич

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: jenyraqwerty@gmail.com, kaf_tsr@gumrf.ru

Цветков Юрий Николаевич —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru

Лопарев Юрий Константинович —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_tmm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorbachenko, Yevgeniy O. — Postgraduate

Supervisor:

Tsvetkov, Yuriy N.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: jenyraqwerty@gmail.com, kaf_tsr@gumrf.ru

Tsvetkov, Yuriy N. —

Doctor of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru

Loparev, Yuriy K. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: kaf_tmm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 июня 2019 г.

Received: June 3, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717

STUDYING THE CAVITATION PROCESS AND THE POSSIBILITY OF REDUCING EROSIIVE WEAR

S. P. Zubrilov, N. V. Rastrygin

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

An approach to solve the problem of reducing the cavitation damage of internal combustion engines, ship propellers, and elements of hydraulic structures is presented by controlling the cavitation process for all possible spherical pulsations of cavitation bubbles and their non-spherical fragmentations based on four typical schemes of the cavitation bubble collapse near a solid surface. High-speed visualization (holography) of the cavitation area has proved the bubbles consolidation before their impact on a solid surface by jets blow. The research object is the cavitation area in the water and its impact on a hard surface, the research subject is the phenomenon of bubbles cooperation at the compression final stage and the possibility of its use to reduce the erosion effect of cavitation. At research, the following experimental methods are used: high-speed holographic visualization, interferography, acoustic cavitation. Combining the cavitation bubbles in the compression phase of the cavitation area is proved. With a single collapse of the cavitation area, two to five dynamic pressure impulses from the impact of hydrodynamic water jets arise, which are 250 times more powerful than the pressure pulses from the spherical cavitation bubble collapse. On the deep stages of compression of the cavitation region 500 bubbles have disappeared from the sight, the spherical pressure waves emanate from one or more points of a solid surface that confirms the fact of bubbles merging with their simultaneous movement to the solid surface. Their number is two orders of magnitude smaller than it was in the expansion phase.

The processes and phenomena that manifest themselves at deep stages of the cavitation area compression are theoretically and experimentally substantiated. Multiple cavities are easier to explore experimentally in order to control the cavitation process. The modern optical methods of digital tracer visualization, allowing to see the final stage of the cavitation cavity collapse have great prospects. New way to manage the cavitation process, based on four typical compression schemes of cavitation cavities to reduce the erosion intensity, is an alternative to the creation of costly cavitation-resistant materials.

Keywords: cavitation, hologram, bubble, cavitation area, erosion, pressure impulse, water, interferogram.

For citation:

Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. "Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.

УДК 502.656.628

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА

С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин

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

Представлен подход к решению проблемы снижения кавитационного разрушения двигателей внутреннего сгорания, судовых винтов, элементов гидротехнических сооружений путем управления кавитационным процессом для всех возможных сферических пульсаций кавитационных пузырьков и их несферических фрагментаций на базе четырех типовых схем захлопывания кавитационных пузырьков у твердой поверхности. Высокоскоростной визуализацией (голография) кавитационной области доказано объединение пузырьков перед их воздействием на твердую поверхность ударом струй. Объектом исследований является кавитационная область в воде и ее воздействие на твердую поверхность, предметом исследований послужило явление кооперации пузырьков на заключительной стадии сжатия и возможность его использования для снижения эрозионного эффекта кавитации. При проведении исследований были использованы

следующие экспериментальные методы: высокоскоростная голографическая визуализация, интерферография и акустическая кавитация. Приведено доказательство объединения кавитационных пузырьков в фазе сжатия кавитационной области. Отмечается, что при единичном замыкании кавитационной области возникают два–пять динамических импульсов от удара гидродинамических струй воды, мощность которых в 250 раз превышает мощность импульсов от замыкания сферического кавитационного пузырька. Обращается внимание на то, что при проведении эксперимента на глубоких стадиях сжатия кавитационной области 500 пузырьков исчезли из поля зрения, а сферические волны давления исходят из одной или нескольких точек твердой поверхности, что подтверждает факт слияния пузырьков с их одновременным движением к твердой поверхности. Зафиксировано, что кавитационных пузырьков на два порядка меньше, чем было в фазе расширения. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления, проявляющиеся на глубоких стадиях сжатия кавитационной области. Выявлено, что несколько объединенных полостей легче исследовать экспериментально в целях управления процессом кавитации. Отмечается, что большие перспективы имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации, которые позволяют увидеть заключительную стадию коллапса кавитационной полости. Новый способ управления кавитационным процессом на базе четырех типовых схем сжатия кавитационных полостей по снижению интенсивности эрозионного воздействия является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационностойких материалов.

Ключевые слова: кавитация, голограмма, пузырек, кавитационная область, эрозия, импульс давления, вода, интерферограмма.

Для цитирования:

Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрюгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.

Введение (Introduction)

Резкое увеличение удельного веса переходных процессов, рост скоростей, форсированные режимы двигателей внутреннего сгорания привели к тому, что кавитация стала сдерживающим фактором развития техники. Только ежегодные убытки от ремонта дизелей оцениваются многими миллионами рублей. Кавитация в гидравлических системах приводит к ухудшению энергетических характеристик оборудования, кавитационной эрозии проточного тракта, шуму и вибрации. Однако до сих пор не создано ни общей теории возникновения, ни развития и динамического воздействия кавитации на твердую поверхность. Единый подход к изучению кавитационного процесса с неразрывной связью всех его стадий позволяет, в принципе, управлять кавитацией.

Первая работа по созданию единой типовой схемы воздействия кавитации была выполнена в Гидротехнической лаборатории им. В. Е. Тимонова в Ленинградском институте водного транспорта (ныне ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова») [1], [2]. Был создан экспериментально-измерительный комплекс для высокоскоростного фотографирования и голографирования по исследованию ядер кавитации, кавитационной области и динамического воздействия кавитации на твердую поверхность. Принципиальная схема приведена на рис. 1.

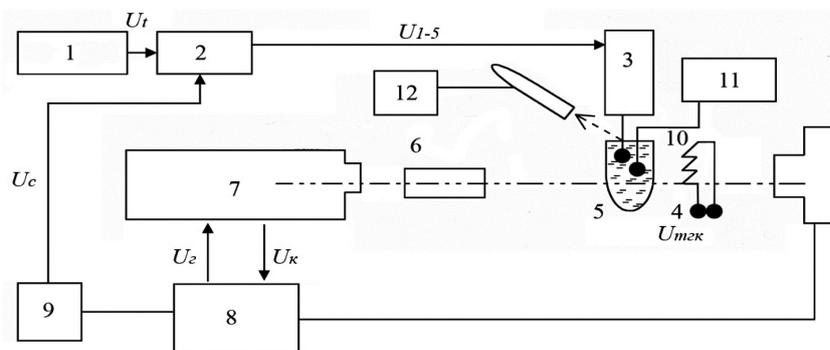


Рис. 1. Схема экспериментальной установки исследования для процесса замыкания кавитационной полости: 1 — УЗГ; 2 — коммутатор колебаний; 3 — вибратор; 4 — импульсная лампа; 5 — кювета; 6 — микроскоп; 7 — фоторегистратор; 8 — пульт управления; 9 — блок задержки; 10 — ТЭН; 11 — измеритель давления; 12 — ФЭУ

Съемка производилась с использование микроскопа при кратности увеличения от 12 до 32. Для обработки отснятых материалов применялся фотоувеличитель, при этом суммарное увеличение достигало кратности от 80 до 400. В результате проведенных экспериментов было впервые доказано существование четырех типовых схем воздействия кавитационного пузырька на твердую поверхность (рис. 2, интервал между кадрами 1,66 мкс, размер кадра 0,57 мм). На нижней кинограмме рис. 2 кумулятивная струя направлена вверх от стенки, давление на стенку минимально [1], [2].

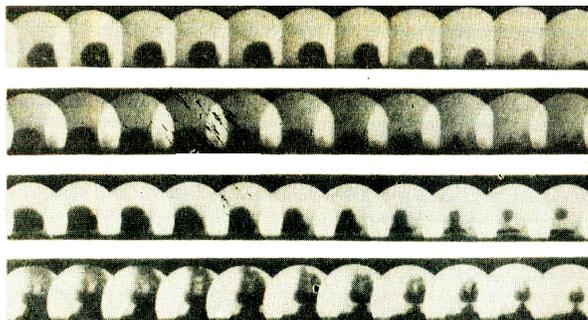


Рис. 2. Кинограммы захлопывания кавитационной полости у твердой стенки в 60 %-м растворе глицерина в воде

Детально исследована заключительная стадия захлопывания одиночного кавитационного пузырька. Безразмерные характеристики вязкости жидкости и поверхностного натяжения обобщены для всех возможных сферических пульсаций кавитационных пузырьков и их несферических фрагментаций, а также установлено, что сохранение сферической симметрии или деление пузырьков при пульсациях зависят от начальных условий, задаваемых экспериментатором. При этом создав условия для четвертой схемы, можно существенно снизить кавитационную эрозию твердой поверхности. (Следует отметить, что полное исключение кавитации влечет за собой существенное ограничение режимов работы гидросистем и увеличение их стоимости, поэтому речь идет об обеспечении наименее эрозионно-опасной формы кавитации). Динамические воздействия на полость, согласно различным схемам захлопывания, приведены на рис. 3 и 4 [2]. На рис. 3 приняты следующие обозначения: верхняя кривая — одно деление $18,3 \cdot 10^5$ Па, напряжения на обмотке — МСВ; нижняя кривая — одно деление по вертикали 50 В, развертка — одно деление 5 мкс.

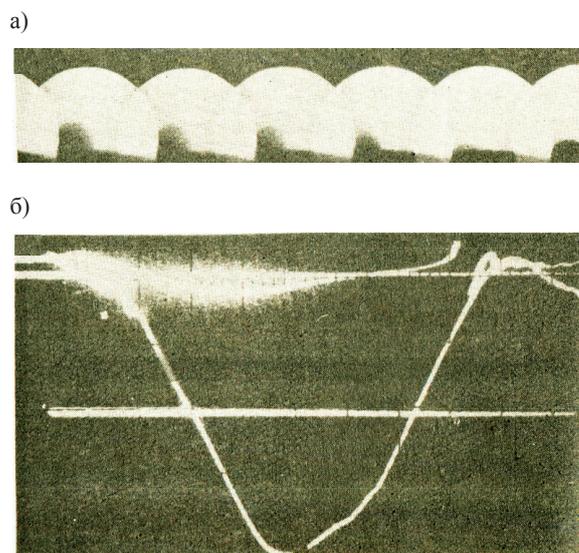


Рис. 3. Динамическое воздействие полости при первом типе ее замыкания в воде: а — кинограмма последних стадий замыкания полости (размер кадра 0,57 мм); б — осциллограммы импульса давления

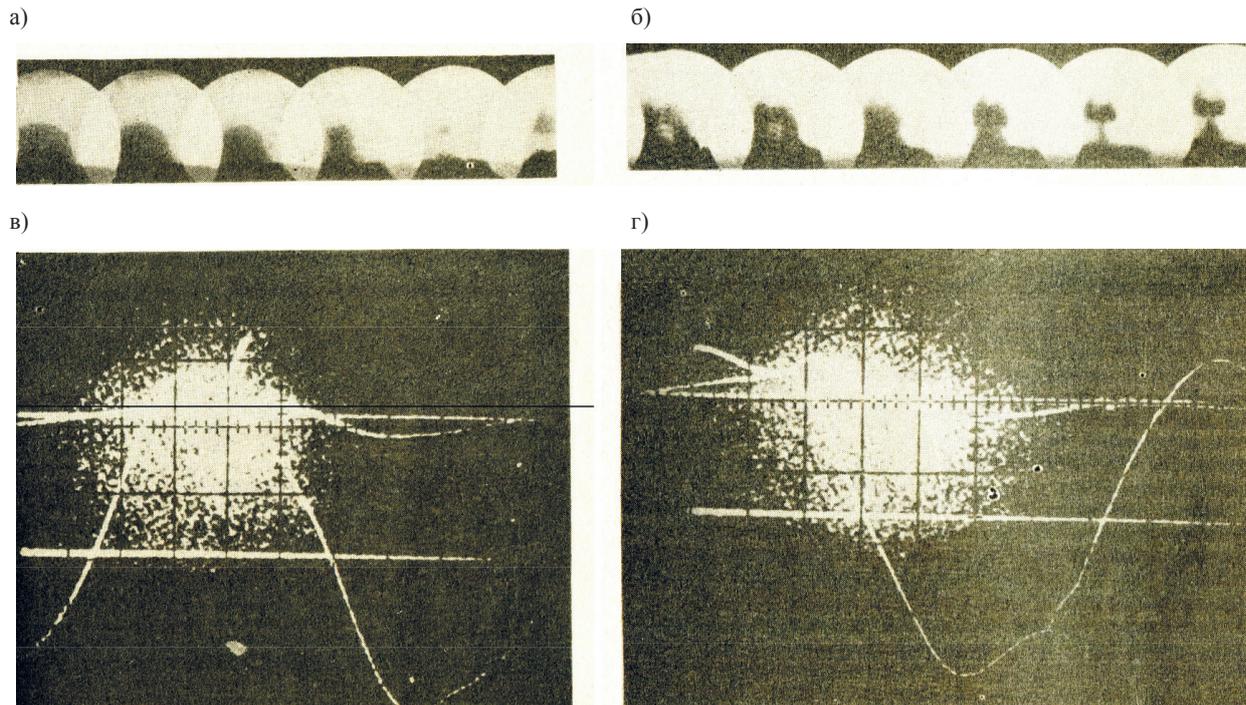


Рис. 4. Динамические воздействия полости при втором (слева) и четвертом (справа) типах ее замыкания в воде:
а, б — кинограмма последних стадий (размер кадра 0,57 мм);
в, г — осциллограммы импульса давления и напряжения на обмотке МСВ

Дальнейшие исследования в этом направлении привели к практическим предложениям по снижению кавитационного воздействия [3]–[5].

Теоретические расчеты по взаимодействию пузырьков у твердой стенки, выполненные Ю. В. Гуриковым и приведенные в работе [6], дали основание для предположения об усилении механического воздействия каверны, образовавшейся в результате согласованного замыкания большого числа пузырьков. В соответствии с этой гипотезой схлопывание начинается одновременно на внешней границе скопления пузырьков и сопровождается образованием ударной волны, энергия которой частично аккумулируется кавернами в последующих слоях, находящихся в процессе схлопывания, в результате энергия замыкания интенсифицируется. Согласно численным расчетам, основанным на такой модели, взрывные волны, образующиеся при одновременном схлопывании слоя каверн, могут привести к увеличению давления на порядок по сравнению с давлением, возникающим при схлопывании одиночной каверны. Для проверки этой гипотезы были выполнены экспериментальные исследования кавитационной области с привлечением методов высокоскоростной визуализации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментов были использованы следующие методы и материалы:

1. Метод высокоскоростной визуализации, схема которого представлена на рис. 5 и 6.
2. Голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр, чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсibilизированных на длину волны 0,694 мкм.
3. Пьезокерамические датчики для фиксации импульсов давления при захлопывании кавитационной области.
4. Рубиновый лазер ОГМ-20, гелий-неоновый лазер восстановления голограмм.
5. Кюветы из оптического стекла.

В ходе эксперимента использовались дистиллированная вода однократной и двукратной дистилляции, ионообменные фильтры и др.

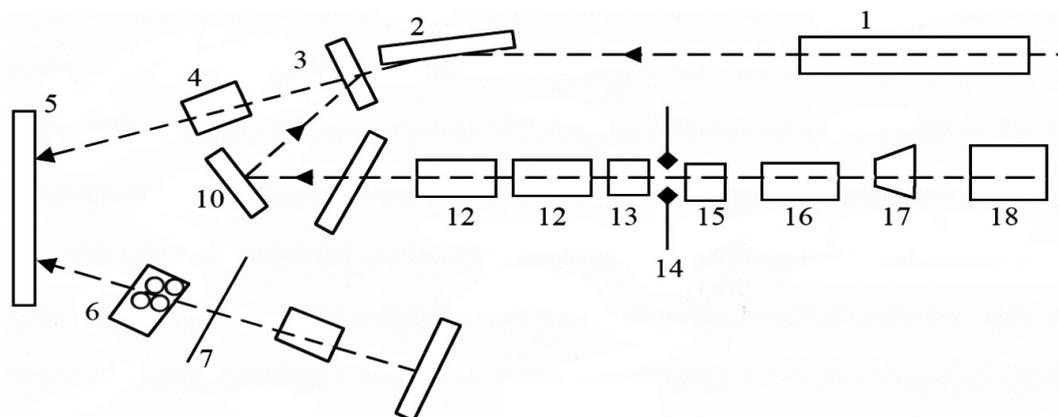


Рис. 5. Схема голографирования кавитационной каверны:

- 1 — газовый лазер; 2 — зеркало; 3 — зеркало; 4 — расширитель; 5 — фотопластинка;
 6 — кавитационная кювета; 7 — матовое стекло; 8 — расширитель; 9 — зеркало;
 10 — зеркало; 11 — полупрозрачное зеркало; 12 — усилители; 13 — зеркало;
 14 — точечное отверстие; 15 — диафрагма; 16 — модулятор добротности;
 17 — квантовый генератор; 18 — сферическое зеркало; 19 — газовый лазер

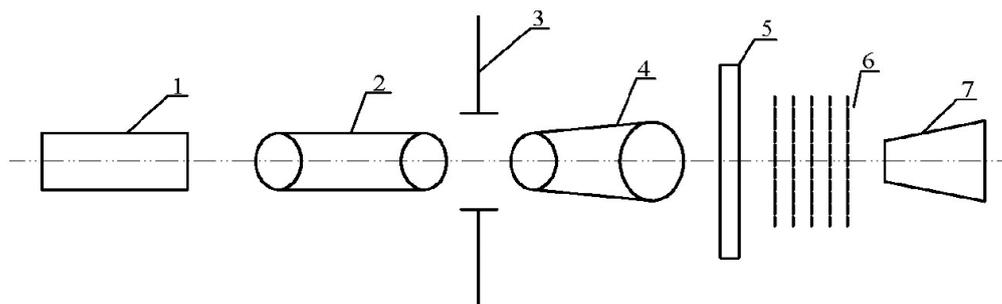


Рис. 6. Схема воспроизведения голограммы:

- 1 — одномодовый гелий — неоновый лазер; 2 — микрообъектив; 3 — точечное отверстие;
 4 — расширитель пучка; 5 — голограмма на перемещающемся столике;
 6 — восстановление изображения; 7 — микроскоп

Результаты (Results)

Для ансамбля пузырьков возможно только голографическое исследование, обеспечивающее объемное изображение кавитационного поля, включая размеры и взаимное распределение дисперсий двух фаз. Снимались голограммы кавитационной области у поверхности колеблющегося магнитостриктора в разных фазах (расширение, сжатие) и в разных точках каждой фазы в режиме акустической кавитации.

Наиболее перспективной является однолучевая схема при использовании импульсного рубинового лазера с модулированной добротностью и длительностью импульсов излучения $2 \cdot 10^{-8}$ с. Объектом голографирования служит кювета из оптического стекла размерами $2 \times 3 \times 4$ см с исследуемой жидкостью, в которой с помощью магнитострикционного излучателя, работающего от генератора УЗДН-2Т, создается кавитационная область. Был изготовлен специальный блок синхронизации, импульс лазерного излучения привязан к определенной фазе УЗДН-2Т. В результате было четко определено, в какой фазе процесса развития кавитационной области производится съемка голограммы.

Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 7 показаны период изменения давления в жидкости и точки (1–6), в которых проводилась съемка голограммы.

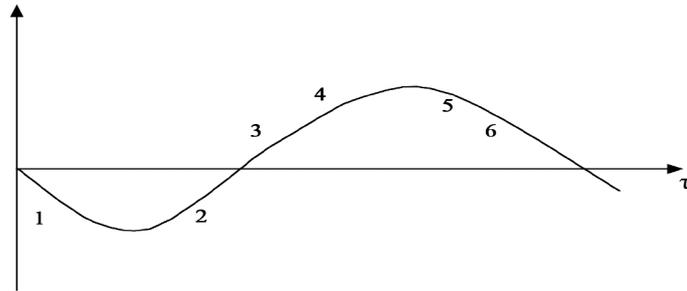


Рис. 7. Изменение давления в жидкости в течение периода колебания излучателя:
1–6 — точки фазы колебаний давления, в которых сняты голограммы

На основе анализа голограмм, снятых в разных фазах периода колебаний кавитационной области на концентраторе большого диаметра ($d = 5\text{ мм}$), можно сделать вывод о том, что динамический импульс индуцирует несколько полостей, находящихся в разных точках поверхности (рис. 8).

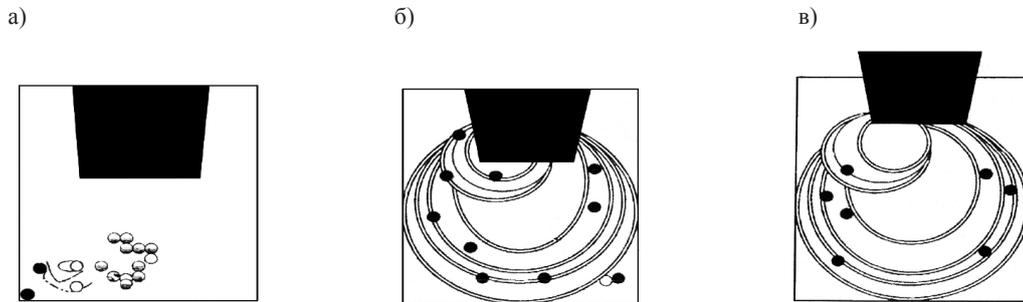


Рис. 8. Изображения, полученные с голограмм на концентраторе диаметром 5 мм:
а — в точке 2; б — в точке 4; в — в точке 5 периода колебаний излучателя

Динамический импульс фиксируется на голограмме в виде волны давления — расходящихся темных полос. Эти импульсы при замыкании полостей возникают на последних стадиях действия положительного давления ($\sim 1/4$ полупериода). Анализ голограмм кавитационной области, снятых на концентраторе малого диаметра ($d = 2,36\text{ мм}$), показывает, что динамический импульс индуцирует полости, находящиеся в центральной области концентратора (рис. 9).

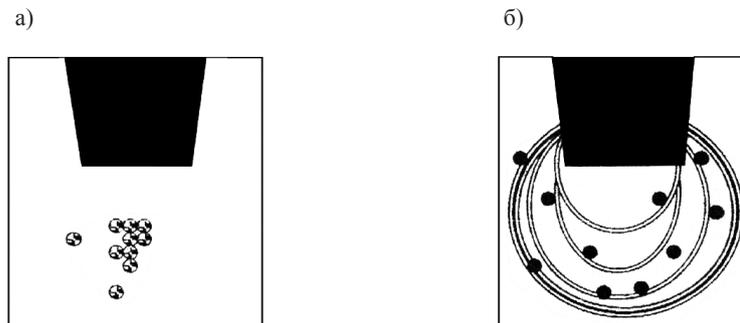


Рис. 9. Изображения, полученные с голограмм на концентраторе диаметром 2,36 мм:
а — в точке 2; б — в точке 5 периода колебаний излучателя

Измерения отдельных пузырьков в кавитационной области в стадии максимального роста показали, что средний диаметр отдельного пузырька составляет $d_{\text{cp}} = 79,85 \pm 10,5\text{ мкм}$ ($d_{\text{max}} = 121\text{ мкм}$, $d_{\text{min}} = 47\text{ мкм}$). Средний объем кавитационной области в период ее максимального развития составляет $V_{\text{max}} = 0,1153\text{ мм}^3$ (диаметр основания — $0,730\text{--}0,866\text{ мм}$, высота — $0,436\text{--}0,860\text{ мм}$), минимальный объем кавитационной области в стадии замыкания $V_{\text{max}} = 0,00218,1\text{ мм}^3$ (диаметр осно-

вания — 0,244 мм, высота — 0,140 мм). Таким образом, объем кавитационной области уменьшается в стадии сжатия в 53 раза. Сопоставление объемов области и отдельной полости показывает, что область может содержать более 500 отдельных кавитационных пузырьков. В таблице представлены результаты обработки интерферограммы, зафиксированной при замыкании области.

Результаты обработки интерферограммы

Расстояние между волнами давления, мкм	Время прохождения волны давления, 10^{-8} с
535	35,7
507	33,8 (наиболее интенсивные волны давления)
188	12,53
256	17,07
154	10,27
157	10,47
106	7,07
107	7,13
81	5,4
82	5,46
74	4,93
66	4,4
64	4,27
66	4,4

Временные интервалы Δt между отдельными полосами определяли по расстоянию между ними Δl при допущении, что ударные волны распространяются со скоростью, близкой к скорости звука в жидкости ~ 1500 м/с. Следует отметить, что временной интервал между наиболее интенсивными волнами давления составляет $\sim 0,7$ мкс.

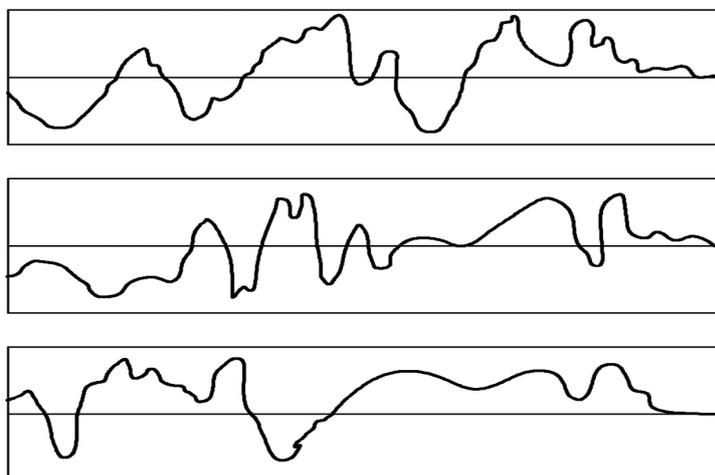


Рис. 10. Осциллограммы импульсов давления при замыкании кавитационной области (время развертки 2,5 мкс/деление)

С помощью пьезокерамического датчика были проведены исследования замыкания кавитационной области, создаваемой на концентраторе с диаметром 2,33 мм. Анализ осциллограммы импульсов давления (рис. 10, на котором по горизонтали указано время в мкс, по вертикали — давление в Па), зафиксированных гидрофоном, установленным на расстоянии ~ 1 мм (вне кавитационной области) от торца концентратора, показывает, что при единичном замыкании кавитационной области возникают два–пять динамических импульсов во временном диапазоне ~ 5 мкс. Отдельные импульсы отстают друг от друга во времени на 0,5–1,5 мкс, время нарастания отдельного динамического давления составляет около 0,7–1,5 мкс.

На осциллограммах импульсов давления, записанных с гидрофона при замыкании кавитационной области, видно, что полное замыкание области происходит не в каждом периоде изменения давления. Это явление теоретически описано в работах [7]–[9], где показано, что с ростом амплитуды акустического давления кавитационный пузырек не успевает захлопнуться в течение одного периода. Согласно данным, полученным на основе проведенных в исследовании опытов, амплитуда изменения давления составляет $\sim 0,5 \times 10^5$ Па, захлопывание происходит в каждом периоде.

На основании полученных результатов сделаны некоторые расчетные оценки. Оценка времени замыкания кавитационной полости при данных условиях опыта ($r_{\max} = 40 \cdot 10^{-6}$ м, $P_{\text{зам}} = 10^6$ Па) по формуле Рэлея $t_{\text{зам}} = 0,915 \tau_{\max} \sqrt{P/P_{\text{зам}}}$ составляет $\sim 0,5$ мкс. Эта величина приблизительно на порядок больше интервала Δl между отдельными интерференционными полосами на голограмме.

Исходя из того, что отношение максимального и минимального объемов кавитационной области $V_{\max}/V_{\min} = 53$, можно оценить степень уменьшения линейного размера $r_{\max}/r_{\min} = 3,8$. Таким образом, минимальный радиус пузырька соответствует $\sim 10,7$ мкм. Отсюда средняя скорость движения границы области за время, равное четверти периода: $V_{\text{ср}} = 4\Delta r/T \cong 10$ м/с, на последних стадиях замыкания $V_{\max} \cong 60$ м/с. Сопоставление уровней давления, возникающих при замыкании кавитационной полости, дает следующую картину.

В случае сферического замыкания

$$P_{\max} = P_0 \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^\gamma.$$

Здесь P_0 — начальное давление газа в полости (принято $P_0 = 2 \cdot 10^3$ Па), показатель адиабаты принят равным $4/3$, $P_{\max} = 4 \cdot 10^5$ Па.

В случае удара струи:

$$P_{\text{уд. ср}} = \rho c V_{\text{ср}} = 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 1 = 150 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{уд. max}} = \rho c V_{\max} = 900 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Таким образом, наиболее вероятным механизмом динамического воздействия является удар струи, возникающей при потере устойчивости, замыкающейся полостью.

Сравним полученные результаты с расчетом. Как известно, для сил Бьеркнеса (F_B) между двумя подобными пузырьками, имеющими колебательную скорость поверхностей сфер (V_0),

$$F_B = \frac{4}{3} \pi r_0^3 r_0^2 = \frac{V_0 V_1}{(2h)^2} \cos \varphi.$$

Определим V_0 при $h = 10^3 \cdot 10^{-6}$ и $\cos \varphi \approx 1$ при условии равновесия пузырька $F_B = F_{\text{всп}} = (4/3) \pi r_0^3 \rho g$.

$$\text{Тогда } V_0 = 2h \sqrt{\frac{g}{3r_0}} = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{10}{3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} \cong 0,5 \text{ м/с}.$$

Скорость движения пузырька в ряде положений (квазистационарное приближение): $\bar{n} = \frac{n_1}{r_0} = 18, 17, 16 \dots 2, 1$; $V_1 = \frac{r_0 V_0^2}{6Vn_1^2} - 2g \frac{r_0^2}{9V}$, имеет значения: $V_{10} = 0,0145$, $V_5 = 0,0745$, $V_4 = 0,12$, $V_2 = 0,5$ м/с, т. е. имеет место ускорение движения пузырька к стенке и друг к другу.

Напрашивается вывод о том, что примерно 500 пузырьков, занимающих объем $0,00218$ мм³ (в стадии сжатия), двигаясь друг к другу и одновременно к твердой поверхности, на последней стадии объединяются в два–пять объединенных пузырьков и захлопываются на поверхности концентратора, видимо, по кумулятивному механизму (возможно, и по другим, еще не исследованным механизмам), что видно по двум–пяти волнам давления, фиксируемым на голограммах. Как видно из голограмм, на глубоких стадиях сжатия (точки 5, 6) кавитационной области (как отмечалось ранее, поиск самых глубоких стадий сжатия еще необходимо продолжить) исследуемые в работе 500 пузырьков исчезли из поля зрения, а сферические волны давления исходят из одной или нескольких точек поверхности концентратора, что подтверждает факт слияния

пузырьков с одновременным их движением к твердой поверхности. Их на два порядка меньше, чем было в фазе расширения. Факт взаимодействия и усиления коллапса микропузырьков подтвержден в работах [10]. На фотографиях (рис. 11) зарегистрирована вторичная волна сжатия и видны волны давления при захлопывании малого пузырька [10]. В жидкости с пузырьками разного диаметра происходит перераспределение энергии. Малые пузырьки схлопываются под воздействием волн давления от больших пузырьков.

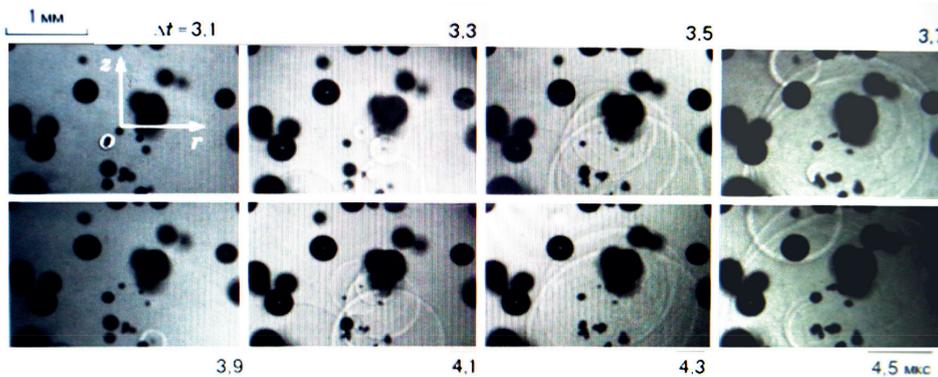


Рис. 11. Кадры высокоскоростной микроскопической киносъемки взаимодействия большого и малого кавитационных пузырьков

С помощью скоростной голографической киносъемки [11] получена серия последовательных по времени голограмм (рис. 12), причем фокус каждого кадра смещается на 0,4 мм [11]. В процессе анализа объемного изображения кавитационного поля В. Эбелинг [11] построил траектории кавитационных пузырьков в пространстве, длину пробега пары пузырьков друг к другу, их слияние и коллапс, что также подтверждают проведенные в данной работе голографические исследования.

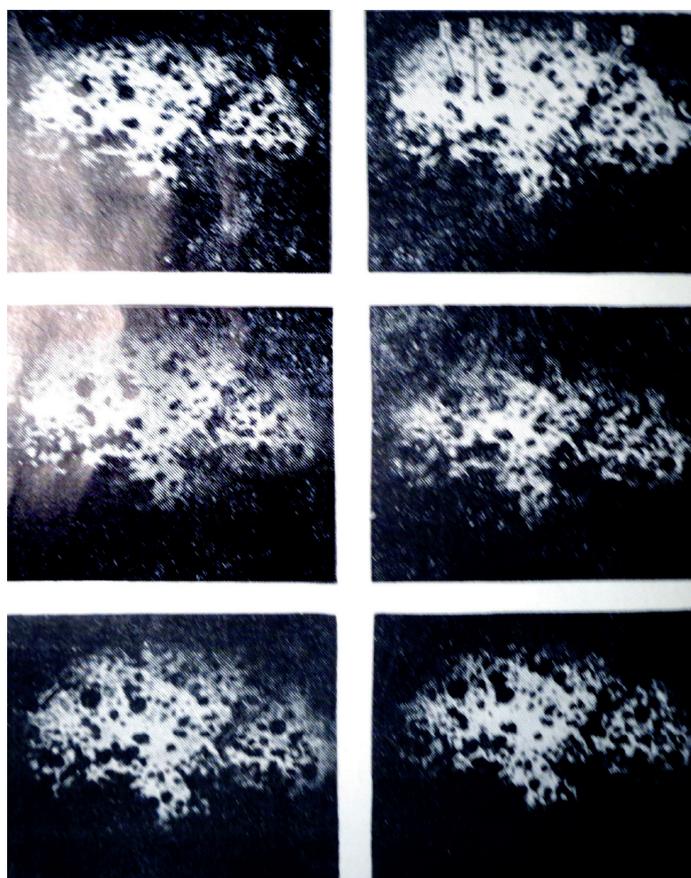


Рис. 12. Кадры голографической киносъемки объема кавитационного поля

Обсуждение (Discussion)

Выполненное исследование подтвердило предположение, сделанное в работе [6] — доказан факт слияния пузырьков с одновременным их движением к твердой поверхности. Предпочтительной причиной кавитационного разрушения твердой поверхности является гидродинамический удар струи жидкости, который примерно в 250 раз сильнее удара в случае сферического замыкания кавитационной полости. Однако, на наш взгляд, заключительная стадия захлопывания полости фиксируется с недостаточной точностью и процессы, происходящие при коллапсе пузырька, пока неизвестны [12]–[14]. Во многих последних исследованиях утверждается, что при сжатии пузырька происходит формирование ударной волны в газе [15]–[17], которая фокусируется в малой области у центра пузырька, создавая при этом температуру в миллионы градусов [18]. Представляет интерес работа [19], в которой с помощью мощного компьютера моделируется движение каждой из 106 частиц газа в сжимающемся сферическом пузырьке. В этом случае число априорных допущений сводится к минимуму, что должно увеличить точность расчетов.

Результаты моделирования показали, что в газе действительно образуется ударная волна, а максимальные температуры достигают 50 000 К для аргона и 500 000 К для ксенона. Авторы указанных ранее работ отмечают, что для стандартного термодинамического анализа число частиц недостаточно, однако мощность современных компьютеров не позволяет увеличить их число хотя бы на порядок. С другой стороны, результаты многих работ не подтверждают образования ударной волны в пузырьке. Например, в статье [20] показано, что ударная волна формируется лишь в некоторых специально созданных условиях, обеспечивающих очень высокие ускорения стенки пузырька, для этой цели предлагается использовать дополнительный высокочастотный импульс давления, прикладываемый в момент, близкий к моменту максимального сжатия пузырька. Таким образом, вопрос об ударно-волновой природе эффектов кавитации в настоящее время продолжает оставаться открытым. Как видно из выполненного краткого анализа теоретических работ, только эксперимент может дать окончательный ответ. Большие возможности открывают последние достижения в области высокоскоростной визуализации, которые дают возможность увидеть заключительную стадию коллапса кавитационной полости, в частности, оптические методы цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry — PIV), разрабатываемые в Институте теплотехники им. С. С. Кутателадзе СО РАН [21].

Заключение (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что новый способ управления кавитационным процессом на базе открытых ранее четырех типовых схем сжатия кавитационных полостей по снижению интенсивности эрозионного воздействия является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационноустойчивых материалов. Достаточно привести некоторые примеры удачного осуществления этого принципа: аэрация кавитационной каверны, суперкавитация, воздействие на структуру кавитационной области с помощью электромагнитных и магнитных полей, охлаждение твердой поверхности, изменение ее шероховатости и смачиваемости, изменение физико-химических свойств рабочих жидкостей, конструктивные мероприятия и т. д. [22]–[24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гривнин Ю. А. Экспериментальное исследование динамики одиночной кавитационной полости / Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Ларин // Труды ЛИВТ. — 1979. — № 166. — С. 25–34.
2. Grivnin U. A. The investigation of the collapse mechanism of the non-spheric cavitation recesses in liquids with different physical properties / U. A. Grivnin, S. P. Zubrilov, V. A. Larin // Proceedings of sixth conference on fluid machinery. — Budapest, 1979. — Vol. 1. — Pp. 457–466.
3. Зубрилов С. П. Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации / С. П. Зубрилов. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 120 с.
4. Зубрилов С. П. Микрозагрязнители в питьевой воде городов. Безреагентная очистка воды / С. П. Зубрилов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 154 с.

5. Зубрилов С. П. Исследование структуры воды и ее стабилизация кислородом / С.П. Зубрилов / С. П. Зубрилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.
6. Зубрилов С.П. Гидромеханика быстротекущих процессов / С. П. Зубрилов. — Л.: ЛИВТ, 1991. — 60 с.
7. Прис К. Эрозия / К. Прис. — М.: Мир, 1982. — 465 с.
8. Акуличев В. А. Кавитация в криогенных кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. — М.: Наука, 1978. — 278 с.
9. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. — Наука, 2008. — 271 с.
10. Воронин Д. В. Вторичные акустические волны в полидисперсной пузырьковой среде / Д. В. Воронин, Г.Н. Санкин, В.С. Тесленко, Р. Меттин, В. Лаутерборн // Прикладная механика и техническая физика. — 2003. — Т. 44. — № 1 (257). — С. 22–32.
11. Ebeling K. K. Holographic cavitation research / K. K. Ebeling // Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. Engin. — 1977. — Vol. 136. — Pp. 348.
12. Padilla-Martinez J. P. Optic cavitation with CW lasers: A review / J. P. Padilla-Martinez, C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J. C. Ramirez-San-Juan, R. Ramos-Garcia // Physics of Fluids. — 2014. — Vol. 26. — Is. 12. — Pp. 122007. DOI: 10.1063/1.4904718.
13. Garen W. Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary / W. Garen, B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, U. Teubner // 30th International Symposium on Shock Waves 2. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63.
14. Wang Q. Multi-oscillations of a bubble in a compressible liquid near a rigid boundary / Q. Wang // Journal of Fluid Mechanics. — 2014. — Vol. 745. — Pp. 509–536. DOI: 10.1017/jfm.2014.105.
15. Потемкин Ф. В. Динамика распространения ударных волн и кавитационных пузырей в зависимости от энергии падающего остророфокусированного фемтосекундного лазерного излучения / Ф. В. Потемкин, Е. И. Мареев // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2013. — № 4. — С. 46–54.
16. Жаров А. Н. О влиянии движения газа внутри заряженного пузырька в жидкости на параметры его осцилляций / А.Н. Жаров, А.И. Григорьев // Журнал технической физики. — 2004. — Т. 74. — № 11. — С. 13–21.
17. Жаров А. Н. Нелинейные капиллярные колебания заряженного пузырька в идеальной диэлектрической жидкости / А. Н. Жаров, А. И. Григорьев, И. Г. Жарова // Журнал технической физики. — 2006. — Т. 76. — № 10. — С. 41–50.
18. Nigmatulin R. I. Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion / R. I. Nigmatulin, I. S. Akhatov, A. S. Topolnikov, R. K. Bolotnova, N. K. Vakhitova, R. T. Lahey Jr, R. P. Taleyarkhan // Physics of fluids. — 2005. — Vol. 17. — Is. 10. — Pp. 107106. DOI: 10.1063/1.2104556.
19. Ruuth S. J. Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence / S. J. Ruuth, S. Putterman, B. Merriman // Physical Review E. — 2002. — Vol. 66. — Is. 3. — Pp. 036310. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036310.
20. Thomas J. L. Inhomogeneous pressure field inside a collapsing bubble accelerated by an acoustic pulse / J. L. Thomas // Physical Review E. — 2004. — Vol. 70. — Is. 1. — Pp. 016305. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016305.
21. Кравцова А. Ю. Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / А. Ю. Кравцова. — Новосибирск: ФГБОУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе (Сибирское отд. РАН), 2018. — 22 с.
22. Гривнин Ю. А. Кавитация на поверхности твердых тел / Ю.А. Гривнин, С.П. Зубрилов. — Л.: Судостроение, 1985. — 121 с.
23. Кравцова А. Ю. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле НАСА0015: визуализация и измерение скорости / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский, К. Ханьялич // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 4. — С. 96–106.
24. Reuter F. Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitating jet / F. Reuter, S. Lesnik, K. Ayaz-Bustami, G. Brenner, R. Mettin // Ultrasonics sonochemistry. — 2019. — Vol. 55. — Pp. 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.

REFERENCES

1. Grivnin, Yu. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. “Eksperimental’noe issledovanie dinamiki odinochnoi kavitatsionnoi polosti.” *Trudy LIVT* 166 (1979): 25–34.

2. Grivnin, U. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. "The investigation of the collapse mechanism of the non-spherical cavitation recesses in liquids with different physical properties." *Proceedings of sixth conference on fluid machinery*. Vol. 1. Budapest, 1979. 457–466.

3. Zubrilov, S. P. *Fiziko-khimicheskie svoistva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoi kavitatsii*. SPb.: SPGUVK, 2010.

4. Zubrilov, S. P. *Mikrozagryazniteli v pit'evoi vode gorodov. Bezreagentnaya ochildka vody*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018.

5. Zubrilov, Sergey P. "Investigation of water structure and its oxygen stabilization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.

6. Zubrilov, S. P. *Gidromekhanika bystroprotekayushchikh protsessov*. L.: LIVT, 1991.

7. Pris, K. *Eroziya*. M.: Mir, 1982.

8. Akulichev, V. A. *Kavitatsiya v kriogennykh kipyashchikh zhidkostyakh*. M.: Nauka, 1978.

9. Sirotyuk, M. G. *Akusticheskaya kavitatsiya*. Nauka, 2008.

10. Voronin, D. V., G.N. Sankin, V. S. Teslenko, R. Mettin, and V. Lauterborn. "Vtorichnye akusticheskie volny v polidispersnoi puzyr'kovoi srede." *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* 44.1(257) (2003): 22–32.

11. Ebeling, K. K. "Holographic cavitation research." *Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. Engin* 136 (1977): 348.

12. Padilla-Martinez, J. P., C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J.C. Ramirez-San-Juan, and R. Ramos-Garcia. "Optic cavitation with CW lasers: A review." *Physics of Fluids* 26.12 (2014): 122007. DOI: 10.1063/1.4904718.

13. Garen, W., B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, and U. Teubner. "Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary." *30th International Symposium on Shock Waves 2*. Springer, Cham, 2017. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63.

14. Wang, Qianxi. "Multi-oscillations of a bubble in a compressible liquid near a rigid boundary." *Journal of Fluid Mechanics* 745 (2014): 509–536. DOI: 10.1017/jfm.2014.105.

15. Potemkin, F. V., and E. I. Mareev. "Shock waves and cavitation bubbles dynamics as a function of the tightly focused femtosecond laser energy in distilled water and acetone." *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta* 4 (2013): 46–54.

16. Zharov, A. N., and A. I. Grigor'ev. "Influence of gas motion inside a charged bubble in a liquid on the parameters of bubble oscillations." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 49.11 (2004): 1404–1414. DOI: 10.1134/1.1826183.

17. Zharov, A. N., A. I. Grigor'ev, and I. G. Zharova. "Nonlinear capillary vibration of a charged bubble in an ideal dielectric liquid." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 51.10 (2006): 1293–1303.

18. Nigmatulin, Robert I., Iskander Sh. Akhatov, Andrey S. Topolnikov, Raisa Kh. Bolotnova, and Nailya K. Vakhitova. "Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion." *Physics of fluids* 17.10 (2005): 107106. DOI: 10.1063/1.2104556.

19. Ruuth, Steven J., Seth Putterman, and Barry Merriman. "Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence." *Physical Review E* 66.3 (2002): 036310. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036310.

20. Thomas, Jean-Louis. "Inhomogeneous pressure field inside a collapsing bubble accelerated by an acoustic pulse." *Physical Review E* 70.1 (2004): 016305. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016305.

21. Kravtsova, A. Yu. Eksperimental'noe issledovanie kavitatsionnogo obtekaniya dvumernykh gidrokryl'ev. Abstract of PhD diss. Novosibirsk: FGBOUN Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze, Sibirskoe otdelenie RAN, 2018.

22. Grivnin, Yu. A., and S. P. Zubrilov. *Kavitatsiya na poverkhnosti tverdykh tel*. L.: Sudostroenie, 1985.

23. Kravtsova, A. Yu., D. M. Markovici, K. S. Pervunin, M. V. Timoshevskiy, and K. Hanjalic. "Cavitation on a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil: visualization and velocity measurements." 4 (2014): 96–106.

24. Reuter, Fabian, Sergey Lesnik, Khadija Ayaz-Bustami, Gunther Brenner, and Robert Mettin. "Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitating jet." *Ultrasonics sonochemistry* 55 (2019): 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зубрилов Сергей Павлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf_ovrb@gumrf.ru

Растрыгин Николай Васильевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rastryginnv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

*Статья поступила в редакцию 26 июня 2019 г.
Received: June 26, 2019.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-718-726

THE RESULTS OF OPERATIONAL TESTS OF THE SELF-REGENERATING FILTER IN SHIP DIESELS AS PART OF A COMBINED OIL-CLEANING COMPLEX

G. P. Kicha, A. V. Nadezkin, S. P. Boyko

Maritime state university named after adm. G. A. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

Automation of ship power plants, the growth of their aggregate power, the use of low-grade fuels and engine oils with a change by the rejection indicators cause the use of oil cleaners with a long battery life. Self-regenerating filter of SRF-60 type has a high maintenance-free service life, up to 5 thousand hours, reliably protects friction pairs (bearings) from abrasive wear, and is capable to process up to 100 m³/h of oil in the full-flow circuit. A brief description of its structure and functioning is given. Deep cleaning of oil from the abrasive fine-dispersed ash products is entrusted to a centrifuge with an external jet drive. A scheme for the complete processing of the filter's flushing oil, which contributes to more efficient regeneration of its filtering elements due to the heightened rate of sediment washout by reverse flow, has been proposed. The results of operational tests of the combined oil purification complex, including a self-regenerating filter and a centrifuge, are presented. The combined engine oil purification system, including the self-regenerating module SRF-60 for cleaning the full oil flow and the centrifuge MCN-9NS for cleaning the flushing oil, is tested in the engine lubrication system 6ChN32/35. A comparison of automated and regular cleaning the engine oil is given in terms of effect on its aging and the diesel engine state, which indicates the superiority of this combination over the cleaning system with a full-flow filter of nonwoven materials, manifested in decreasing the wear of the engine main friction units and carbon deposits on the pistons by 30–60% and increasing the service life of the engine oil by 1.5–2.3 times. The experiment have showed that, in a forced engine, the products of oil aging in the form of carbenes and carboids, cemented by asphaltenes with impurities from diesel wear and ash additives actuation, are effectively removed by the proposed combined oil-cleaning complex.

Keywords: Self-regenerating filter, filtration, centrifuge, centrifugation, oil purification, combined oil cleaning complex.

For citation:

Kicha, Gennadij P., Andrej V. Nadezkin, and Sergey P. Boyko. "The results of operational tests of the self-regenerating filter in ship diesels as part of a combined oil-cleaning complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 718–726. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-718-726.

УДК 621.431.74-729.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ САМОРЕГЕНЕРИРУЮЩЕГОСЯ ФИЛЬТРА В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ В СОСТАВЕ КОМБИНИРОВАННОГО МАСЛООЧИСТИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Г. П. Кича, А. В. Надежкин, С. П. Бойко

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

Отмечается, что автоматизация судовых энергетических установок, рост их агрегатной мощности, использование низкосортных топлив и моторных масел со сменой по браковочным показателям обуславливают применение маслоочистителей с длительным ресурсом автономной работы. Рассмотрен саморегенерирующийся фильтр типа СРФ-60, имеющий высокий ресурс необслуживаемой работы, вплоть

до 5 тыс. ч, и надежно защищающий пары трения (подшипники) от абразивного изнашивания, способный обрабатывать по полнопоточной схеме до 100 м³/ч масла. Приведено краткое описание его устройства и функционирования. При этом глубокая очистка масла от абразивных мелкодисперсных зольных продуктов возложена на центрифугу с наружным реактивным приводом. Предложена схема полной обработки промывочного масла фильтра, что способствует более эффективной регенерации его фильтровальных элементов из-за повышенной скорости смыва отложений обратным потоком. Приведены результаты эксплуатационных испытаний комбинированного маслоочистительного комплекса, включающего саморегенерирующийся фильтр и центрифугу. Отмечается, что комбинированная система очистки моторного масла, включающая саморегенерирующийся модуль СРФ-60 для очистки полного потока масла и центрифугу МЦН-9НС для очистки промывочного масла, испытывалась в системе смазки двигателя 6ЧН32/35. Приведено сравнение автоматизированной и штатной очистки моторного масла по влиянию на его старение и состояние дизеля, которое указывает на превосходство этого сочетания над системой очистки с полнопоточным фильтром из нетканых материалов, выраженное в снижении изнашивания основных трибосопряжений двигателя и нагаролакообразования на поршнях на 30–60 % и увеличении срока службы моторного масла в 1,5–2,3 раза. Эксперимент показал, что в форсированном двигателе продукты старения масла в виде карбенов и карбонидов, сцементированных асфальтенами с примесями от изнашивания дизеля и срабатывания зольных присадок, эффективно удаляются предложенным комбинированным маслоочистительным комплексом.

Ключевые слова: саморегенерирующийся фильтр, фильтрование, центрифуга, центрифугирование, очистка масла, комбинированный маслоочистительный комплекс.

Для цитирования:

Кича Г. П. Результаты эксплуатационных испытаний саморегенерирующегося фильтра в судовых дизелях в составе комбинированного маслоочистительного комплекса / Г. П. Кича, А. В. Надежкин, С. П. Бойко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 718–726. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-718-726.

Введение (Introduction)

Анализ качества очистки моторного масла (ММ) в двигателях внутреннего сгорания показал, что полнопоточные фильтры тонкой очистки, являющиеся основным агрегатом большинства систем смазки судовых дизельных энергетических установках, не обеспечивают эффективное удаление нерастворимых примесей (НРП) [1]. В последнее время, после того как переработка нефти стала более «глубокой», в судовых дизелях средней и повышенной частоты вращения начали применять низкосортное топливо. Сжигание в судовых дизельных энергетических установках низкосортного топлива увеличивает скорость загрязнения моторного масла абразивными НРП вследствие поступления в систему смазки алюмосиликатов и продуктов каталитического крекинга нефтепродуктов [2]. Рост агрегатной мощности двигателя при повышенном наддуве ускоряет интенсивность износа пар трения судовых дизелей, снижая тем самым срок их службы.

Для автоматизированных судовых дизельных энергетических установок комбинированная система тонкой очистки масла (КСТОМ), включающая саморегенерирующийся фильтр (СРФ), является наиболее предпочтительной [3], [4]. В автоматизированных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) для очистки ММ получают распространение саморегенерирующиеся фильтры, которые за счет автоматизированного удаления отложений с фильтрующих элементов (ФЭ) способны в течение длительного времени функционировать без обслуживания [4]. Примером компактной комплектации и работы в непрерывном режиме регенерации может выступать маслоочиститель СРФ-60 конструкции Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, который прошел испытания на лабораторном стенде, показав высокую эффективность при работе в комбинации с центрифугой или центробежным сепаратором [3], [5]. Для обеспечения ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых форсированных тронковых дизелях большой интерес представляют результаты эксплуатационных испытаний СРФ-60 в системе смазки дизеля с повышенной частотой вращения, тонкостенные вкладыши подшипников которого очень чувствительны к абразивным частицам механических примесей, образующихся в циркуляционном масле при использовании в двигателе низкосортных топлив.

Методы и материалы (Methods and materials)

Моторные испытания комбинированного маслоочистительного комплекса, включающего фильтр СРФ-60 и центрифугу с напорным сливом МЦН-9НС (данные приведены в таблице), проводились в дизеле Vasa32 (6ЧН32/35). Мощность двигателя на номинальном режиме его работы ($n_d = 10 \text{ с}^{-1}$) при среднем эффективном давлении газов в цилиндре $p_{me} = 2,3 \text{ МПа}$ составляла $P_e = 2425 \text{ кВт}$. Эксплуатационный эксперимент на судне проводился с использованием моторного масла М-14-Д₂(цл30) (ГОСТ 12337–84), высокие функциональные характеристики которого обусловлены применением термостойких многофункциональных присадок МАСК и ПМС, не уступающих по эксплуатационным свойствам современным зарубежным аналогам [6], [7]. В качестве топлива применяли топочный мазут 40, IV вида (ГОСТ 10585–99), который содержал 1,7–2 % серы. Угар масла при средней нагрузке на двигатель составил 0,83–0,89 г/(кВт·ч). Чистку ротора центрифуги выполняли через 250 ч работы. Объем масла в сточно-циркуляционной системе составил 1200 дм³. Высокий уровень автоматизации системы смазки дизеля достигается применением для очистки масла СРФ [1], [3]. Для рассматриваемого дизеля наиболее приемлемым является маслоочиститель СРФ-60, функционирующий в режиме непрерывной регенерации фильтрующих элементов (ФЭ) [6].

Эффективность очистки масла М-14-Д₂(цл30) в дизеле 6ЧН32/35

Показатель	ФТОМП	СРФ-60+ МЦН-9НС
<i>Оценка состояние моторного масла</i>		
Концентрация нерастворимых продуктов, %:		
– общих	3,8±0,3	1,2±0,1
– зольных	0,48±0,07	0,29±0,04
Содержание смол, %	7,2±1,3	6,1±1,1
Степень окисления, %	12,6±1,1	8,0±0,7
Щелочность ММ, мг кон. / г	8,9±0,7	12,7±1,1
Содержание несработавшихся присадок, %	27±2*	39±3
Диспергирующая способность масла, отн. ед.	0,48±0,05	0,56±0,06
Средний угара масла	1460±42	1450±40
<i>Скорость старения масла, г/ч</i>		
Накопление нерастворимых продуктов:		
– общих	61±4	58±3
– зольных	8,2±0,5	7,6±0,5
– окисления	187±12	126±8
– смолообразования	107±8	91±6
Срабатывание присадок по щелочности**, г кон./ч	43,7±6,2	38,1±5,4
<i>Эффективность маслоочистителей</i>		
Интенсивность очистки от нерастворимых продуктов, г/ч:		
– общих	290±15	3270±180
– зольных	170±8	1830±90
Срок службы ФЭ полнопоточного фильтра (периодичность обслуживания СРФ), тыс. ч	0,82±0,1	3,34±0,3
Скорость изнашивания деталей двигателя:		
– поршневых колец, г/1000 ч	9,2±1,3	5,6±0,5
– цилиндровых втулок, мкм/1000 ч	37±1,9	24±1,2
– вкладышей подшипников (мотылевых), г/1000 ч	9±0,16	7±0,12
– шеек (мотылевых) коленчатого вала, мкм/1000 ч	12,6±1,3	8,5±0,9
Нагаро- и лакообразование на поршнях (общая оценка нагара), баллы	26,8±1,8	15,4±1,4
Нагары в поршневых канавках, баллы	5,6±0,7	4,1±0,4

* За 100 % принята концентрация присадок в свежем масле.

** Для моторного масла с исходной щелочностью 30 мг кон./г.

Модуль саморегенирующегося маслоочистителя СРФ-60 (рис. 1), конструкция которого подробно описана в работах [5], [6], представляет собой корпус 5 прямоугольной формы. Условно его можно разделить на три части. В нижней части корпуса находится полость неочищенной жидкости. Она выполнена в виде пустотелого цилиндра с окнами 2, через которые неочищенная жидкость попадает в фильтровальные камеры. Соосно, внутри цилиндра, расположена отводная труба с патрубками регенирующего устройства 1. Вращаясь внутри цилиндра, регенирующее устройство с помощью патрубков через окна сообщается с фильтровальными камерами. Через регенирующее устройство, при перекрывании его патрубком одного из окон, фильтровальная камера соединяется с зоной низкого давления (атмосферой). В средней части очистителя расположены фильтровальные камеры с ФЭ 3, в верхней части находится полость очищенной жидкости, которая отделяется от фильтровальных камер трубными досками 4, на которых устанавливаются ФЭ. Регенирующее устройство приводится в движение с помощью гидропривода 6.

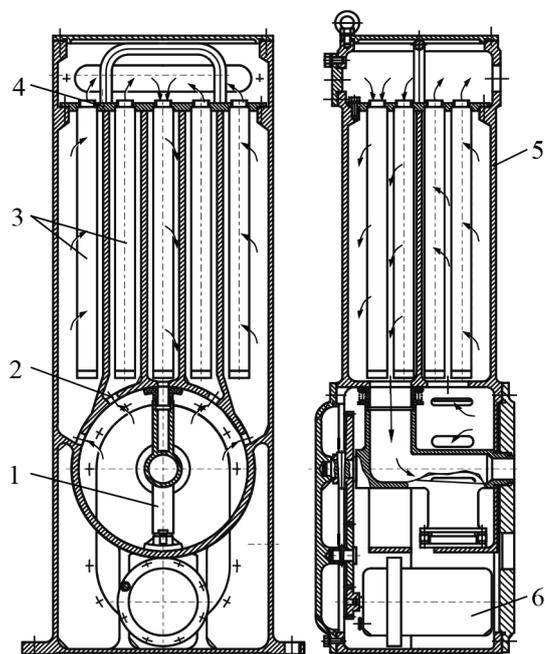


Рис. 1. Базовая модель унифицированного фильтра СРФ-60 с гидравлическим приводом распределительного устройства: 1 — регенирующее устройство; 2 — окна; 3 — ФЭ; 4 — доска; 5 — корпус; 6 — гидропривод

Сравнительные моторные испытания рассматриваемого комбинированного маслоочистительного комплекса (КМОК) и штатной системы очистки вели попеременно на одном и том же двигателе этапами по 2 тыс. ч. Средняя нагрузка на двигатель (математическое ожидание m_p) в обоих сравниваемых вариантах была одинаковая и составляла 70 % от его номинальной мощности. Среднее квадратичное ее отклонение от математического ожидания нагрузки составило 0,23–0,26 m_p . В качестве штатного в системе смазки использовали фильтр тонкой очистки масла полнопоточный (ФТОМП) типа ФМП-М с ФЭ Н-20, «фильтрующая штора» которых имеет в форму многолучевой звезды [1]. Тонкость отсева (номинальная) используемого в ФЭ нетканого материала составила 40–45 мкм.

Эксплуатационные моторные испытания СРФ-60 велись по ОСТ 24.060.09–89. Старение ММ оценивали по методике [8]. Износ цилиндрических втулок двигателя оценивали методом искусственных баз с использованием прибора УПОИ-6, вкладышей мотылевых подшипников и поршневых колец взвешиванием до и после опытов на аналитических весах ВЛА-200. Перед взвешиванием детали очищали от нагаров и лаковых отложений по опробованной ранее методике [1]. Нагарообразование оценивали по методу 344Т [1].

Результаты испытаний (Test result)

Результаты испытаний комбинированного маслоочистительного комплекса, включающего полнопоточный саморегенерирующий фильтр СРФ-60 и центрифугу МНЦ-9НС, а также штатный полнопоточный фильтр ФМП-М приведены в таблице (с. 720). Кинетика старения масла М-14-Д₂(цл30) на обоих этапах испытаний со штатной и опытной системами его очистки приведена на рис 2. Если рассматривать загрязнения масла НРП, выделяемые центрифугированием его навески в бензиновом растворе (ГОСТ 20684–75), то явно видны преимущества очистки комбинацией СРФ-60 и центробежного очистителя (ЦО). Накопление НРП в обоих случаях проходит по экспонентам (см. рис. 2), и к моменту отработки маслом 2 тыс. ч составляло по общему загрязнению 3,8 и 1,2 %, соответственно, при его очистке штатными и новыми агрегатами. По зольным НРП соотношение загрязнений в сравниваемых системах составляло 0,48 и 0,29 %. Высокая эффективность КСТОМ обусловлена тем, что интенсивность очистки ММ при приведенной ранее комбинации МО была в 11,3 (по общим) и 10,8 раза (зольным) НРП выше по сравнению с его очисткой ФМП-М [1], [4], [5].

В сравниваемых вариантах интенсивность очистки соответствовала 290 и 3270 г/ч по общему загрязнению НРП и 170 и 1830 г/ч — по зольным нерастворимым продуктам. Можно сделать вывод о том, что применение СРФ-60 с глубокой очисткой промывочного масла центрифугированием позволяет интенсифицировать этот процесс в 11–12 раз, что приводит к снижению уровня максимальной концентрации общих и зольных НРП, соответственно, в 3,16 и 1,65 раза (см. табличные данные на с. 720). Более эффективное удаление зольных продуктов центрифугированием сказывается на снижении их концентрации (кон.).

На рис. 2 видно замедление падения щелочности и менее интенсивный рост степени окисления при переходе от штатной к опытной системе очистки масла вследствие более интенсивного выделения с помощью ЦО из масла продуктов срабатывания присадок и частиц, образовавшихся в результате изнашивания двигателя и являющихся катализаторами окисления масла. В числовом выражении это привело к падению щелочности масла при его отработке 2 тыс. ч до значений 8,9 при штатной очистке и 12,7 мг кон./г, когда использовалась КСТОМ. Эффект снижения скорости срабатывания присадок выражен в повышении показателя щелочности в пробах масла в 1,43 раза после 2 тыс. ч работы.

Степень окисления СО масла определялось по содержанию в нем карбонильной группы ($\nu = 1550\text{--}1850\text{ см}^{-1}$). Методика ее идентификации состояла в нахождении методом НК-спектроскопии отношения интегральной интенсивности полосы поглощения карбонилсодержащих соединений к интегральной интенсивности полосы поглощения группы $-\text{C} = \text{C}$ -ароматических ядер ($\nu = 1550 - 1650\text{ см}^{-1}$) [1], [8]. Степень окисления масла в конечных пробах сравниваемых вариантов упала с 12,6 до 8 %, что указывает на существенное влияние эффективности очистки на это направление старения ММ. Комбинированная очистка масла на основе СРФ-60 и МЦН-9НС уменьшает глубину его окисления, как это видно по уменьшению показателя СО в сравнении с очисткой масла только фильтрованием (фильтром ФМП-М) в 1,57 раза.

Исследование термоокислительной деструкции структурных преобразований углеводородов, обусловленных изменением его группового состава, проводилось с помощью применения адсорбционного хроматографического разделения [3]. Зафиксировать значительные изменения термоокислительной деструкции масла М-14-Д₂(цл30) при его очистке штатными и опытными средствами не удалось. ИК-спектр работавшего масла, исследованный в области поглощения групп $-\text{C} = \text{C}$ -ароматических ядер, показал раздвоение полосы поглощения, что, по всей вероятности, связано с преобразованием моноциклических молекул ароматических углеводородов в би- и полициклические группы. Однако количественно оценить разницу в этих процессах для первого и второго этапов испытаний на основе полученных данных не удалось.

Для оценки содержания смолообразования (см.) высокополимеризованных продуктов окисления, растворимых в масле (типа смолистых соединений), использовался экспресс-метод, основанный на различной адсорбционной активности отдельных групп углеводородов и разности

отношений их к селективным растворителям. На основе диализа отработанного масла было выявлено незначительное снижение смолообразования при комбинированной очистке масла по сравнению со штатной. Концентрация смол (см.) к моменту обработки маслом 2 тыс. ч составила 7,2 % при его штатной очистке и 6,1 % — при комбинировании фильтрования и центрифугирования. Процесс смолообразования на обоих этапах испытаний, как и по другим направлениям старения масла, аппроксимируется экспонентами. Это обусловлено массообменными процессами, связанными с компенсацией угорающего масла доливом свежего нефтепродукта. Динамика их в функции от τ обусловлена скоростью накопления НРП, срабатывания присадок и окисления рабочего тела, функционирующего в СС дизеля. На скорость основных направлений старения, кроме смолообразования и термоокислительной деструкции, эффективность очистки масла оказала, как видно из рис. 2, значительное влияние.

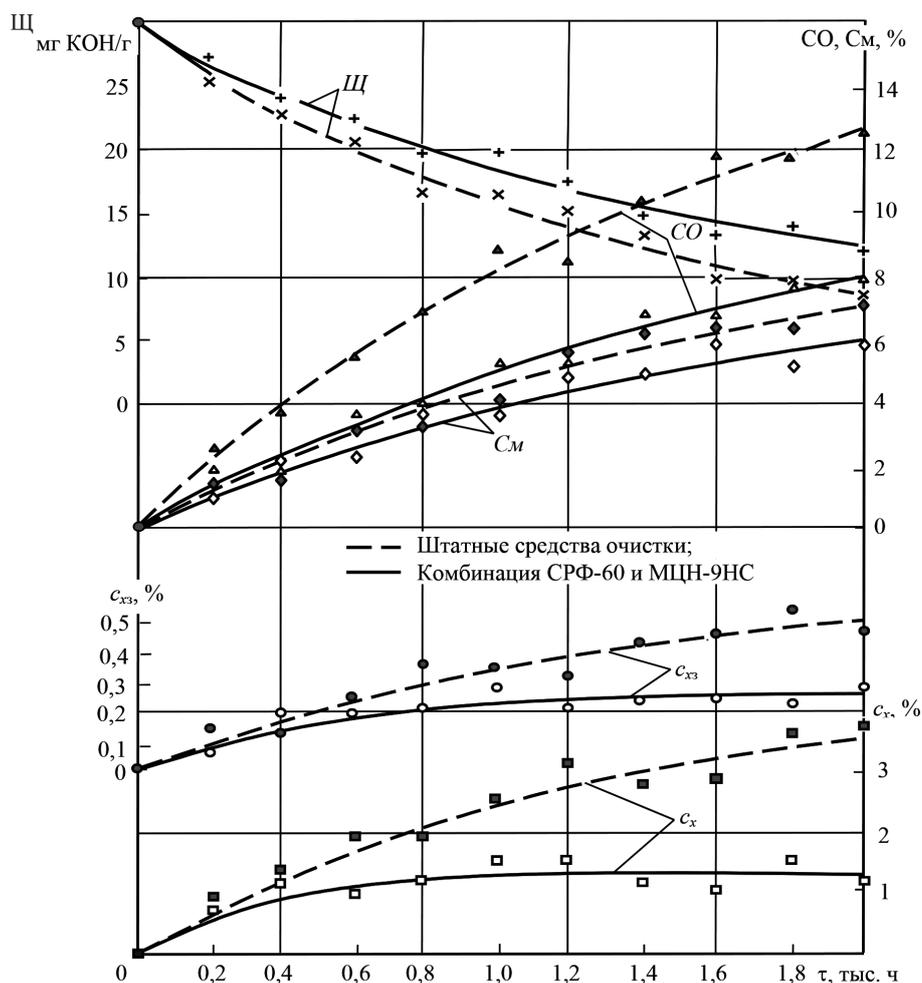


Рис. 2 Кинетика старения масла М-14-Д₂(цл30) в дизеле 6ЧН32/35

Воздействие более эффективной очистки масла комбинированной системой на состояние дизеля проявилось в снижении скорости изнашивания комплекта поршневых колец с 9,2 до 5,6 г/1000 ч, т. е. при модернизации СТОМ она уменьшилась в 1,64 раза. Эффект от перехода со штатной на комбинированную очистку ММ в снижении скорости изнашивания цилиндрических втулок также велик, она упала в 1,6 раза — с 37 до 24 мкм/1000 ч. Снижение скорости изнашивания деталей кривошипно-шатунного механизма, в частности вкладышей подшипников, при переходе со штатной системы очистки на КСТОМ, изменилось незначительно — всего в 1,3 раза (с 9 до 7 г/1000 ч работы). Такое явление объясняется тем, что на полном потоке в сравниваемых вариантах были установлены МО, имеющие примерно одинаковую (40–45 мкм) номинальную тонкость отсева.

Поскольку по глубине очистки ММ от тонкодиспергируемых НРП рассматриваемые СТОМ имеют существенные различия, это проявилось в значительном отличии нагаро- и лакообразования деталей ДВС при работе с ФТОМП и КМОК. Комбинированная очистка масла по сравнению со штатной снизила нагаро- и лакообразование при общей его оценке с 26,8 до 15,4 баллов. Полностью закоксованных колец на первом этапе работы не наблюдалось. Однако по твердости и толщине нагаров на поршнях отличие по сравнению со вторым этапом испытания было значительное. При штатной очистке масла по сравнению с комбинированной шлама в картере и в полостях коленчатого вала двигателя наблюдалось в 1,2–1,4 раза больше. По общей оценке нагаров, эффект в снижении нагарообразования при переходе со штатной к комбинированной очистке составил 42,5 %, т. е. состояние дизеля по углеродистым отложениям на деталях улучшилось почти в 1,8 раза. Бесспорно, значительное влияние на этот процесс оказало коагуляционное укрупнение дисперсной фазы на СРФ, которое способствовало эффективному ее удалению центрифугой при очистке промывочного масла. Эксперимент показал, что совершенствованием режимов работы регенерационного устройства можно значительно увеличить автономность работы СРФ-60 без обслуживания и довести ее до 5 тыс. ч даже в условиях применения низкосортных топлив и масла с высокосолевыми термостойкими присадками [9]. Эффективность этого направления повышения эффективности КМОК показана в работах [1], [10], [11].

По данным эксплуатационных испытаний, можно заключить, что фильтр СРФ-60 успешно выполняет функции защиты пар трения (подшипники) двигателя от абразивного изнашивания. Роль ЦО состоит в глубокой очистке ММ от мелкозернистых НРП, способствующих старению масла. Интенсификация этого процесса способствует увеличению срока службы масла. При этом важно подобрать к СРФ-60 такой ЦО, при котором скорость центрифугируемого промывного масла будет достаточной для достижения высоких значений коэффициента регенерации.

Использование в дизеле 6ЧН32/35 комбинации СРФ-60 с МЦН-9НС достигнута оптимизация по методике [12] такого состояния дисперсной фазы загрязнения масла, при котором его срок службы и период необслуживаемой работы автоматизированного фильтра могут превышать 3 тыс. ч. Судовой эксперимент подтвердил возможность с использованием фильтра СРФ-60 реализации ресурсосберегающего маслоиспользования при работе форсированных средне- и повышенной частоты вращения дизелей на топочных мазутах.

Выводы (Summary)

1. Эксплуатационные испытания автоматизированной КСТОМ на основе фильтра СРФ-60 и центрифуги МЦН-9НС в дизеле 6ЧН32/35 показали высокую ее эффективность. Применение КМОК замедляет старение масла в 1,2–1,8 раз. При этом в течение длительного периода времени на высоком уровне сохраняются его противоизносные и моюще-диспергирующие свойства. Комбинированная очистка замедляет старение масла по основным направлениям в 1,2–1,8 раза, создает условия для увеличения его срока службы и автономности работы СРФ-60 до 3 и более тыс. ч, снижает на 30–60 % скорость изнашивания основных деталей двигателя и нагаро- и лакообразование на поршнях.

2. Полнопоточная очистка масла СРФ-60 надежно защищает пары трения ДВС от абразивных крупнодисперсных частиц механических примесей, вызывающих интенсивное изнашивание трибосопряжений. Дополнительное центрифугирование промывочного (циркуляционного) масла самоочищающегося фильтра способствует глубокой его очистке от продуктов, катализирующих окисление (старение масла) и ускоряющих срабатывание присадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кича Г. П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г. П. Кича, Б. Н. Перминов, А. В. Надежкин. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. — 372 с.

2. Орешенков А. В. Трибологические характеристики горюче-смазочных материалов / А. В. Орешенков, Н. Н. Гришин, С. Е. Степанова // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2017. — № 2. — С. 23–25.
3. Кича Г. П. Зарубежные автоматические фильтры тонкой очистки масла и топлива судовых энергетических установок / Г. П. Кича, С. П. Полоротов // Судостроение за рубежом. — 1982. — № 3. — С. 58–73.
4. Lennartz R. Full flow filtration in lubricating oil systems / R. Lennartz // Second World Filtration Congress, Proc. — London, 1979. — Pp. 541–548.
5. Кича Г. П. Новые инженерные решения в конструкциях саморегенерирующихся фильтров для очистки топлив и смазочных материалов на судах / Г. П. Кича, Н. К. Пак // Морские интеллектуальные технологии. — 2013. — № 1 (19). — С. 54–59.
6. Цветков О. Н. Моторные масла для судовых дизелей / О. Н. Цветков / Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2015. — № 10. — С. 17–20.
7. Yao J.B. Recent development of antiwear and extreme pressure-resistant additives for lubricating oils and greases / J.B. Yao // Lubricating Oil. — 2006. — № 21(3). — Pp. 29–37.
8. Никифоров О. А. Рациональное использование моторных масел в судовых дизелях / О. А. Никифоров, Е. В. Данилова. — Л.: Судостроение, 1986. — 96 с.
9. Кича Г. П. Экспериментальное моделирование эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров, функционирующих в системах смазки судовых дизелей / Г. П. Кича, С. П. Бойко // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 1-3(29). — С. 95–99.
10. Rixen F. Filtertechnische Aufbereitung von schweren Kraftstoffen mit Boll-Filtratoren / F. Rixen, H.L. Schwarz // Hansa. — 1979. — Bd 116. — H. 22. — Pp. 1725–1728.
11. Основные тенденции и приоритеты развития мирового двигателестроения (материалы конгресса CIMAC-2016) // Двигателестроение. — 2016. — № 4 (266). — С. 35–60.
12. Кича Г. П. Оптимизация работы маслоочистительного комплекса судовых двигателей внутреннего сгорания на основе вариационного исчисления / Г. П. Кича, А. В. Надежкин, Н. К. Пак // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2012. — № 3 (12). — С. 9–19.

REFERENCES

1. Kicha, G. P., B. N. Perminov, and A. V. Nadezhkin. *Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011.
2. Oreshenkov, A. V., N. N. Grishin, and S. E. Stepanova. "Tribological characteristics fuels and lubricating materials." *World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin* 2 (2017): 23–25.
3. Kicha, G. P., and S. P. Polorotov. "Zarubezhnye avtomaticheskie fil'try tonkoj ochistki masla i topliva sudovyh energeticheskikh ustanovok." *Sudostroenie za rubezhom* 3 (1982): 58–73.
4. Lennartz, R. "Full flow filtration in lubricating oil systems." *Second World Filtration Congress, Proc.* London, 1979. 541–548.
5. Kicha, G. P., and N. K. Pak. "Novye inzhenernye resheniya v konstrukciyah samoregeneriruyushchihsya fil'trov dlya ochistki topliv i smazochnyh materialov na sudah." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1(19) (2013): 54–59.
6. Tsvetkov, O. N. "Marine diesel engine oils." *World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin* 10 (2015): 17–20.
7. Yao, J. B. "Recent development of antiwear and extreme pressure-resistant additives for lubricating oils and greases." *Lubricating Oil* 21(3) (2006): 29–37.
8. Nikiforov, O. A., and E. V. Danilova. *Racional'noe ispol'zovanie motornyh masel v sudovyh dizelyah*. L.: Sudostroenie, 1986.
9. Kicha, G. P., and S. P. Bojko. "Eksperimental'noe modelirovanie effektivnosti processa regeneracii samoochishchayushchihsya fil'trov, funkcioniruyushchih v sistemah smazki sudovyh dizelej." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1-3(29) (2015): 95–99.
10. Rixen, F., and H.L. Schwarz. "Filtertechnische Aufbereitung von schweren Kraftstoffen mit Boll-Filtratoren." *Hansa* 116.22 (1979): 1725–1728.
11. "Osnovnye tendencii i priority razvitiya mirovogo dvigatelestroeniya (materialy kongressa CIMAC-2016)." *Dvigatelistroenie* 4(266) (2016): 35–60.
12. Kicha, Gennady P., Andrew V. Nadezkin, and Nicholas K. Pak. "The optimisation of the oil cleaning complex of marine internal combustion engines on the basis of the variational calculus." *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin* 3(12) (2012): 9–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кича Геннадий Петрович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет им. адм. Г. И. Невельского»
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а.
e-mail: nadezkin@msun.ru

Надежкин Андрей Вениаминович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет им. адм. Г. И. Невельского»
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а.
e-mail: nadezkin@msun.ru

Бойко Сергей Петрович —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет им. адм. Г. И. Невельского»
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а.
e-mail: nadezkin@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kicha, Gennadij P. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime state university named after adm.
G. A. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: nadezkin@msun.ru

Nadezkin, Andrej V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime state university named
after adm. G. A. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: nadezkin@msun.ru

Boyko, Sergey P. —

PhD
Maritime state university named
after adm. G. A. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию 22 мая 2019 г.

Received: May 22, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744

**ECOLOGICAL SAFETY OF SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINES.
SELECTING THE EFFICIENT METHOD COMPLIANCE
WITH THE NEW REQUIREMENTS OF 2020 FOR SULFUR EMISSIONS**

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

A global sulfur limit of 0.50% in used fuel will come into force in 2020, and more than 70,000 ships will be affected by the regulation. In such circumstances, ship operators inevitably face the problem of an ambiguous choice of how to meet the new requirements. The following variants can be considered as compliance options: switching to power the low-sulfur fuel, the availability and price of which has not been finally determined yet; using the heavy sulfur fuels with retrofitting the power plants by the scrubber systems; modernization of the vessel with switching installation to use the gaseous fuel, and, finally, the use of alternative fuels (methanol, biofuel, hydrogen).

The problem of choosing the conformity method can be solved on the basis of analyzing the payback period of the projects for the vessels modernization compared with the trivial transition to use the liquid low-sulfur fuels corresponding the requirements that do not require significant changes in the design of the power plant. At the same time, the effectiveness of selecting the basic compliance options in the form of using open-loop scrubber systems, hybrid scrubbers and using the liquefied natural gas is closely dependent on the vessels types and the power of their power plants. In this regard, it is advisable to group and consider the different types of vessels in the power series up to 5 MW, 5-10 MW and 10-40 MW. The results of this analysis carried out in the work allow us to identify the main trends in the development of the commercial fleet under the conditions of the new regulation.

In general, the proposed analysis materials highlight the further prospects for the development of the fleet's energy installations to ensure the reduction of sulfur oxide emissions in accordance with the requirements of the International Maritime Organization, which will come into force on January 1, 2020.

Keywords: Ship power plant, environmental safety, IMO requirements, SOx emission, control zones, compliance methods, scrubber, liquefied natural gas, heavy fuels, modernization, choice of option.

For citation:

Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 727-744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

УДК 621.43.074

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОВЫХ ДВС.
ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА СООТВЕТСТВИЯ
НОВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ 2020 г. ПО ВЫБРОСАМ СЕРЫ**

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Отмечается, что глобальные ограничения по содержанию серы в размере 0,50 % в используемом топливе вступят в силу в 2020 г., и регулированием будет затронуто более 70 000 судов. В таких условиях операторы судов неизбежно сталкиваются с проблемой неоднозначного выбора способа соответствия новым требованиям. В качестве вариантов соответствия могут рассматриваться: переход на питание низкосернистым топливом, доступность и цена которого до сих пор окончательно не определена, использование тяжелых сернистых топлив с дооснащением энергетических установок скрубберными системами, модернизация судна с переводом установки на использование газообразного топлива и, наконец, использование альтернативных видов топлива (метанол, биотопливо, водород). Особое внимание обращается

на то, что проблема выбора способа соответствия может быть решена на основе анализа срока окупаемости проектов модернизации судов по отношению к тривиальному переходу к использованию жидких низкосернистых, соответствующих требованиям, топлив, не предусматривающих значительных изменений в конструкции энергетической установки судна. При этом эффективность выбора основных вариантов соответствия в виде использования скрубберных систем с открытым контуром, гибридных скрубберов и сжиженного природного газа находится в тесной зависимости от типов судов и мощности их энергетических установок. В этой связи целесообразно сгруппировать и рассмотреть разные типы судов в мощностных рядах до 5 МВт, 5–10 МВт и 10–40 МВт. Результаты такого анализа, проведенного в данной работе, позволяют выявить основные тенденции развития коммерческого флота в условиях нового регулирования. В целом предлагаемые материалы анализа выделяют дальнейшие перспективы развития энергетических установок флота в целях обеспечения сокращения эмиссии оксидов серы в соответствии с требованиями Международной морской организации, вступающими в силу с 1 января 2020 г.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, требования ИМО, эмиссия SO_x , зоны контроля, способы соответствия, скруббер, сжиженный природный газ, тяжелые топлива, модернизация, выбор варианта.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

Введение (Introduction)

Наибольший ущерб окружающей среде от судоходства наносится судовой энергетической установкой, в результате работы которой образуются такие вредные компоненты, как несгоревшие углеводороды, твердые частицы, оксиды азота, парниковые газы и в отдельных случаях соединения серы [1]. Предлагаемые материалы являются логическим продолжением статьи [2], посвященной рассмотрению проблем, связанных с предстоящим введением Международной морской организацией — International Maritime Organization (IMO) в 2020 г. глобальных ограничений по содержанию серы в используемом топливе и эмиссии SO_x судовыми энергетическими установками.

Как отмечалось в публикации [2], достижение нормативных показателей по эмиссии SO_x может быть получено в результате использования специальных видов низкосернистых топлив либо путем очистки в специальных периферийных устройствах — скрубберах отработавших газов двигателей, работающих на традиционных высокосернистых сортах топлива — High-Sulphur Fuel Oil (HSFO)¹.

Новое регулирование затрагивает интересы операторов и судовладельцев более 70 000 разнообразных видов судов. Поэтому поиск и выбор оптимального решения по соответствию требований в каждом конкретном случае связаны с разносторонним рассмотрением многофакторных аспектов проблемы. При рассмотрении проблем достижения соответствия новым требованиям необходимо принять во внимание, что помимо ожидаемого экологического эффекта, внедрение глобального ограничения содержания серы в используемом топливе также будет иметь другие последствия для судоходства. К последним следует отнести: воздействие на выбросы парниковых газов, увеличение расходов на топливо и различные топливные смеси, изменения эксплуатационных характеристик судов, а также влияние на стоимость активов.

Целью статьи является анализ влияния различных факторов на выбор стратегии соответствия различных видов судов новым требованиям ИМО по сокращению выбросов серосодержащих продуктов с отработавшими газами судовых ДВС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Воздействие на парниковые газы и другие выбросы. Прежде чем перейти к непосредственному анализу возможных технических решений, касающихся достижения соответствия но-

¹ Энергоресурсы, топливо // Сорта нефти. Маркерный стандарт, бенчмарк. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4758-Sorta-nefti.-Markernyj-standart-benchmark (дата обращения: 15.03.2016).

вым требованиям ИМО по эмиссии оксидов серы, необходимо обратить внимание на взаимосвязь проблемы с сопутствующими вопросами обеспечения экологической безопасности судовых энергетических установок. Доступные варианты достижения соответствия требованиям по глобальному ограничению эмиссии серы неизбежно окажут влияние на выбросы парниковых газов и NO_x судовыми двигателями. Техническое регулирование выбросов парниковых газов, выходящее за рамки требований энергоэффективности судов (Energy Efficiency Design Index (EEDI) [3], находится в повестке дня ИМО после того, как стратегия была согласована в апреле 2018 г. Поэтому выполненный выбор способа соответствия может оказать влияние на соблюдение будущих правил сокращения выбросов парниковых газов. В равной мере в зависимости от технологии ограничения эмиссии серы выбор способа соответствия окажет влияние на достижение требований стандарта Tier III по выбросам NO_x .

Перевод энергетической установки на морской газойль (Marine Gas Oil) MGO, дистилляты или смешанное топливо будет поддерживать выбросы парниковых газов и NO_x на текущих уровнях. Использование скрубберов в сочетании с высокосернистым тяжелым топливом HSFO, содержание серы в которых определяется известными методами [4]–[7], приведет к небольшому увеличению расхода топлива, порядка 3–5 %, и соответствующему увеличению выбросов парниковых газов. При этом соответствие стандартам NO_x Tier III может быть достигнуто с помощью систем селективного каталитического восстановления — Selective Catalytic Reduction (SCR) или рециркуляции отработавших газов — Exhaust Gas Recirculation (EGR), но в некоторых случаях использование таких систем окажется намного сложнее в сочетании с технологией скруббера.

В то же время использование LNG — Liquefied Natural Gas (сжиженный природный газ) приведет к сокращению выбросов ПГ на 10–20 % в зависимости от вида двигателя. Газовые двигатели низкого давления имеют определенное количество метана на выпуске, что снижает потенциальные преимущества, но они обеспечивают соответствие уровням по эмиссии NO_x по Tier III. Системы высокого давления исключают выбросы метана, но требуют использования SCR или EGR для снижения NO_x до уровней уровня Tier III. Другие альтернативные виды топлива, такие как биотопливо или водород, могут привести к еще более резкому сокращению выбросов парниковых газов в зависимости от того, как эти топлива производятся, однако в зависимости от характеристик альтернативных видов топлива и особенностей его горения могут потребовать использования системы восстановления NO_x .

Технические и операционные риски для скрубберных систем. Накопленный опыт, в том числе DNV GL^{1, 2, 3, 4}, [8]–[10], на основе 170 завершенных проектов использования скрубберов позволяет сформировать представление о технических и эксплуатационных рисках для всех типов скрубберных систем. Основные темы, требующие особого внимания для успешной установки и эксплуатации, можно резюмировать следующим образом.

Во-первых, наличие надежного контрольного оборудования является ключевым, поскольку оно служит основой для подтверждения соответствия системы. В первую очередь это касается датчиков и анализаторов для отработавших газов и промывочной воды. Такие измерительные устройства обычно используются в наземных приложениях и их необходимо адаптировать для использования в составе судовой энергетической установки.

Во-вторых, вода после промывки имеет низкий уровень pH и является очень коррозионно-активной. Поэтому компоненты, контактирующие с ней (водоразборные водопроводные трубы

¹ Sulphur 2020 — cutting sulphur oxide emissions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx> (дата обращения: 15.09.2018).

² ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels> (дата обращения: 01.12.2018).

³ Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html> (дата обращения: 22.10.2018).

⁴ What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf (дата обращения: 16.09.2018).

и клапаны в зонах сброса воды из скруббера), должны обладать достаточной стойкостью к коррозии. В табл. 1 рассмотрены вопросы, связанные с эксплуатационной надежностью скрубберов с открытым циклом. Некоторые дополнительные риски необходимо учитывать для замкнутых и гибридных скрубберов. Эти риски могут быть смягчены путем тщательного проектирования системы и выбора материалов.

Таблица 1

Эксплуатационные риски скрубберов открытого цикла

Подсистема	Опасности и риски	Причины	Следствия
Забора и подачи морской/ заборной воды	Потеря снабжения морской водой из-за забивания приемных фильтров	Накопление отложений в кингстонных ящиках. Кингстонный ящик забит песком или мусором	Отключение скруббера
	Снижение производительности насоса заборной воды из-за дросселирования входа	Облитерация отводов труб на входе насоса	Снижение надежности насоса, возможность отказа
	Прекращение подачи заборной воды из-за отказа насоса (-ов) морской воды	Механическая поломка, электрическая неисправность	Отключение скруббера
	Внешняя утечка перед башней скруббера	Трещина / разрыв трубопровода морской воды. Чрезмерное давление. Закрытые клапаны. Коррозия / Эрозия	Затопление машинного отделения
Удаления промывочной воды	Слив воды не соответствует пределу pH VGP США (не менее шести)	Конструкция не включает решение для повышения pH промывочной воды перед сливом	Использование MGO / совместимого топлива в территориальных водах США
	Коррозия заборного пагрубка	Плохое покрытие или качество установки	Отключение скруббера. Ремонт выпускных труб в эксплуатации
	Коррозия клапанов в линии слива промывочной воды	Коррозия из-за низкого pH промывочной воды. Несоответствующие свойства материала. Нарушение технологии обработки и установки	Простой скруббера
	Внешняя утечка после скрубберной башни	Трещина / разрыв промывной водопроводной трубы. Чрезмерное давление. Закрытые клапаны. Коррозия / Эрозия	Затопление машинного отделения
	Турбулентность, создающая газ в промывочной воде	Отсутствие функции дегазации в сливной линии	Видны пузырьки газа. Возможно несоблюдение требований по промывочной воде скруббера

Продолжение табл. 1

Скрубберной башни	Сажа в скрубберной воде и на палубе	Накопление сажи при работе, выброс при быстром изменении нагрузки двигателя	
	Противодавление в выпускной линии превышает предел	Недостаточный объем конструкции скруббера	Тепловая перегрузка двигателя. Снижение мощности. Повышенный расход топлива
	Затопление скрубберной башни	Засорен сливной трубопровод. Ошибочная работа клапана. Отказ тревоги высокого уровня	Затопление машинного отделения, попадание воды в цилиндры двигателя — гидроудар
	Трещины или деформация скрубберной башни	Коррозия. Неправильная сварка. Неправильная установка. Механическое напряжение между деталями скруббера (башня и трубка Вентури)	Затопление машинного отделения
	Засорение демистера скрубберной башни	Недостаточная очистка демистера. Распылительные форсунки не покрывают всю площадь	Увеличение противодавления. Появление сажи
	Коррозия / эрозия сопел скруббера	Коррозия из-за низкого pH промывочной воды. Несоответствующие свойства материала	Более низкая эффективность распыления. Повреждение трубопровода или насоса из-за повышенного давления. Заблокированные / поврежденные клапаны ниже по течению
	Недостаточная эффективность скруббера	Конструкция / размер башни не подходит для расхода отработавших газов и времени удержания. Размеры капель и объема воды не оптимальны	Несоответствующие выбросы в атмосферу
	Поток отработавших газов через колонну без работающих насосов морской воды	Отключение насоса морской воды (ложная или фактическая тревога). Выпускные клапаны в неправильном положении при запуске двигателя. Воздушная функция выхлопных клапанов неэффективна	Плавление пластмассовых / низкотермостойких компонентов в башне

Окончание табл. 1

Выхлопных труб	Протекающий сильфон-компенсатор на входе и выходе скрубберной башни	Тепловое расширение / деформация трубопроводов и связанных с ними компонентов в башне	Отключение скруббера
	Коррозия выхлопной трубы после скруббера	Кислотная среда. Дегградация материала из-за коррозии	Утечка в выхлопной трубе. Нарушения потока. Время простоя скруббера
	Внутренняя утечка в перепускных клапанах отработавших газов	Потеря способности полного закрытия клапанов. Отказ уплотнения вентилятора	Внутренняя утечка в обводную линию. Выпускной поток через скруббер и байпас. Неисправность, требующая перехода на MGO
	Взрыв из выхлопной трубы	Главный клапан и перепускной клапан находятся в закрытом положении при запуске основного или вспомогательного двигателя	Повреждения выхлопной трубы. Структурные повреждения.
Контроля эмиссии	Низкая надежность системы непрерывного контроля выбросов	Засорение линии отбора проб из-за накопления сажи. Засорение фильтра. Кристаллизация в линии проб. Электрическая неисправность. Отказ насоса. Отработавшие газы недостаточно охлаждены	Неадекватные данные или их отсутствие. Неисправность, требующая перехода на MGO
Автоматизации и управления	Ненадежная система автоматизации и управления	Внутренний не обнаруженный сбой датчика. Неопределенная неисправность кабеля. Ошибка входа контроллера	Неправильная операция. Непреднамеренное отключение системы. Задержка аварийного реагирования
Корпус и конструкция	Коррозия на корпусе в зоне слива промывочной воды	Вода с низким pH	Структурная дегградация материала конструкции

Цены и наличие малосернистого топлива. Внедрение глобального ограничения по выбросам серы продолжает приводить к продолжительным дискуссиям о будущем наличии топлива с низким содержанием серы, а также о возможном динамическом развитии цен¹. Прогнозирование будущей цены на топливо действительно является сложной задачей, но ожидается, что переход на топливо более высокого качества, скорее всего, приведет к значительно более высоким расходам.

Стоимость различных сортов топлива традиционно тесно коррелирует с ценами на нефть. Однако такая корреляция не должна использоваться для будущих прогнозов. Совершенствование разработок и наращивание производства низкосернистых топливных смесей приведет к увеличению спроса на дистилляты и, скорее всего, к росту цен вверх. В то же время отсутствие спроса на HSFO может снизить его цену. Таким образом, в будущем можно будет наблюдать расширение

¹ Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html> (дата обращения: 22.10.2018).

разрыва между двумя конкурирующими топливными решениями, причем HSFO (в сочетании со скруббером) устанавливает нижний уровень цен, а MGO определит верхний уровень.

После введения зон контроля эмиссии оксидов серы Sulphur Emission Control Areas (SECA) (зона контроля за содержанием серы в выбросах) [11] большинство операторов просто переключились на топливо MGO или Marine Diesel Oil (MDO). Аналогичная тенденция с более ярким проявлением ожидается к 2020 г., поэтому в ближайшее время рост цен на MGO неизбежен. По мере постепенного введения в производство гибридных видов топлива с низким содержанием серы (0,50 % серы) можно прогнозировать, что цены на дистилляты, в конечном итоге, выравниваются. Однако если существенная разница цен между традиционными HSFO и совместимыми видами топлива сохранится в обозримом будущем, то альтернативные решения, такие как скрубберы или использование LNG в качестве судовых топлив, могут оказаться предпочтительным решением.

Наличие топлива в портах является еще одной проблемой для судовладельцев и операторов. В частности, прогнозирование доступности топлива с содержанием серы менее 0,50 % в настоящее время крайне затруднительно, поскольку многие нефтеперерабатывающие заводы находятся на стадии разработки этих продуктов. Доступность HSFO также является проблемой для тех, кто устанавливает скрубберы. Несмотря на то, что многие HSFO останутся в производстве в качестве побочного продукта процессов переработки, высокосернистые топлива могут оказаться малодоступными во многих портах из-за отсутствия спроса. Однако ожидается, что HSFO будет доступен во всех основных местах бункеровки. Таким образом, основные результаты можно представить в виде табл. 2.

Таблица 2

Предполагаемые результаты использования способов соответствия

Способы соответствия	Эмиссия SO _x	Выбросы парниковых газов	Эмиссия NO _x
MGO, дистилляты, смешанное топливо	Снижение до уровня менее 0,50 или 0,10 %	Без изменений	Без изменений, EGR или SCR требуется для достижения уровня Tier III
Скрубберы с HSFO	Снижение до уровня менее 0,50 или 0,10 %	Небольшое увеличение в 3–5 %	Без изменений, EGR или SCR требуется для уровня NO _x III, повышенная сложность компоновки в связи с комбинацией со скруббером
LNG	Устранена полностью	10–20 % снижения в зависимости от конструкции двигателя	Снижение на 20–80 % в зависимости от вида двигателя, для двигателей высокого давления требуется SCR или EGR для соответствия требованиям Tier III

Обновление и использование флота. Ожидаемое увеличение затрат на топливо, как полагают многие аналитики отрасли, приведет к определенному замедлению снижения операционных расходов. По той же причине усилия будут сконцентрированы на мероприятиях, направленных на повышение энергоэффективности. Более конкурентоспособными будут признаны энергоэффективные суда. Суда, оборудованные скрубберами, могут получить значительное конкурентное преимущество. Ожидается, что первоначально суда со скрубберами смогут обеспечить премиальные тарифы на фрахт. При этом, если большинство судов в определенном сегменте устанавливают скрубберы, то ставки окажутся в результате сниженными. Те суда, на которых еще

не будут внедрены технологии скруббера, будут вынуждены сократить свои ставки до неустойчивых уровней и, в конечном итоге, они могут быть вытеснены с рынка. Поэтому судовладельцам очень важно отслеживать конкуренцию в своем сегменте, чтобы гарантировать свои доминирующие положения на рынке оказания транспортных услуг.

Существенные инвестиции, необходимые для сохранения конкурентоспособности в условиях глобального режима ограничения эмиссии оксидов серы, в сочетании с расходами, связанными с системами очистки балластных вод, могут привести к тому, что более старые суда будут невыгодными для дальнейшей эксплуатации, что может служить причиной более высокой активности утилизации, а затем и обновления флота с использованием современных, более эффективных судов. Такая тенденция может также ускорить внедрение альтернативных видов топлива, таких как LNG.

Влияние на страховые взносы. Морское страхование также будет затронуто предстоящими правилами в отношении серы. Поставщики страховых услуг обеспокоены потенциальными повреждениями, потерей работоспособности двигателей и другими возникающими проблемами, которые могут быть вызваны введением новых топливных продуктов, свойства которых до сих пор не совсем понятны. Кроме того, существует потенциал для нарушения графика перевозок и задержек из-за отсутствия соответствующего совместимого топлива в бункерном порту или из-за механических сбоев, вызванных плохим качеством топлива для бункера. Ожидается, что страховщики морских грузов и перевозок пересмотрят свою политику для покрытия таких случаев, когда груз не будет поврежден, но транспортировка окажется более продолжительной из-за проблем, связанных с ограничением глобальных выбросов оксидов серы. Новые проблемы могут привести к тому, что страховщики смогут принять риски, увеличив свои премии, отражая тем самым неопределенности новой реальности.

Оговорки, касающиеся бункеровки, также должны быть пересмотрены во избежание споров. Заметным примером являются цены на различные виды топлива. В частности, когда фрахтователь, который принимает судно, покупает топливо, находящееся на борту и повторно продает его владельцу после повторной поставки. Во время перехода к новым ограничениям выбросов серы может иметь место большая разница в ценах на топливо и этот риск должен учитываться в чартерной партии. К другим рискам относятся также недоступность совместимого топлива и изменение производительности судна в зависимости от качества топлива.

Подход к анализу альтернативных решений. В связи с приближением сроков введения ограничений судовладельцам необходимо как можно скорее рассмотреть стратегии и планы того, как соблюдать новые требования по эмиссии оксидов серы¹. Чтобы сделать предварительные прогнозы для принятия решения по выбору способа соответствия новым требованиям, необходимо провести сравнительный анализ эффективности и целесообразности использования скрубберов, LNG или других вариантов соответствия. Этот прогноз будет зависеть от ряда факторов, включая, но не ограничиваясь следующими факторами:

- ценами на топливо: ожидаемый, будущий разброс цен между соответствующими топливами, HSFO и LNG;
- наличием HSFO или совместимых топлив в портах, обычно используемых для бункеровки;
- инвестиционными затратами по каждому варианту;
- расходами на топливо, которые предполагает к использованию владелец или фрахтователь (сможет ли судно обеспечить более высокие ставки чартера, если используются, например, LNG или скрубберы);
- местными правилами, ограничивающими работу скруббера (нужен разомкнутый или гибридный скруббер);
- эксплуатационными расходами, включая расходы на техническое обслуживание и ремонт, а также расходы на обучение экипажа.

¹ Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html> (дата обращения: 22.10.2018).

Таким образом, необходимо выполнить сравнение затрат на установку скруббера и использование LNG или совместимых альтернативных топлив для энергетических установок в диапазоне мощностей главного двигателя от 5 до 40 МВт. «Сценарии анализа» являются общими, а выводы будут зависеть от фактического эксплуатационного профиля каждого судна и сделанных допущений.

Для проведения дальнейшего анализа необходимо принять исходные данные, которые сводятся к следующему:

1. Сравнение затрат, основанное на разнице цен между совместимыми видами топлива и альтернативными вариантами соответствия.

2. Ожидание в перспективе превышения цен на низкосернистые топлива за тонну по сравнению с ценой HSFO, что может достигать в нижнем пределе 40 долл. США, в верхнем — 365 долл. США. Базовая разница цен, принимаемая для анализа, составляет 200 долл. США за тонну. При этом абсолютная цена распространенных альтернативных видов топлива будет варьироваться в зависимости от колебаний цен на HSFO).

3. Работа на HSFO со скруббером с открытым контуром или гибридным скруббером, связанная с инвестициями в установку скруббера и увеличением эксплуатационных расходов. (Гибридные скрубберы имеют более высокие затраты на установку и эксплуатацию по сравнению с разомкнутым контуром). Кроме того, для скрубберов сделаны дополнительные допущения:

- системы скрубберов увеличивают расход топлива судна примерно на 3–5 %;
- время простоя скрубберных систем приведет к затратам на эксплуатацию совместимого топлива;
- установка систем скрубберов приведет к увеличению стоимости обслуживания (больше для гибридного / замкнутого контура);
- для гибридных и замкнутых систем неизбежны дополнительные затраты на поставку щелочей и утилизацию твердых остатков.

4. Альтернатива LNG имеет инвестиционные затраты на системы хранения, систему управления топливом и конверсию двигателя, а эксплуатационные расходы зависят от предполагаемой цены на LNG. Эта цена в данном случае устанавливается на основе цен в Европе и Северной Америке, исходя из предположения, что цены колеблются от 8 до 10 долл. США / ММВТУ.

Оценка вариантов соответствия. Анализ выполняется для трех вариантов мощности судовых энергетических установок, данные по которым приведены в табл. 3.

Таблица 3

Анализируемые энергетические установки

Мощность установки	5 МВт	10 МВт	40 МВт
Расход топлива главным двигателем, т/год	2,800	5,700	22,800
Расход топлива вспомогательными двигателями, т/год	400	800	3,000

Основные параметры скрубберной системы, принятой для анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Предполагаемые параметры скрубберной системы

Параметры	Значение
Производительность насоса забортной воды (м ³ /МВт·ч)	50
Увеличение расхода топлива, %	2
Время простоя скруббера, дней в году	14
Потребление реагента (гибридный скруббер), л / МВт·ч	19
Производство шлама, кг / МВт·ч	5
Время за пределами SECA, %	75
Время работы по замкнутому контуру, %	15

Результаты анализа могут быть рассмотрены с точки зрения времени окупаемости модернизации по сравнению с использованием малосернистых топлив, как показано на рис. 1, откуда следует, что срок окупаемости скрубберных систем сокращается с увеличением мощности установки, поэтому установка скруббера представляется наиболее целесообразной для крупных судов с высоким расходом топлива. В то же время при выборе способа соответствия для небольших судов перевод на LNG может быть более привлекательным решением, чем установка скрубберных систем.

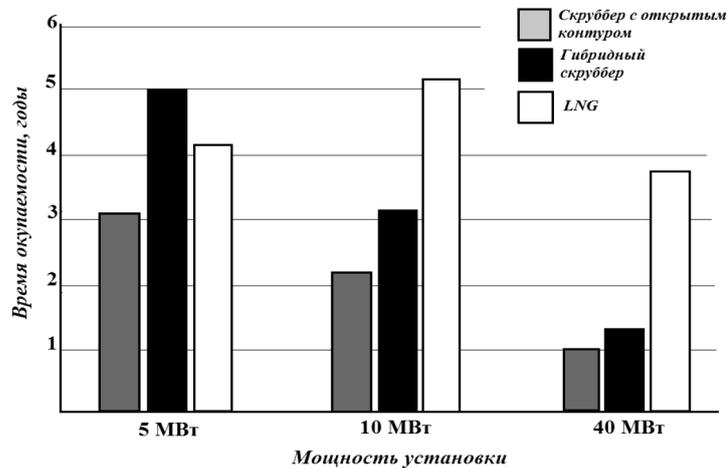


Рис. 1. Время окупаемости разомкнутых и гибридных скрубберов и СПГ

Наряду со сроком окупаемости, существуют и другие факторы, которые следует учитывать при принятии решения о выборе способа соответствия новым требованиям ИМО. Некоторые особенности выбора для различных судов рассматриваемого ряда представлены на рис. 2. Типичными видами судов с мощностью двигателя порядка 5 MWt (см. рис. 2, а) являются челночные танкеры, навалочные суда, пассажирские и круизные суда и небольшие контейнеровозы. Для таких судов, из-за низкого расхода топлива, время окупаемости скруббера относительно велико.

В рассматриваемом случае для скруббера с открытым контуром время окупаемости составляет около трех лет, для гибридного скруббера — пять лет. Перевод судна на LNG в качестве топлива имеет срок окупаемости порядка четырех лет. При этом в долгосрочной перспективе (с 10 до 15 лет) LNG может обеспечить значительную экономию для судна такого размера, предполагая, что цены на LNG будут формироваться на конкурентной основе. Довольно часто такие суда могут работать в течение длительного периода времени в зонах SECA или в зонах с ограничениями на слив промывочной воды скруббера. В этом случае LNG может быть очень привлекательным вариантом, позволяющим соблюдать одновременно ограничения как SO_x , так и NO_x , одновременно обеспечивая сокращение выбросов ПГ на 10–20 %. Кроме того, размер скруббера и необходимого для него пространства может являться проблемой для небольших судов [12].

Проведем аналогичное рассмотрение проблем модернизации судов с мощностью энергетической установки 10 MWt. К данной категории судов относятся танкеры MR, навалочные машины Panamax и контейнеровозы. Для этих судов скрубберы имеют срок окупаемости от двух до трех лет, тогда как окупаемость перевода на LNG оценивается в пять лет, как следует из графиков на рис. 2, б и диаграмм на рис. 1. В зависимости от эксплуатационного профиля, а именно: плавание в зонах SECA, тип торговли (постоянные или изменяющиеся маршруты следования), могут быть рассмотрены различные решения. Несмотря на то, что бункерная инфраструктура для LNG разрабатывается и развивается во всем мире, для судов, совершающих перевозки по постоянно меняющимся направлениям, неразвитая инфраструктура LNG в настоящее время может сделать невозможным использование газообразного топлива. Одновременно необходимо принимать во внимание возможность того, что в 2020 г. HSFO не будет легкодоступным во всех портах,

что может сказаться на окупаемости проекта модернизации некоторых судов с установкой скрубберных систем.

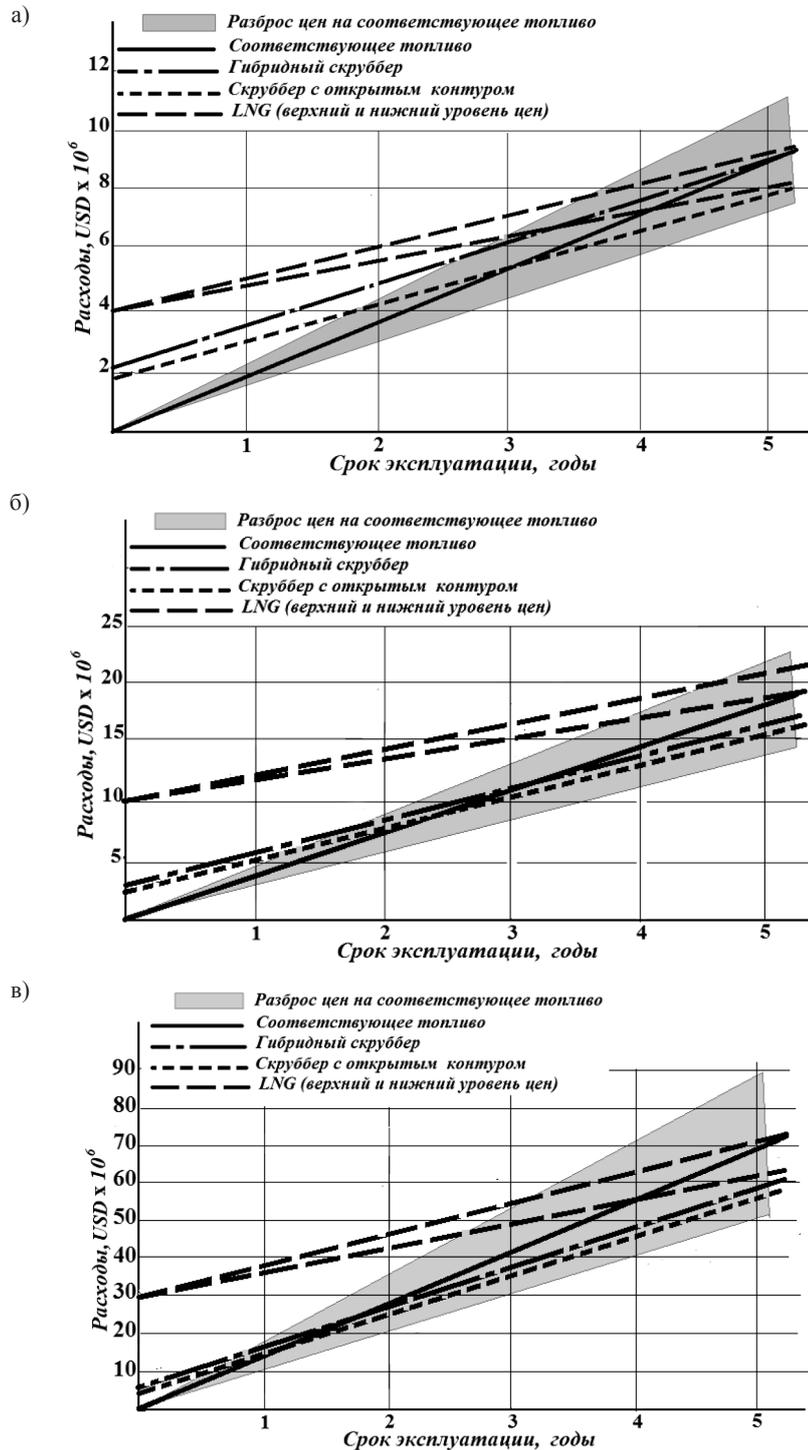


Рис. 2. Совокупные расходы судна с энергетической установкой:
 а — 5 МВт; б — 10 МВт; в — 40 МВт

Типичными судами, мощность энергетической установки которых составляет 40 МВт (см. рис. 2, в), являются контейнерные и круизные суда. Для таких судов время окупаемости установки скрубберов разомкнутого контура составляет чуть больше года, а гибридного — около двух. Время окупаемости перехода на LNG в качестве топлива может составлять приблизительно от четырех и более лет (в зависимости от разброса цен на газовое и совместимое топливо).

Следует отметить, что при выборе решения соответствия между контейнерными и пассажирскими судами могут быть существенные различия. С одной стороны, большая часть расхода топлива судами-контейнеровозами происходит вдали от районов с потенциальными ограничениями в работе скрубберов и это обстоятельство делает скрубберы с открытым контуром лучшим решением ввиду их относительно низкой стоимости и простоты эксплуатации. С другой стороны, круизные суда могут осуществлять плавание в зонах SECA или вблизи прибрежных районов, где часто введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера. В этом случае инвестирование в LNG может быть наиболее подходящим решением, учитывая долгосрочную перспективу.

В целом время окупаемости вариантов соответствия для каждого судна будет зависеть не только от мощности энергетической установки, но и от необходимой массы топлива на борту, поскольку объем топливных танков — один из наиболее важных элементов затрат при переводе судовой энергетической установки на LNG в качестве топлива. Фактический рабочий профиль каждого судна, включая время, проведенное в зонах SECA или в областях с ограничениями на слив скрубберной воды, также окажет влияние на выбор способа соответствия.

Важность стоимости топлива становится очевидной, если проанализировать распределение затрат по основным категориям, представленное на рис. 3. Неопределенность цен на топливо может сыграть важную роль в результатах каждого решения. Для крупных судов с высоким потреблением топлива инвестирование в скруббер может быть выгодным даже при низких уровнях цен на совместимое низкосернистое топливо. Напротив, для небольших судов может быть более привлекательным решением использования LNG в случае принятия во внимание долгосрочных перспектив. Кроме того, оптимальное решение в выборе способа соответствия будет зависеть не только от времени окупаемости, но и от других факторов, таких как выбросы парниковых газов, экологическая безопасность энергетической установки и долгосрочный потенциал формирования суммарных затрат на эксплуатацию судна.

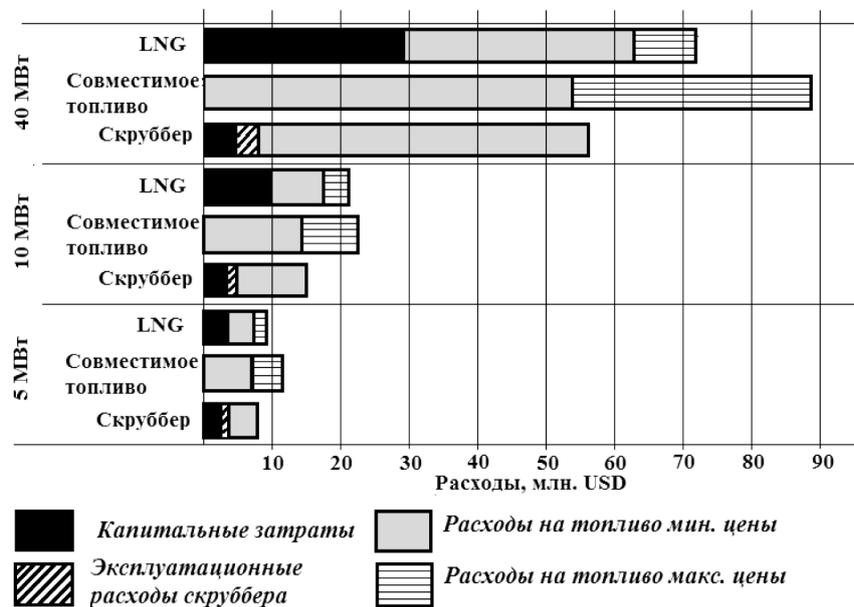


Рис. 3. Накопленные расходы в течение пяти лет с учетной ставкой 6 %

Ранее изложенное находит свое отражение в современных реалиях. В целях достижения соответствия требованиям по глобальному ограничению серы в используемом топливе на уровне 0,50 % судовладельцы вынуждены предпринимать определенные действия по готовности к 2020 г. Например, по данным DNV GL по состоянию на август 2018 г. более 1200 судов либо устанавливали, либо заказывали скрубберы, которые должны быть установлены к 2020 г. Тенденции динамики роста количества судов со скрубберными системами показано на рис. 4. Более

половины этих заказов были размещены весной/летом 2018 г. Ожидается, что еще некоторое количество судов будут оборудоваться скрубберными системами в ближайшее время, но вопрос в том, когда эти системы будут установлены, остается открытым, поскольку многие производители и поставщики датчиков и анализаторов выбросов уже работают в полную силу. В любом случае ожидается, что к 2020 г. скрубберы будут установлены, как минимум, на 2000 судах, а остальная часть флота будет ориентироваться на соответствующее топливо. Таким образом, промышленность, в том числе банки, финансовые учреждения, фрахтователи и судовладельцы, готовы инвестировать средства в установку скрубберных систем в обмен на потенциальную выгоду от ожидаемой экономии на стоимости топлива [13].

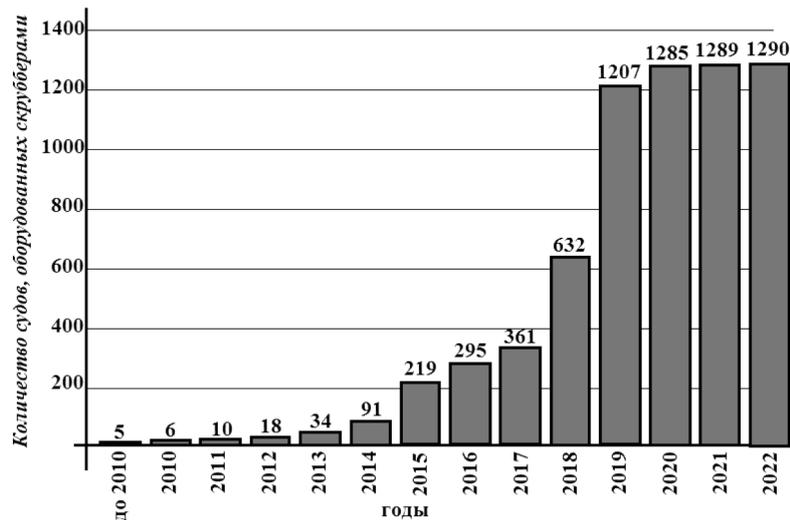


Рис. 4. Совокупное количество судов со скрубберами (установленными или заказанными) по данным DNV GL

Необходимо отметить, что до начала 2018 г. большинство скрубберов были установлены или заказаны для круизных и пассажирских судов, работающих в зонах контроля SECA. До 50 % этих систем были замкнутыми или гибридными конструкциями, чтобы обеспечить работу в ограниченных зонах, таких как определенные порты в Северной Америке.

Как показано на рис. 5, навалочные суда (балкеры), танкеры и контейнеровозы представляют собой три сегмента с наибольшим количеством скрубберов.

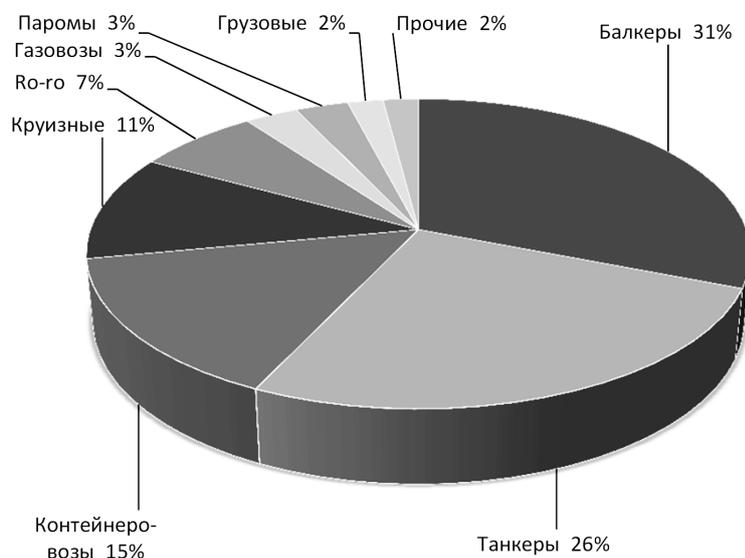


Рис. 5. Доля различных типов судов в заказах скруббера

Системы с разомкнутым контуром, безусловно, являются наиболее популярными в настоящее время благодаря их относительной простоте, особенно для дооснащения существующих судов, как показано на рис. 6, по данным DNV GL.

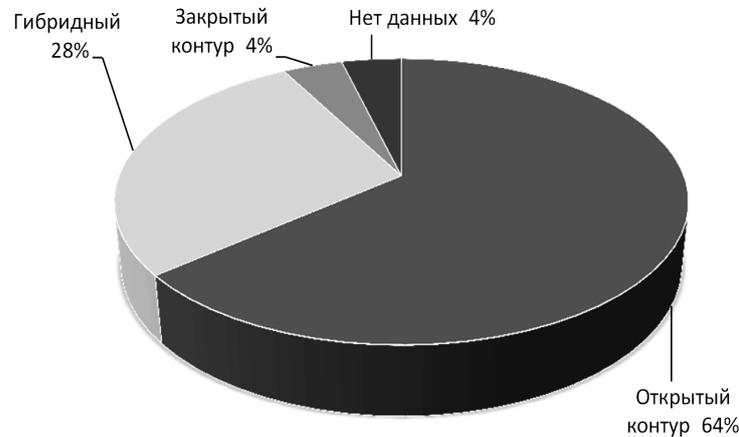


Рис. 6. Распределение типов скрубберных систем для проектируемых и модернизируемых судов

Количество судов, использующих LNG в качестве топлива, увеличивается, как показано на рис. 7, и все большее количество инфраструктурных проектов планируются или предлагаются вдоль основных судоходных путей, поскольку природный газ коммерчески привлекателен и доступен во всем мире в количествах, способных удовлетворить спрос на топливо в ближайшие десятилетия.

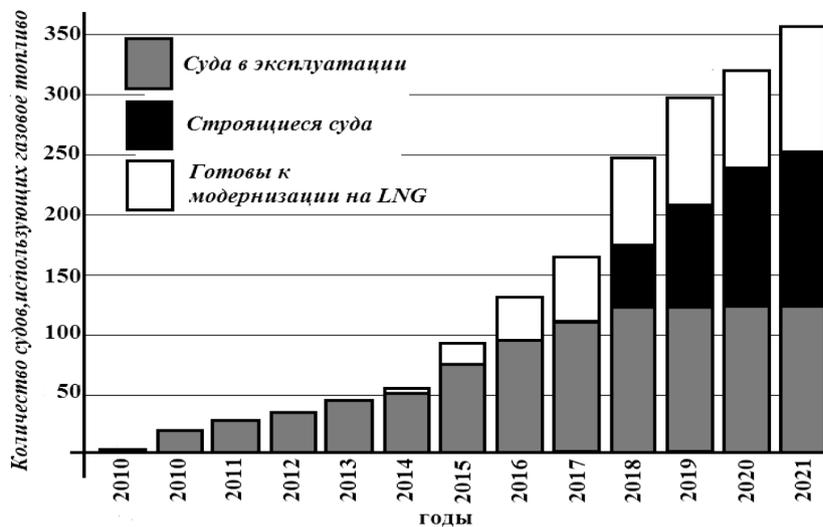


Рис. 7. Динамика роста количества судов, использующих газообразное топливо

Ожидается, что число судов различного типа, использующих LNG в качестве топлива (рис. 8), будет увеличиваться особенно интенсивно в североамериканских и северных европейских водах в соответствии с существующими или предстоящими требованиями к NO_x . Можно предполагать, что потенциальное увеличение цен на совместимое топливо относительно газообразного топлива побудит многих судовладельцев инвестировать в LNG. Альтернативные виды топлива, такие как метанол и биотопливо, смогут обслуживать небольшую долю рынка в краткосрочной перспективе [14], став альтернативой в некоторых местных районах, где предложение соответ-

ствует схемам торговли для судов. В будущем водород в качестве топлива с технологией топливных элементов в сочетании с батареями является новой альтернативой, особенно для малых судов, работающих на фиксированных маршрутах с обеспеченным энергоснабжением.

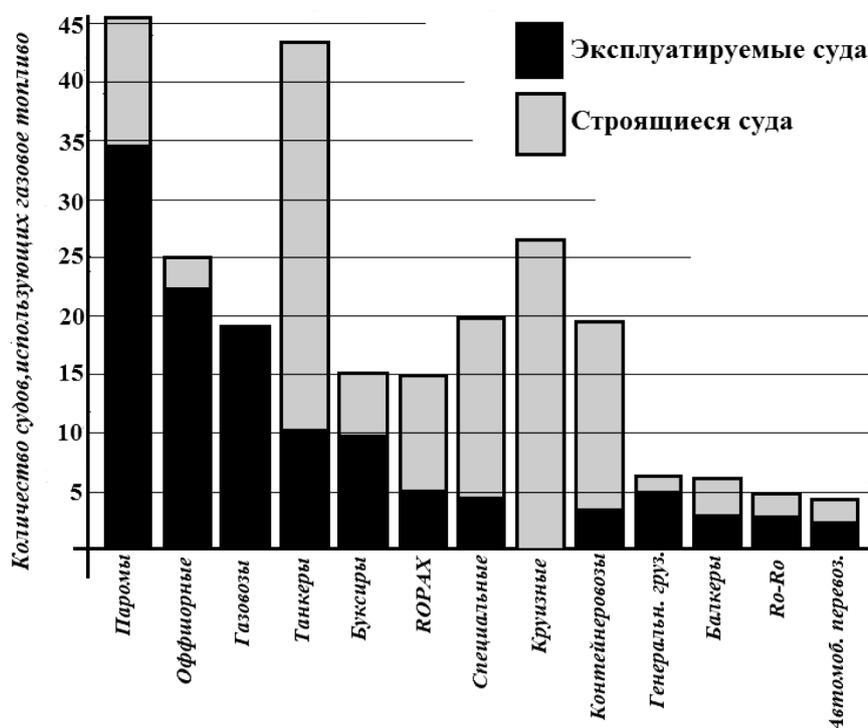


Рис. 8. Количество некоторых типов судов, работающих на LNG

Заключение (Conclusion)

При выборе способа соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии серы в основном операторы судов сталкиваются с альтернативой выбора между использованием соответствующих видов топлива с содержанием серы менее 0,5 %, установкой скрубберной системы и продолжением использования высокосернистых тяжелых топлив или перевода энергетической установки на сжиженный природный газ [15].

Проведенный анализ эффективности различных способов соответствия судовых энергетических установок новым требованиям, демонстрируя главные тенденции, тем не менее не может претендовать на универсальность. Результаты анализа находятся в тесной зависимости от перспектив формирования рыночных цен на различные виды топлив и дальнейшего ужесточения экологических требований к вредным выбросам с отработавшими газами, предъявляемых к энергетическим установкам судов, точное прогнозирование которых не представляется возможным. В этой связи предпочтение выбора может, в некоторой мере, быть трансформировано с учетом возможной динамики этих факторов.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о следующем.

1. Выбор оптимального решения по вопросу соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии серы с 2020 г. в каждом конкретном случае связан с разносторонним рассмотрением многофакторных аспектов проблемы и должен производиться с учетом влияния на другие параметры экологической безопасности судовых энергетических установок, среди которых выбросы парниковых газов и NO_x .

2. Скрубберные системы с разомкнутым контуром, безусловно, являются наиболее популярными в настоящее время благодаря их относительной простоте и сравнительно низкой стоимости, особенно для дооснащения существующих судов. Однако применимость этих систем не распространяется на районы, в которых введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера.

В таких случаях может потребоваться установка гибридного скруббера, что существенно увеличит затраты на модернизацию судна и эксплуатационные расходы.

3. Целесообразность того или иного варианта способа соответствия существенно зависит от типа и размеров судна. Так, срок окупаемости скрубберных систем сокращается с увеличением мощности судовой энергетической установки, поэтому установка скруббера представляется наиболее целесообразной для крупных судов с высоким расходом топлива. В то же время при выборе способа соответствия для небольших судов перевод на LNG может быть более привлекательным решением, чем установка скрубберных систем.

4. Для судов, которые могут осуществлять плавание в зонах SECA или вблизи прибрежных районов, где часто введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера, инвестирование в LNG может быть более подходящим решением, учитывая долгосрочную перспективу. Одновременно необходимо принимать во внимание возможность того, что в 2020 г. HSFO не будет легкодоступным во всех портах, что может сказаться на окупаемости проекта модернизации некоторых судов с установкой скрубберных систем.

5. Можно предположить, что потенциальное увеличение цен на совместимое топливо относительно газообразного топлива заставит многих судовладельцев инвестировать в LNG. Эта возможность вызывает постоянное увеличение количества судов, использующих LNG в качестве топлива.

6. Альтернативные виды топлива, такие как метанол и биотопливо, смогут обслуживать большую долю рынка в краткосрочной перспективе, а водород в качестве топлива с технологией топливных элементов в сочетании с батареями является новым альтернативным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

2. Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

3. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

4. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2008. — № 1. — С. 28–33.

5. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 3. — С. 27–32.

6. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же — 2008. — № 4. — С. 20–29.

7. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 5. — С. 26–33.

8. Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 ‘Global Sulphur Cap’ for Ships’ Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI. — London: Marisec Publications, 2019. — 36 p.

9. Семанов Г. Н. Вредные выбросы в атмосферу от судов: на пути к стандартам ИМО / Г. Н. Семанов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 45–47.

10. Латухов С. В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.

11. SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences. — Delft: CE Delft, 2016. — 45 p.

12. Panasiuk I. The assessment algorithm of technological feasibility of SO_x scrubber installation / I. Panasiuk, S. Lebedevas, J. Čerka // *Transport*. — 2018. — Vol. 33. — No. 1. — Pp. 197–207. DOI: 10.3846/16484142.2016.1152298.

13. Solakivi T. How shipowners have adapted to sulphur regulations—Evidence from Finnish seaborne trade / T. Solakivi, S. Laari, T. Kiiski, J. Töyli, L. Ojala // *Case Studies on Transport Policy*. — 2019. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 338–345. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.010.

14. Van T. C. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T. C. Van, J. Ramirez, T. Rainey, Z. Ristovski, R. J. Brown // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2019. — Vol. 70. — Pp. 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.

15. Латухов С.В. Технологии обеспечения экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]; под ред. д-ра географ. наук, проф. С. В. Латухова. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2019. — 156 с.

REFERENCES

1. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

2. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

3. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

4. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov.” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 1 (2008): 28–33.

5. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody, osnovanye na okislenii sery i posleduyushchem opredelenii oksidov) (Prodolzhenie. Nachalo stat’i v №1, 2008).” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 3 (2008): 27–32.

6. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody poopredeleniyu sery v nefteproduktakh pri pomoshchi rentgenovskogo izlucheniya) (Prodolzhenie. Nachalo v № 1, 2008g).” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 4 (2008): 20–29.

7. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody atomnoemissionnoi spektrometrii s induktivno svyazannoi plazmoi (AES-ISP).” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 5 (2008): 26–33.

8. *Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 ‘Global Sulphur Cap’ for Ships’ Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI*. London: Marisec Publications, 2019.

9. Semanov, G. N. “Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO.” *Nauka i transport. Morskoi i rechnoi transport* 1(5) (2013): 45–47.

10. Latukhov, S. V., V. A. Nikitin, V. N. Okunev, et al. *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva: monografiya*. SPb: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015.

11. *SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences*. Delft: CE Delft, 2016.

12. Panasiuk, Irina, Sergejus Lebedevas, and Jonas Čerka. “The assessment algorithm of technological feasibility of SO_x scrubber installation.” *Transport* 33.1 (2018): 197–207. DOI: 10.3846/16484142.2016.1152298

13. Solakivi, Tomi, Sini Laari, Tuomas Kiiski, Juuso Töyli, and Lauri Ojala. “How shipowners have adapted to sulphur regulations—Evidence from Finnish seaborne trade.” *Case Studies on Transport Policy* 7.2 (2019): 338–345. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.010

14. Van, Thuy Chu, Jerome Ramirez, Thomas Rainey, Zoran Ristovski, and Richard J. Brown. “Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 70 (2019): 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001

15. Latukhov, S. V., O. V. Solyakov, V. A. Nikitin, V. N. Okunev, S. V. Titov, V. V. Yakunchikov, I. M. Dantsevich, A. A. Romanenko, and N. V. Pershin. *Ecological safety technologies for shipping: monograph*. Edited by S. V. Latukhov. SPb.: MANEB Publishing House, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru,
kaf_dvs@gumrf.ru

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru,
kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru,
kaf_dvs@gumrf.ru

Petrov, Aleksandr P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru,
kaf_dvs@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 3 июля 2019 г.
Received: July 3, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-745-754

HEAT TRANSFER IN THE COOLING SYSTEMS OF SHIP ENGINES WHEN CIRCULATING THE COOLANT CONTAINING MULTIGRAPHENE NANOPARTICLES WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY

A. V. Zharov¹, R. V. Gorshkov¹, N. G. Savinski²

¹ — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

² — Valiev IPT RAS, Yaroslavl branch, Yaroslavl, Russian Federation

For heat transfer intensification in the cooling systems of forced and perspective ship internal combustion engines, the coolants with an increased thermal conductivity are created, which are stable two-phase suspensions based on an aqueous solute of ethylene glycol and solid multigraphene nanoparticles with a high thermal conductivity. Numerical and experimental studies of heat transfer from the heated wall of the test section to nanofluids in the range of mass concentrations of multigraphene particles from 0.2 to 0.75 percent are carried out, which corresponds to the thermal conductivity coefficients from 0,715 to 0,85 W / m·K. The developed experimental facility operating under stationary heat exchange conditions is used to measure the temperature of fluid and the section metal wall at the constant values of such parameters that are found in the engine cooling systems: the heated wall washing circuit, design features of the cooling cavity, artificial turbulization of the fluid flow, etc. The heat transfer coefficients from the heated wall to the base fluid and to the two-phase coolant with its increased thermal conductivity coefficient are compared under identical operation conditions of the test: the coolant temperature is 80 degrees Celsius and its speed of 0,4...1,2 m /s.

The influence of the increased thermal conductivity of coolants with multigraphene particles on heat transfer is established. At the same speed of the coolant with an increase in the thermal conductivity of nanofluid from 0,715 to 0,85 W / m·K, the heat transfer coefficient increases by 22 percent. The presence of multigraphene nanoparticles in a suspension with a thermal conductivity of 0.85 W / m·K results to increase in of heat transfer intensity by 30 percent compared with the base fluid. The obtained experimental results are processed in the similarity numbers, which made it possible to obtain the criterial equation for heat transfer under forced convection and the turbulent flow regime of “liquid-solid particles” suspensions. This equation can be the basis for calculating heat transfer in the cooling systems of internal combustion engines when using such two-phase coolants with an increased thermal conductivity. The task of increasing the heat exchange intensity at the boundary between the wall and coolant is relevant both to increase the forced marine diesel engines reliability and to improve the thermal and hydraulic efficiency of heat exchangers associated with the cooling circuit of marine engines.

Keywords: cooling system, internal combustion engine, heat transfer intensification, cooling nanofluid, multigraphene nanoparticles, experimental setup, heat transfer coefficient, criterial equation.

For citation:

Zharov, Aleksandr V., Roman V. Gorshkov, and Nikolaj G. Savinski. “Heat transfer in the cooling systems of ship engines when circulating the coolant containing multigraphene nanoparticles with high thermal conductivity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 745–754. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-745-754.

УДК 621.4:620.3

ТЕПЛОТДАЧА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ МУЛЬТИГРАФЕНА

А. В. Жаров¹, Р. В. Горшков¹, Н. Г. Савинский²

¹ — Ярославский государственный технический университет,
Ярославль, Российская Федерация

² — Ярославский филиал ФТИАН РАН, Ярославль, Российская Федерация

Для интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения форсированных и перспективных судовых двигателей внутреннего сгорания были созданы теплоносители с увеличенным коэффициентом

теплопроводности, представляющие собой устойчивые стабильные двухфазные суспензии на основе водного раствора этиленгликоля и твердых наночастиц мультиграфена с высоким коэффициентом теплопроводности. Проведены численные и экспериментальные исследования теплоотдачи от нагретой стенки испытательной секции к наножидкостям в диапазоне массовых концентраций частиц мультиграфена 0,2–0,75 %, что соответствует коэффициентам теплопроводности 0,715–0,85 Вт/м·К. На разработанной экспериментальной установке, функционирующей в условиях стационарного режима теплообмена, проводились измерения температуры жидкости и металлической стенки секции при неизменных значениях следующих параметров, которые имеют место в системах охлаждения двигателей: схема омывания нагретой стенки, конструктивные особенности полости охлаждения, искусственная турбулизация потока жидкости и др. Коэффициенты теплоотдачи от нагретой стенки к базовой жидкости и двухфазному теплоносителю при его повышенном коэффициенте теплопроводности сравнивались между собой при одинаковых режимных условиях испытания: температуре теплоносителя 80 °С и скорости его движения 0,4–1,2 м/с. Установлено влияние на теплоотдачу повышенного коэффициента теплопроводности теплоносителей с частицами мультиграфена. При одной и той же скорости движения теплоносителя с увеличением коэффициента теплопроводности наножидкости от 0,715 Вт/м·К до 0,85 Вт/м·К коэффициент теплоотдачи увеличился на 22 %. Наличие наночастиц мультиграфена в суспензии, имеющей коэффициент теплопроводности 0,85 Вт/м·К, привело к увеличению интенсивности теплоотдачи на 30 % по сравнению с базовой жидкостью. Полученные экспериментальные результаты были обработаны в числах подобия, что позволило получить критериальное уравнение для теплоотдачи при вынужденной конвекции и турбулентном режиме течения суспензий жидкость – твердые частицы. Это уравнение может служить основой для расчета теплообмена в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания при применении таких двухфазных теплоносителей с увеличенным коэффициентом теплопроводности. Задача повышения интенсивности теплообмена на границе «стенка – теплоноситель» актуальна как для повышения надежности форсированных судовых дизелей, так и для совершенствования теплогидравлической эффективности теплообменных аппаратов, связанных с контуром систем охлаждения судовых двигателей.

Ключевые слова: система охлаждения, двигатель внутреннего сгорания, интенсификация теплоотдачи, охлаждающая наножидкость, наночастицы мультиграфена, экспериментальная установка, коэффициент теплоотдачи, критериальное уравнение.

Для цитирования:

Жаров А. В. Теплоотдача в системах охлаждения судовых двигателей при циркуляции теплоносителя, содержащего высокотеплопроводные наночастицы мультиграфена / А. В. Жаров, Р. В. Горшков, Н. Г. Савинский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 745–754. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-745-754.

Введение (Introductoin)

Одной из главных современных тенденций развития судовых дизелей является непрерывное увеличение их удельной и агрегатной мощности наряду с повышением надежности. Для высокооборотных форсированных судовых двигателей характерны высокие значения среднего эффективного давления $p_e = 2,5 \dots 3$ МПа, а перспективные дизели могут иметь $p_e = 3,5 \dots 4$ МПа [1]. При таких значениях среднего эффективного давления существенно увеличатся тепловые потоки через стенки деталей камеры сгорания, и вместе с тем существенно возрастут также температуры теплонагруженных деталей цилиндропоршневой группы. Для обеспечения работоспособности таких дизелей и снижения максимальных температур деталей, ограничивающих камеру сгорания, необходимо повышать интенсивность процессов теплоотдачи в их системах охлаждения (СО). Одним из перспективных путей повышения интенсивности теплоотдачи в СО является совершенствование физических свойств теплоносителей судовых двигателей [2].

Известно, что коэффициент теплопроводности λ охлаждающей жидкости (ОЖ) оказывает существенное влияние на коэффициент теплоотдачи на границе *стенка – теплоноситель* в режиме вынужденной конвекции. С развитием в последнее время нанотехнологий появилась возможность увеличения коэффициента теплопроводности λ ОЖ, что позволило создать теплоносители с увеличенным коэффициентом теплопроводности, представляющие собой устойчивые стабильные двухфазные суспензии на основе водного раствора этиленгликоля (ВЭГ) и твердых с высоким коэффициентом теплопроводности наночастиц мультиграфена (МГ) [3].

Интенсивность теплоотдачи для наножидкости при ее коэффициенте теплопроводности 0,85 Вт/м·К и вязкости 0,8 мПа·с (массовая концентрация МГ $\varphi_m = 0,75\%$), согласно комплексу $K_{\text{ОЖ}}$ (уравнение (1)), увеличивается более, чем на 10 % по сравнению с ВЭГ при одинаковых конструктивных и режимных параметрах системы охлаждения двигателя:

$$K_{\text{ОЖ}} = \frac{\lambda^{0,57} \cdot \rho^{0,8} \cdot C_p^{0,43}}{\eta^{0,37}}, \quad (1)$$

где λ — теплопроводность теплоносителя, Вт/(м·К); ρ — плотность теплоносителя, кг/м³; η — коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с; C_p — удельная массовая теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К).

Известно, что теплоотдача от стенки к двухфазным потокам отличается от теплоотдачи к однофазным потокам за счет влияния твердых высокотеплопроводных наночастиц мультиграфена в пограничном слое [4]. Поэтому для того чтобы оценить увеличение коэффициента конвективного теплообмена при двухфазном теплоносителе (жидкость – твердые наночастицы МГ) по сравнению с базовой жидкостью необходимы его экспериментальные исследования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Коэффициент теплоотдачи как для двухфазного, так и для базового теплоносителя наиболее информативно и надежно можно определить на разработанной экспериментальной установке (рис. 1), испытательная секция которой представляет собой горизонтально расположенную гладкую стальную цилиндрическую трубу длиной 1200 мм и диаметром 21 мм [5]. К наружной стенке секции электронагревателем подводится постоянный тепловой поток 1500 Вт. Внутри этой трубы, выполненной из коррозионно-стойкой стали, движется испытуемый теплоноситель.

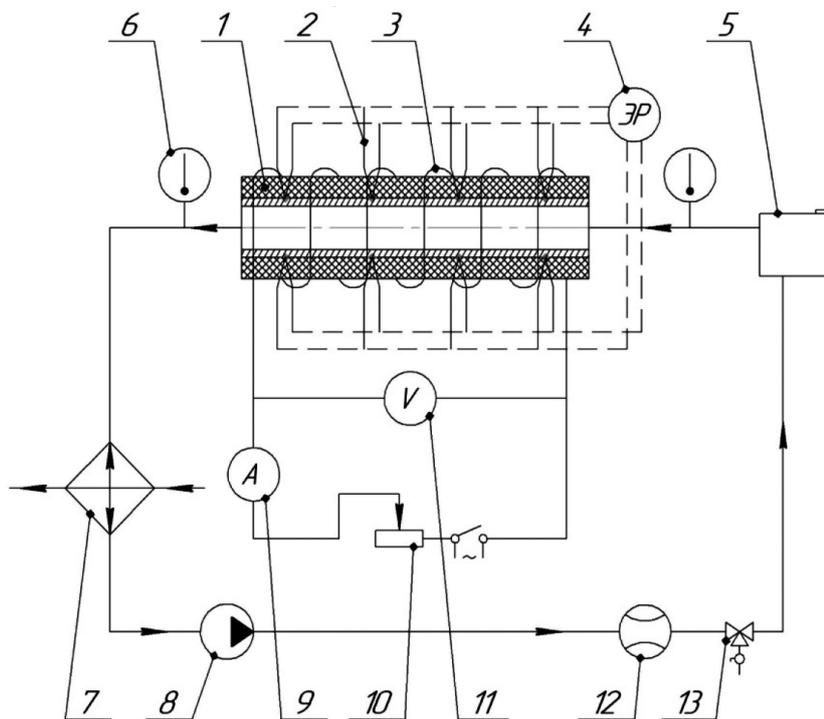


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с горизонтальной трубой

Условные обозначения:

- 1 — испытательная секция; 2 — термопары; 3 — нагревательная нихромовая спираль;
- 4 — электронный регистратор; 5 — расширительный бак; 6 — ртутные термометры;
- 7 — теплообменный аппарат; 8 — циркуляционный насос с электродвигателем;
- 9 — амперметр; 10 — реостат; 11 — вольтметр; 12 — расходомер;
- 13 — клапан со сливным краном

По длине трубы на ее внутренней стенке установлены хромель-копелевые термомпары с нормирующим преобразователем, обеспечивающим точность до 0,1 °С. Значения силы тока и напряжения электронагревателя контролируются встроенными в него амперметром и вольтметром, что позволяет обеспечить подвод требуемого теплового потока величиной 1500 Вт через стенку трубы к теплоносителю. Контроль количества теплоты, поступившей к охлаждающе жидкости, осуществляется с использованием двух ртутных термометров точностью 0,1 °С, установленных на входе потока ОЖ в испытательную секцию и выходе из нее. Скорость циркуляции жидкости в контуре изменяется за счет регулирования ее расхода с помощью циркуляционного насоса центробежного типа.

Расход теплоносителя контролируется расходомером, имеющим предел допускаемой относительной погрешности $\pm 1\%$. Рассеивание поступившей в ОЖ теплоты осуществляется на выходе из секции за счет теплообменника типа *жидкость – жидкость*. После наступления установившегося стационарного режима теплообмена, который контролируется постоянством температур стенки и жидкости в течение не менее 30 мин при выбранной скорости движения теплоносителя, определяется средний по поверхности теплообмена коэффициент теплоотдачи по уравнению из источника [6]:

$$\alpha = \frac{G_m C_p (t_f'' - t_f')}{F (\bar{t}_w - \bar{t}_f)}, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); G_m — массовый расход ОЖ, кг/с; C_p — удельная массовая теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); t_f' и t_f'' — температуры ОЖ на входе в испытательную секцию и выходе из нее соответственно, °С; \bar{t}_w и \bar{t}_f — средние температуры поверхности теплообмена (стенки) и жидкости соответственно, °С; F — площадь теплоотдающей поверхности, м².

Экспериментальная установка позволяет измерять температуры жидкости и металлической стенки при неизменных значениях параметров, которые имеют место в системах охлаждения двигателей: схемы омывания нагретой стенки, конструктивных особенностей полости охлаждения, искусственной турбулизации потока жидкости и др. Коэффициенты теплоотдачи от нагретой стенки к базовой ОЖ и двухфазному теплоносителю при повышенном его коэффициенте теплопроводности необходимо сравнить между собой при одинаковых режимных условиях испытания: температуре теплоносителя 80 °С и скорости его движения 0,4 ... 1,2 м/с.

Измерения указанных параметров позволили определить коэффициент теплоотдачи для базовой жидкости при разной скорости ее движения по уравнению (2). Следует отметить, что при каждом установившемся режиме все измерения температуры повторялись не менее семи раз, полученные значения коэффициента теплоотдачи усреднялись по поверхности стенки трубы, а опытные точки имели разброс, не превышающий $\pm 5\%$. Обработка полученных результатов в числах подобия позволила определить для ВЭГ значения коэффициента C и степеней m , n критериального уравнения (3), характеризующего процесс конвективного теплообмена при турбулентном режиме течения ОЖ в различных каналах [6]. В результате графического построения, согласно уравнению (3), были определены следующие значения: коэффициента $C = 0,021$ и степеней $m = 0,8$ и $n = 0,4$, что соответствует уравнению (4):

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n. \quad (3)$$

Сопоставление экспериментальных данных по α для ВЭГ с результатами расчета по уравнению (4) показало их соответствие этому уравнению (рис. 2):

$$\text{Nu}_f = 0,021 \text{Re}_f^{0,8} \text{Pr}_f^{0,43}. \quad (4)$$

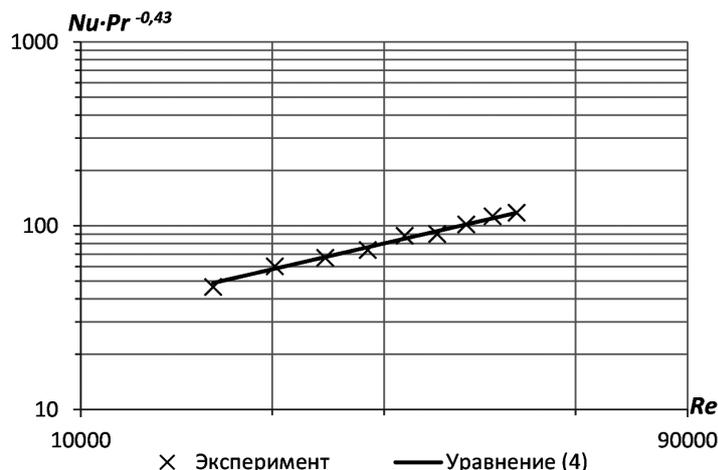


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений для ВЭГ с эмпирическим уравнением (4)

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Согласно вычислениям, выполненным по уравнению (4), коэффициент теплоотдачи при циркуляции наножидкости увеличился на 10 % по сравнению с базовой жидкостью в исследуемом диапазоне скоростей (рис. 3).

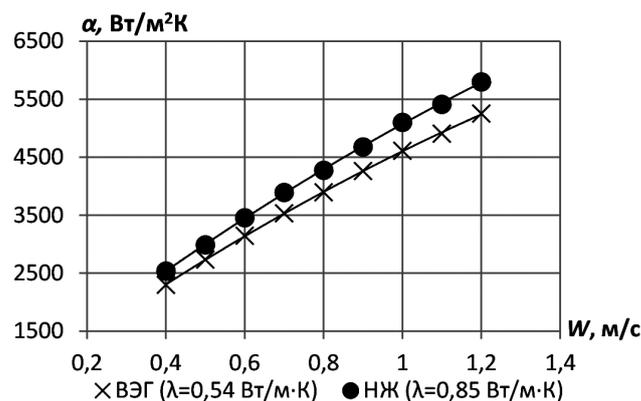


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи в зависимости от скорости наножидкости и ВЭГ по уравнению (4)

При этом необходимо отметить, что наблюдается значительное влияние наличия в наножидкости высокотеплопроводных твердых частиц на коэффициент теплоотдачи [4], [7]. В связи с ранее изложенным, необходимы экспериментальные исследования теплоотдачи от стенки испытательной секции к движущимся со скоростями 0,4 ... 1,2 м/с двухфазным суспензиям на экспериментальной установке при коэффициентах теплопроводности 0,715 ... 0,85 Вт/м·К. Результаты экспериментов показали, что изменение скорости движения указанных теплоносителей 0,4 ... 1,2 м/с привело к увеличению коэффициента теплоотдачи в 2,4 раза (рис. 4).

При одинаковой скорости движения ОЖ с увеличением коэффициента теплопроводности наножидкости 0,715 ... 0,85 Вт/м·К коэффициент теплоотдачи увеличился на 22 %. Наличие наночастиц мультиграфена в суспензии (при $\lambda = 0,85$ Вт/м·К) привело к увеличению интенсивности теплоотдачи на 30 % по сравнению с ВЭГ, что может быть обусловлено указанными далее факторами. Возможно, это связано с уменьшением термического сопротивления пограничного слоя за счет увеличения его коэффициента теплопроводности частицами мультиграфена [8]–[10]. Данное обстоятельство можно объяснить также частыми столкновениями высокотеплопроводных

твердых частиц МГ со стенкой трубы, которые возмущают при этом пограничный слой, что может способствовать ускоренному переносу энергии от горячей стенки в ядро потока [11], [12].

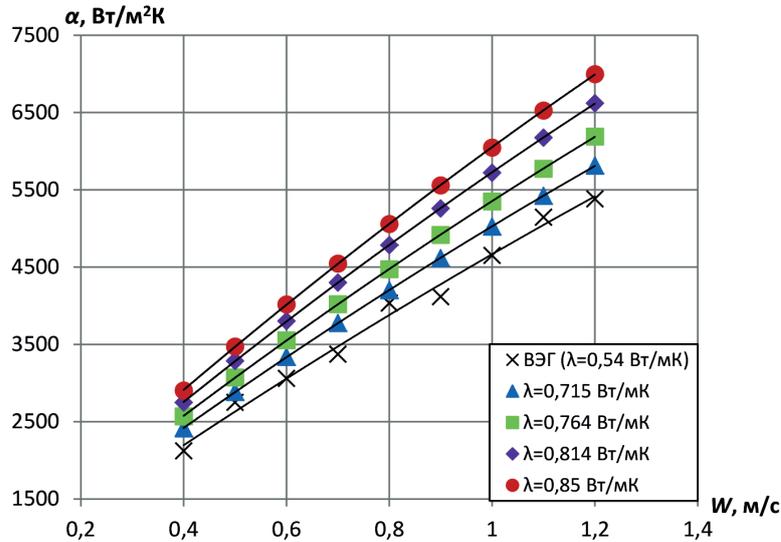


Рис. 4. Влияние скорости движения наножидкостей в трубе на коэффициент теплоотдачи

На рис. 5 приведены изображения этих частиц мультиграфена в суспензии, представляющие собой плоские двумерные наночастицы, состоящие из пяти–семи слоев графена с коэффициентом теплопроводности 3000–5000 Вт/м·К, полученные на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Zeiss «Supra-40» с рентгеновским энергодисперсионным анализатором INCA «Energy Oxford Instruments».

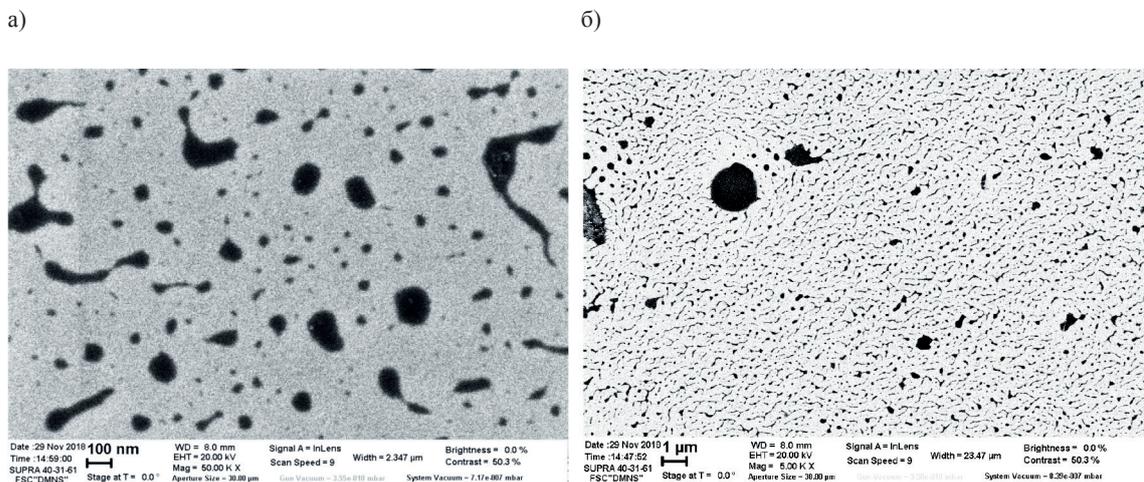


Рис. 5. Вид частиц мультиграфена из дисперсии в водном растворе этиленгликоля после 48 ч ультразвуковой обработки, полученные на подложке оксида кремния:

a — в наномасштабе; *b* — в микромасштабе

Полученные экспериментальные результаты были обработаны в числах подобия: определены числа *C* и степени *m* и *n* согласно уравнению (3). По этим результатам было установлено, что *m* = 0,8 и *n* = 0,43 для всех образцов охлаждающих наножидкостей (рис. 6). Что касается коэффициента *C*, который вычислялся по формуле $C = Nu / (Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43})$, то он зависит от величины ее коэффициента теплопроводности:

$$C = 0,03\lambda^{1,26}. \quad (5)$$

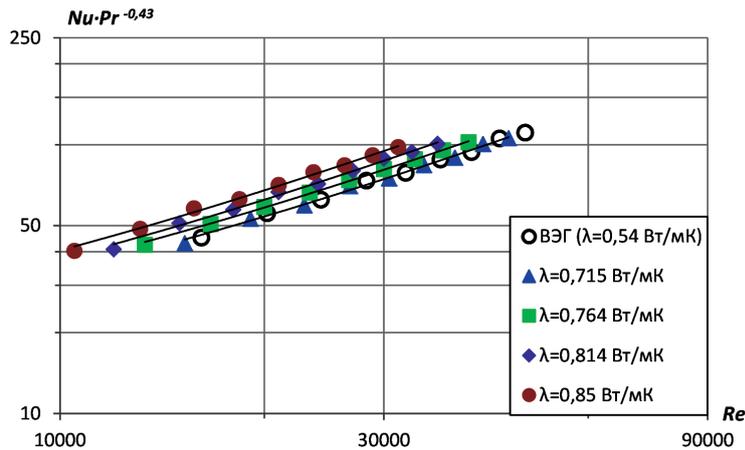


Рис. 6. Теплоотдача от охлаждаемой стенки трубы к наножидкостям с мультиграфеном

Обобщение экспериментальных данных, согласно рис. 6 и уравнению (5) по теплоотдаче от нагретой стенки к исследованным образцам наножидкостей в зависимости от их теплопроводности, описывается уравнением (6). Оно основано на аппроксимации экспериментальных данных рис. 6 по методу наименьших квадратов с величиной коэффициента достоверности не ниже $R^2 = 0,98$:

$$Nu_f = 0,03\lambda^{1,26}Re_f^{0,8}Pr_f^{0,43}, \quad (6)$$

Данное уравнение справедливо в диапазоне коэффициента теплопроводности наножидкости $\lambda = 0,715 \dots 0,85$ Вт/м·К, чисел Рейнольдса $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$ и при температуре $t = 80$ °С (рис. 7). Максимальное отклонение значений по уравнению (6) от экспериментальных данных составляет 2 %.

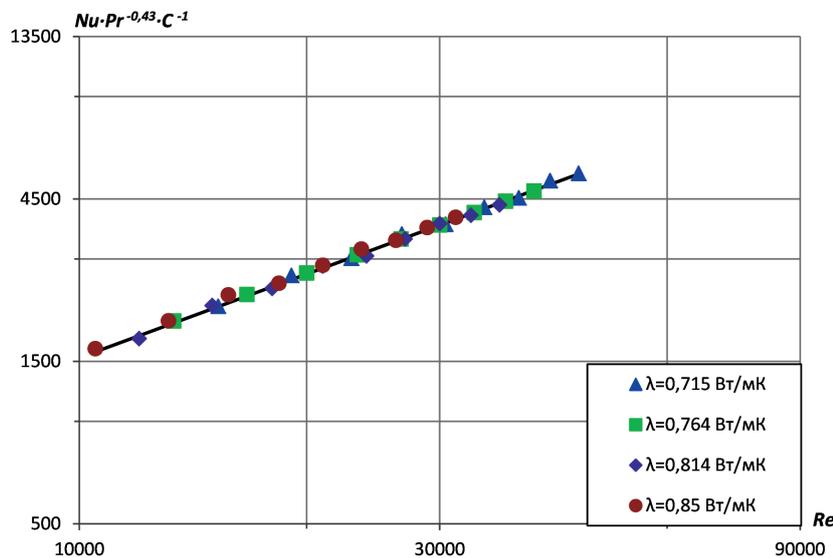


Рис. 7. Средняя по поверхности стенки теплоотдача при турбулентном режиме течения наножидкостей с мультиграфеном в цилиндрической трубе

Полученное критериальное уравнение для теплоотдачи при турбулентном режиме течения охлаждающей жидкости может быть основой для расчета теплообмена в системах охлаждения судовых дизелей при применении двухфазных теплоносителей с увеличенным их коэффициентом теплопроводности, однако при этом необходимо учесть конструктивные особенности систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания.

Следует отметить, что это критериальное уравнение позволяет рассчитать увеличение интенсивности теплоотдачи в таких теплообменных аппаратах судовых дизелей, как охладители моторного масла и наддувочного воздуха, а также радиатора охлаждения. Известно, что интенсификация теплоотдачи в указанных аппаратах двигателя приводит к некоторому перераспределению составляющих теплового баланса, что в совокупности с увеличенным коэффициентом теплопередачи в теплообменниках должно привести к некоторому уменьшению площади их теплоотдающих поверхностей:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta \bar{t}}, \quad (7)$$

где Q — тепловой поток, Вт; $\Delta \bar{t}$ — средний температурный напор; k — коэффициент теплопередачи.

При сохранении площади теплоотдающих поверхностей охладителя наддувочного воздуха возможно увеличить глубину его охлаждения, что приведет к некоторому увеличению плотности воздуха на впуске [1].

В судовых дизелях важной задачей является повышение тепловой эффективности охладителей масла и ОЖ контура системы охлаждения двигателя за счет интенсификации теплообмена на границе *стенка – теплоноситель*. Увеличение коэффициента теплоотдачи на указанной границе на 30 ... 40 % способно обеспечить повышение коэффициента тепловой эффективности ТА [13]:

$$\eta = \frac{k \Delta \bar{t} F}{W_{\min} \Delta t_{\max}}, \quad (8)$$

где W_{\min} — минимальный тепловой эквивалент; Δt_{\max} — максимальный температурный напор.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В результате экспериментальных исследований особенностей теплообмена с двухфазными суспензиями *жидкость – твердые частицы* установлено влияние на теплоотдачу увеличенного коэффициента теплопроводности теплоносителей с наночастицами мультиграфена. Интенсивность конвективного теплообмена с охлаждающей НЖ при $\lambda = 0,85$ Вт/м·К увеличилась на 30 % по сравнению с ВЭГ, что привело к снижению средней температуры горячей стенки трубы испытательной секции. Задача повышения интенсивности теплообмена на границе *стенка – теплоноситель* актуальна как для повышения надежности форсированных судовых дизелей, так и для совершенствования теплогидравлической эффективности теплообменных аппаратов, связанных с контуром систем охлаждения судовых двигателей [13].

2. Полученное критериальное уравнение для теплоотдачи при турбулентном режиме течения жидкости может быть основой для расчета теплообмена в системах охлаждения судовых дизелей при применении двухфазных теплоносителей с увеличенным коэффициентом теплопроводности, а для уточнения влияния на теплообмен конструктивных особенностей системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания необходима оценка уменьшения температур стенки гильзы цилиндра при применении в качестве теплоносителя охлаждающей наножидкости с высокотеплопроводными наночастицами мультиграфена по отношению к базовой жидкости.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В. А. Научные основы повышения эксплуатационных показателей высокооборотных судовых ДВС совершенствованием их охлаждения: дис. ... д-ра техн. наук; специальность: 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)» / В. А. Жуков. — СПб.: СПбГУВК, 2012. — 422 с.

2. Безюков О. К. Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания: монография / О. К. Безюков. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 272 с.
3. Жаров А. В. Теплоноситель с наночастицами мультиграфена для интенсификации процессов теплообмена в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания / А. В. Жаров, Р. В. Горшков, Н. Г. Савинский // Труды НАМИ. — 2018. — № 4 (275). — С. 48–56.
4. Sadeghinezhad E. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications / E. Sadeghinezhad, M. Mehrli, R. Saidur, M. Mehrli, S. T. Latibari, A. R. Akhiani, H. S. C. Metselaar // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 111. — Pp. 466–487. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.004.
5. Горшков Р. В. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи жидкостей / Р. В. Горшков, А. В. Жаров, А. А. Павлов, В. С. Фавстов // История и перспективы развития транспорта на севере России. — 2015. — Т. 1. — № 1. — С. 116–119.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М: Энергия, 1977. — 344 с.
7. Baby T. T. Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids / T. T. Baby, S. Ramaprabhu // *Nanoscale research letters*. — 2011. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 289. DOI: 10.1186/1556-276X-6-289.
8. Sadeghinezhad E. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions / E. Sadeghinezhad, H. Togun, M. Mehrli, P. S. Nejad, S. T. Latibari, T. Abdulrazzaq, S. N. Kazi, H. S. C. Metselaar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2015. — Vol. 81. — Pp. 41–51. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.006
9. Sadeghinezhad E. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions / E. Sadeghinezhad, M. Mehrli, S. Tahan Latibari, M. Mehrli, S. N. Kazi, C. S. Oon, H. S. C. Metselaar // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. — 2014. — Vol. 53. — Pp. 12455–12465. DOI: 10.1021/ie501947u.
10. Arzani H. K. Toward improved heat transfer performance of annular heat exchangers with water/ethylene glycol-based nanofluids containing graphene nanoplatelets / H. K. Arzani, A. Amiri, H. K. Arzani, S. B. Rozali, S. N. Kazi, A. Badarudin // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 2016. — Vol. 126. — Is. 3. — Pp. 1427–1436. DOI: 10.1007/s10973-016-5663-8.
11. Akhavan-Zanjani H. Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Graphene–Water Nanofluid Flowing Inside a Horizontal Circular Tube / H. Akhavan-Zanjani, M. Saffar-Avval, M. Mansourkiaei, M. Ahadi, F. Sharif // *Journal of Dispersion Science and Technology*. — 2014. — Vol. 35. — Is. 9. — Pp. 1230–1240. DOI: 10.1080/01932691.2013.834423.
12. Mehrli M. Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube / M. Mehrli, E. Sadeghinezhad, M. A. Rosen, A. R. Akhiani, S. T. Latibari, M. Mehrli, H. S. C. Metselaar // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. — 2015. — Vol. 66. — Pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.007.
13. Жуков В. А. Повышение тепло-гидравлической эффективности теплообменных аппаратов двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2010. — № 1. — С. 102–105.

REFERENCES

1. Zhukov, V. A. Nauchnye osnovy povysheniya ekspluatatsionnykh pokazatelei vysokooborotnykh sudovykh DVS sovershenstvovaniem ikh okhlazhdeniya. Dr. diss. SPb.: SPbGUVK, 2012.
2. Bezyukov, O. K. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: monografiya*. SPb.: GUMRF im. admirala S.O. Makarova, 2015.
3. Zharov, A. V., R. V. Gorshkov, and N.G. Savinskiy. “Heat carrier with multigrafen nanoparticles to process heat exchange intensification in internal combustion engines cooling systems.” *Tруды NAMI* 4(275) (2018): 48–56.
4. Sadeghinezhad, Emad, Mohammad Mehrli, R. Saidur, Mehdi Mehrli, Sara Tahan Latibari, Amir Reza Akhiani, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. “A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications.” *Energy Conversion and Management* 111 (2016): 466–487. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.004.
5. Gorshkov, R. V., A. V. Zharov, A. A. Pavlov, and V. S. Favstov. “Eksperimental’noe opredelenie koeffitsienta teplootdachi zhidkostei.” *Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii* 1.1 (2015): 116–119.
6. Mikheev, M. A., and I. M. Mikheeva. *Osnovy teploperedachi*. M: Energiya, 1977.

7. Baby, Tessa Theres, and Sundara Ramaprabhu. “Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids.” *Nanoscale research letters* 6.1 (2011): 289. DOI: 10.1186/1556-276X-6-289.
8. Sadeghinezhad, Emad, Hussein Togun, Mohammad Mehrli, Parvaneh Sadeghi Nejad, Sara Tahan Latibari, Tuqa Abdulrazzaq, S.N. Kazi, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. “An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 81 (2015): 41–51. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.006.
9. Sadeghinezhad, Emad, Mohammad Mehrli, Sara Tahan Latibari, Mehdi Mehrli, S.N. Kazi, Cheen Sean Oon, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. “Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions.” *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53 (2014): 12455–12465. DOI: 10.1021/ie501947u.
10. Arzani, Hamed Khajeh, Ahmad Amiri, Hamid Khajeh Arzani, Shaifulazuar Bin Rozali, S. N. Kazi, and A. Badarudin. “Toward improved heat transfer performance of annular heat exchangers with water/ethylene glycol-based nanofluids containing graphene nanoplatelets.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 126.3 (2016): 1427–1436. DOI: 10.1007/s10973-016-5663-8.
11. Hossein, Akhavan-Zanjani, Majid Saffar-Avval, Mohsen Mansourkiaei, Mohammad Ahadi, and Farhad Sharif. “Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Graphene–Water Nanofluid Flowing Inside a Horizontal Circular Tube.” *Journal of Dispersion Science and Technology* 35.9 (2014): 1230–1240. DOI: 10.1080/01932691.2013.834423.
12. Mehrli, Mohammad, Emad Sadeghinezhad, Marc A. Rosen, Amir Reza Akhiani, Sara Tahan Latibari, Mehdi Mehrli, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. “Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube.” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 66 (2015): 23–31. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.007.
13. Zhukov, V.A., and E.N. Nikolenko. “Increase the heat and hydraulic efficiency of heat-changing apparatus in system of internal combustion engine.” *Internal combustion engines* 1 (2010): 102–105.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жаров Александр Викторович — кандидат технических наук, профессор Ярославский государственный технический университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль, Московский проспект, 88
e-mail: zharov3@yandex.ru

Горшков Роман Владимирович — аспирант
Научный руководитель:
Жаров Александр Викторович — Ярославский государственный технический университет
150023, Российская Федерация, г. Ярославль, Московский проспект, 88
e-mail: RZiori@yandex.ru

Савинский Николай Геннадьевич — кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Ярославский филиал ФТИАН РАН
150007, Российская Федерация, г. Ярославль, ул. Университетская, д. 21
e-mail: savinski@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zharov, Aleksandr V. — PhD, professor
Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023, Russian Federation
e-mail: zharov3@yandex.ru

Gorshkov, Roman V. — Postgraduate Supervisor:
Zharov, Aleksandr V. — Yaroslavl State Technical University
88, Moscow Av., Yaroslavl, 150023, Russian Federation
e-mail: RZiori@yandex.ru

Savinski, Nikolaj G. — PhD, Senior Researcher
Valiev IPT RAS, Yaroslavl branch
21 Universitetskaya Str., Yaroslavl, 150007, Russian Federation
e-mail: savinski@yandex.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765

PROSPECTS OF APPLYING THE UNIPOLAR MACHINES IN THE ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATIONS

A. Yu. Rumyantsev, V. F. Samosejko, A. V. Saushev

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

The perspective directions of electrical propulsion installations development are considered. It is shown that using unipolar DC machines with superconducting exciting windings from niobium-titanium alloy is advisable as the main generators and electric propulsion motors. The advantages of these machines, which allow us to successfully solve the issues of reducing the specific gravity and dimensions of the machine, increasing the indicators of their energy efficiency, maneuverability and controllability, as well as the problems of noise and electromagnetic disturbances reduction, are highlighted. The analysis of the existing developments of unipolar machines, presented by the domestic scientists and the leading international companies, is carried out. The designs and parameters of recent years developments are considered. An example of implementing the liquid-metal current collection technology in the unipolar machine bus, which makes it possible to increase the current density by several orders of magnitude compared with the existing technology of the brush current collection, is given. The assumed structure of constructing the ship electric power system, consisting of the unipolar propulsion motor, is shown. A comparative analysis of the main parameters of the electric propulsion AC installation with the asynchronous electric propulsion motor and the electric propulsion installation with the unipolar propulsion DC motor with the power of 19 MW and the nominal rotation speed of the anchor of 150 rpm is carried out. The significant superiority of the electrical propulsion installation with the unipolar DC electric motor in terms of the weight and dimensions of all main elements of the installation compared to the classical DC machines has been revealed. The conclusion on the new technologies development in the field of building the unipolar DC machines and emerging a promising direction for the synthesis of electrical propulsion installations based on these machines is made.

Keywords: electric propulsion installation, unipolar DC electric motor, superconducting excitation coils, liquid metal current collection, ship electric power system.

For citation:

Rumyantsev, Aleksey Yu., Veniamin F. Samosejko, and Alexander V. Saushev. "Prospects of applying the unipolar machines in the electrical propulsion installations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 755–765. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765.

УДК 629.123

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН В ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев

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

Рассмотрены перспективные направления развития гребных электрических установок. Показано, что в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей целесообразно применение униполярных машин постоянного тока со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения из ниобий-титанового сплава. Выделены преимущества данных машин, позволяющие успешно решать вопросы снижения удельной массы и габаритов машины, повышения показателей их энергетической эффективности, маневренности и управляемости, а также проблемы снижения шума и электромагнитных возмущений. Выполнен

анализ существующих разработок униполярных машин, представленных отечественными учеными и ведущими международными компаниями. Рассмотрены конструкции и параметры разработок последних лет. Приведен пример реализации технологии жидкометаллического токосъема в униполярной машине, позволяющий увеличить плотность тока на несколько порядков по сравнению с существующей технологией щеточного токосъема. Показана предполагаемая структура построения судовой электроэнергетической системы, имеющая в своем составе униполярный гребной электродвигатель. Проведен сравнительный анализ основных параметров гребной электрической установки переменного тока с асинхронным гребным электродвигателем и гребной электрической установки с униполярным гребным электродвигателем постоянного тока мощностью 19 МВт и номинальной скоростью вращения якоря 150 об/мин. Выявлено значительное превосходство гребной электрической установки с униполярным электродвигателем постоянного тока по массогабаритным показателям всех основных элементов установки по сравнению с классическими машинами постоянного тока. Сделан вывод о развитии новых технологий в сфере построения униполярных машин постоянного тока и появлении перспективного направления синтеза гребных электрических установок на базе этих машин.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, униполярный электродвигатель постоянного тока, сверхпроводящие катушки возбуждения, жидкометаллический токосъем, судовая электроэнергетическая система.

Для цитирования:

Румянцев А. Ю. Перспективы применения униполярных машин в гребных электрических установках / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 755–765. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765.

Введение (Introduction)

В последние годы в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) продолжается устойчивая тенденция совершенствования существующих технологий, появляются и внедряются новые технологии, связанные с выработкой, преобразованием и передачей энергии от двигателя к движителю (винту). Одним из перспективных направлений является развитие электрических генераторных и двигательных гребных установок, а также применение перспективных видов электрических машин. Исследования в этой области направлены на снижение удельной массы и габаритов этих установок, повышение показателей энергетической эффективности, маневренности и управляемости, а также решение проблем с шумом и электромагнитным возмущением.

Ряд работ [1]–[5] посвящен выбору состава и типа электрических и механических преобразователей в системах гребных электрических установок (ГЭУ). Среди них можно выделить перспективные разработки в области развития униполярных машин постоянного тока. Несмотря на недостатки, присущие этим машинам, такие как малое напряжение и наличие большого числа кольцевых щеток, они имеют ряд преимуществ в отличие от других видов электрических машин. Основными достоинствами униполярных машин по сравнению с биполярными машинами постоянного тока являются:

- отсутствие коллектора из медных пластин;
- широкое использование активных материалов, как токопроводов, так и магнитопроводов;
- меньший относительный вес при низких напряжениях;
- высокий КПД из-за отсутствия потерь в стали на гистерезис и вихревые токи;
- простота конструкции вследствие малого количества деталей;
- высокие показатели термостойкости и долговечности;
- простота обслуживания;
- относительно низкая стоимость машины.

Важными отличительными свойствами униполярных машин являются также малые электромагнитные шумы и отсутствие пульсаций электромагнитного момента. Благодаря этим достоинствам униполярные электрические машины находят применение в различных областях промышленности и транспорта, включая их применение при синтезе ГЭУ. При этом продолжают теоретические и конструкторские исследования, направленные на повышение показателей качества этих машин в составе электроприводов и систем автоматизации.

Целью работы является анализ перспективных разработок в области совершенствования конструктивных решений и повышения показателей качества униполярных электрических машин и особенности их применения при синтезе гребных электрических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Униполярные электрические машины. Униполярная электрическая машина (УЭМ) — это электромеханический преобразователь энергии, особенностью которого является неизменность направления протекания магнитного потока по магнитопроводу. УЭМ делятся на два типа: с дисковым и с цилиндрическим ротором. При вращении ротора в магнитном поле в его обмотке возникают ЭДС.

В классической схеме УЭМ, реализованной на практике в различных конструктивных исполнениях, принцип работы сводится к пересечению одиночным линейным проводником (в виде ротора во вращающейся электрической машине или подвижного якоря в линейной машине) однонаправленного, т. е. «униполярного», магнитного поля в рабочем зазоре магнитопровода. В результате такого пересечения появляется униполярная ЭДС, которая обусловлена силой Лоренца, действующей на движущийся электрический заряд со стороны магнитного поля:

$$F_L = q[v, B], \quad (1)$$

где q — величина движущегося электрического заряда; v — линейная скорость пересечения проводником магнитного поля; B — магнитная индукция.

Из данного выражения, в общем случае, следует:

$$E_{ui} = 1/q \int_l F_L dl, \quad (2)$$

где E_{ui} — ЭДС униполярной индукции; l — длина проводника.

В частном случае, при перемещении одиночного проводника в плоскопараллельном рабочем зазоре УЭМ перпендикулярно линиям магнитного поля справедливо выражение:

$$E_{ui} = vBl_a, \quad (3)$$

где v — средняя (по длине проводника) скорость перемещения проводника в рабочем зазоре; B — средняя (по длине проводника) магнитная индукция в рабочем зазоре; l_a — активная длина проводника, определяемая длиной рабочего зазора магнитопровода УЭМ.

Из выражения (3) следует, что величина ЭДС имеет принципиальное ограничение по параметру l_a или параметру $l_a n_a$, где $n_a = 1$ — число последовательно соединенных активных проводников электрической машины. Для получения больших значений ЭДС униполярной индукции обмотку якоря необходимо выполнять с последовательно соединенными активными проводниками и числом $n_a > 1$. Последовательное соединение активных проводников в электрическую цепь образует многовитковые контуры (секций, катушек) обмотки якоря в условиях униполярной индукции. При этом направление токов в активных проводниках должно быть одинаковым по всей длине рабочего зазора. В работе [5] приведено описание 3D-модели варианта конструкции УЭМ с числом последовательно соединенных активных проводников $n_a = 180$.

В работе [6] рассматривается возможность применения униполярной электрической машины для привода направленной антенно-фидерной системы. При этом разработана конструкция компенсационной обмотки, позволяющей полностью скомпенсировать реакцию якоря машины. Такой подход является перспективным и при использовании УЭМ в ГЭУ. Действительно, реакция якоря в УЭМ является одним из основных вопросов теории и расчета этих машин, поскольку большие значения тока якоря и его поле оказывают существенное влияние на работу машины. Относительное значение МДС якоря в УЭМ значительно выше, чем в биполярных машинах постоянного тока. Характер реакции якоря зависит от типа токосъема. Если рабочая точка машины лежит на прямолинейных участках кривой намагничивания, т. е. когда магнитная система машины не насыщена результирующим магнитным полем или сильно насыщена, то искажение основного поля в стали не приводит к снижению наводимой ЭДС [7]. Однако, поскольку рабочая

точка машины, как правило, находится на нелинейном участке кривой намагничивания, т. е. магнитная цепь имеет «среднее» насыщение, происходит насыщение индуктора, снижение полного потока и соответствующее уменьшение ЭДС. Для сохранения величины ЭДС увеличивают МДС обмотки возбуждения. Таким образом, дополнительный ток возбуждения компенсирует размагничивающее влияние поперечной реакции якоря. Насыщение магнитной цепи снижает возможность регулирования напряжения УЭМ. При необходимости широкого регулирования необходимо либо уменьшить поток реакции якоря путем увеличения магнитного сопротивления на его пути, либо скомпенсировать реакцию якоря с помощью специальной обмотки, имеющей направление тока, противоположное направлению тока в якоре. В работе [6] рассматривается конструкция компенсационной обмотки, позволяющая полностью скомпенсировать реакцию якоря.

Как известно, токосъемный аппарат позволяет получать напряжение на выводах и подключать к ним нагрузку. В этом случае УЭМ работает в режиме генератора. Если в цепь ротора подать ток, то взаимодействие этого тока с магнитным потоком приводит к возникновению механических сил, однонаправленного электромагнитного момента и вращению ротора. По сравнению с классическими машинами постоянного тока в УЭМ отпадает необходимость в коллекторе, что существенно упрощает конструкцию. Однако вопрос выбора токосъемного аппарата является одним из ключевых. В работе [8] рассматривается проблема выбора токосъемного аппарата униполярной электрической машины. Выполнен анализ и сравнение различных типов токосъемов, а именно: системы из щеток и контактных колец, токосъема на основе жидкого металла и катящегося токосъема. Наибольшее внимание уделяется катящемуся токосъему, приводятся рекомендации по определению контактного сопротивления катящихся тел, обоснован выбор материалов контактирующих электродов. Для достижения поставленной цели были выполнены расчеты, а также создан опытный макет, на котором проведены натурные эксперименты. В результате была выбрана конструкция с катящимися медными роликами.

Достоинства УЭМ способствовали разработке ряда оригинальных конструктивных решений, защищенных патентами на изобретения [9]–[11], и 3D-моделей этих машин [5], [12]. Особый интерес представляет применение униполярных электрических машин при синтезе ГЭУ.

Результаты (Results)

Применение униполярных машин в СЭЭС в перспективе должно существенно упростить процесс распределения мощности в ГЭУ, уменьшить общее число компонентов преобразования энергии и, соответственно, стоимость всей установки. Общая эффективность системы ГЭУ будет повышена за счет уменьшения потерь преобразования мощности, что позволит снизить эксплуатационные расходы на топливо и техническое обслуживание [1], [13]–[15]. На рис. 1 приведена принципиальная схема гребной дизель-электрической установки с УЭМ, в состав которой входит дизель, электрический генератор и электродвигатель с возбуждением со стороны ротора постоянным током, а также преобразователи электрической энергии. В качестве движителя используется винт фиксированного шага.

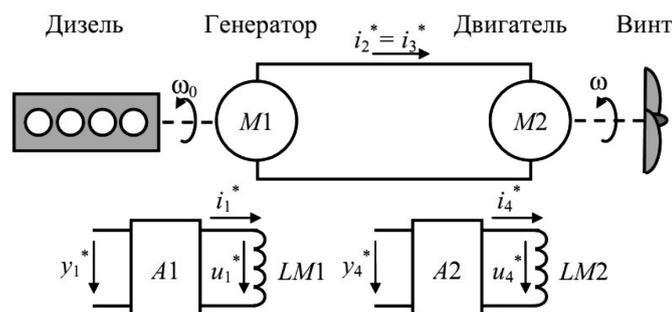


Рис. 1. Принципиальная схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами

На сегодняшний день исследованием униполярных машин в составе перспективных видов ГЭУ занимаются ведущие международные компании, среди которых General Atomics Electric Electromagnetic Systems Division (США), Guina Energy Technologies Pty Ltd (Австралия), Thyssen Krupp Marine Systems (Германия). Так, в 2005 г. Управление военно-морских исследований США заключило с компанией General Atomics крупный контракт на проектирование, изготовление и заводские испытания полномасштабного униполярного двигателя постоянного тока с целью его применения в качестве судового двигателя [16], [17]. В соответствии с этим контрактом компания General Atomics должна поставить гребной электродвигатель (ГЭД) мощностью 36,5 МВт и номинальными оборотами 120 об/мин, привод двигателя и вспомогательное оборудование, которые будут отправлены на объект военно-морских сил США для полнофункциональных испытаний. Эта полномасштабная система рассчитана на продвижение крупных судов, таких как эсминцы, которые в настоящее время разрабатываются военно-морскими силами США. В соответствии с предыдущими контрактами General Atomics, гребной двигатель был спроектирован, изготовлен и прошел испытания на экспериментальном стенде мощностью 300 кВт, а также был модернизирован до уровня 3,7 МВт с целью дальнейших испытаний. Модель в поперечном разрезе базовой конфигурации униполярного двигателя 3,7 МВт приведена на рис. 2.

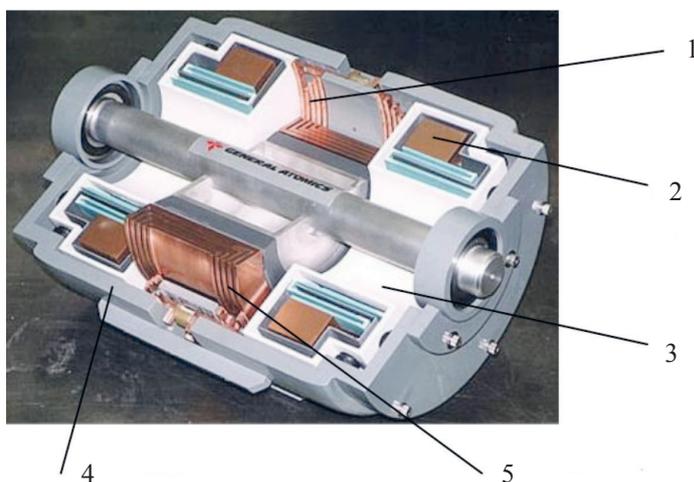


Рис. 2. Поперечный разрез базовой конфигурации униполярного двигателя 3,7 МВт компании General Atomics: 1 — статорная часть токоприемника; 2 — сверхпроводниковая катушка возбуждения; 3 — криостат; 4 — металлический корпус; 5 — многослойные проводники якоря

В униполярном двигателе компании General Atomics используются щетки из медного волокна и две сверхпроводящие катушки возбуждения из ниобий-титанового сплава (NbTi). Данная машина имеет множество преимуществ, включая очень малый диаметр и малый вес. По данным компании General Atomics, униполярная машина мощностью 3,7 МВт и оборотами 500 об/мин имеет следующие параметры:

- диаметр — 1,38 м;
- длина — 1,87 м;
- масса — 11,4 т;
- скорость под щетками — 25 м/с;
- максимальное напряжение — 145 В;
- максимальный ток — 26 кА;
- плотность тока в щетках — 155 А/см²;
- средняя магнитная индукция в роторе – 2 Тл.

Одновременно на аналогичную тему ведутся разработки в Австралии фирмой Guina Energy Technologies Pty Ltd. Одним из направлений этой компании является использование

на судах в качестве главных генераторов и ГЭД униполярных машин со сверхпроводниковыми обмотками и жидкометаллическим токосъёмом (рис. 3) [18], [19].

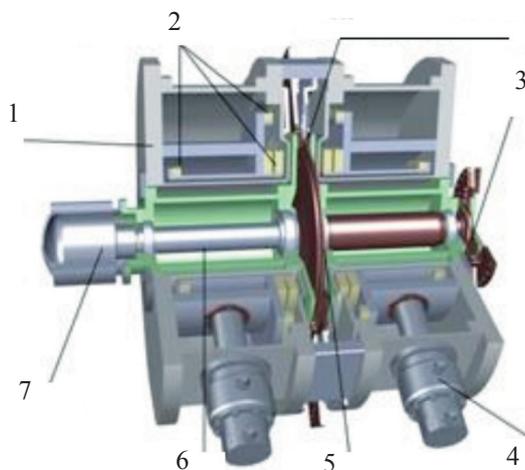


Рис. 3. Униполярная машина со сверхпроводниковыми обмотками и жидкометаллическим токосъёмом компании Guina Energy Technologies Pty Ltd: 1 — криостат; 2 — сверхпроводниковая катушка; 3 — жидкометаллический токосъём; 4 — криокамера; 5 — диск ротора; 6 — крутящий вал; 7 — выходное соединение

Жидкометаллические щетки, по мнению разработчиков компании Guina, являются ключевым компонентом технологии. По сравнению с настоящей технологией скользящего контакта, которая позволяет достичь значений плотности тока порядка 90–150 А/см², щетки жидкостного металла могут достигать значений до 3000 А/см² на поверхностных скоростях до 200 м/с и выше и по сравнению с предыдущими имеют более низкое трение и электрические потери [20], [21]. В этой технологии применяется натрий-калиевый сплав (NaK), который имеет плотность более низкую, чем вода, и идеально подходит для такого применения. Разработчики компании Guina исследуют и другие сплавы с низкой температурой плавления, которые, по мнению ученых, могут обеспечить более высокую производительность. Данные щетки не имеют никакого механического износа и, в конечном итоге, имеют более продолжительный срок службы.

Компания Guina Energy Technologies Pty Ltd предлагает использовать униполярные машины в судовых двигательных установках в составе винто-рулевых колонок (рис. 4) [19]. По мнению компании, униполярные машины идеально подходят для безредукторной передачи энергии на винт.

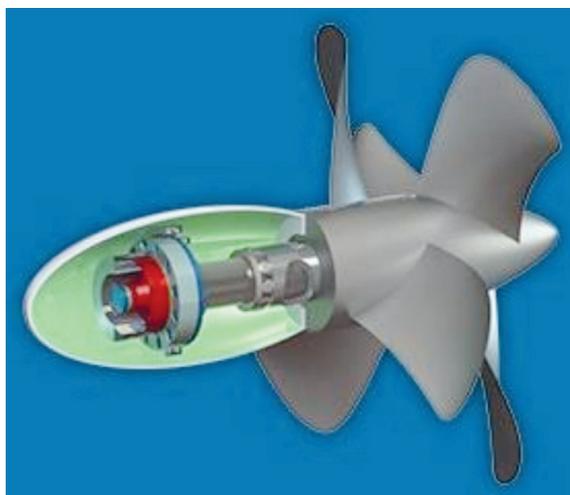


Рис. 4. Униполярная машина судовой двигательной установки в составе винто-рулевой колонки

Для интеграции униполярного ГЭД в СЭЭС компанией General Atomics предлагается упрощенная архитектура, представленная на рис. 5 [22]. Источником электроэнергии в качестве генераторной установки в данном случае предлагается высокоскоростная турбина с генератором переменного тока (*TURBINE*), который затем выпрямляется, тем самым обеспечивая относительно высокое напряжение 1500 В постоянного тока (*RECTIFIED ALTERNATOR*).

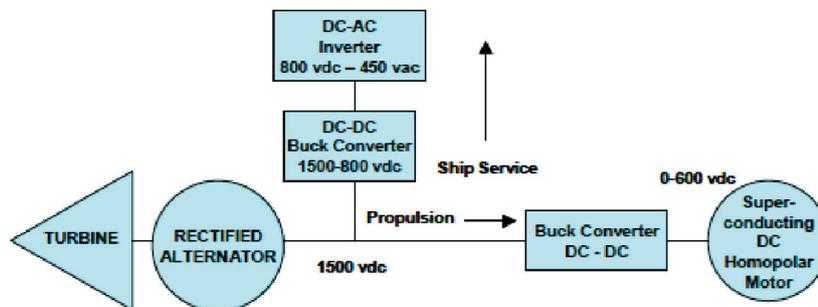


Рис. 5. Структурная схема судовой электроэнергетической системы с униполярным ГЭД фирмы General Atomics

Далее часть энергии направляется на собственные нужды судна (*Ship Service*) через понижающий преобразователь, в котором уровень напряжения снижается до 800 В (*Buck Converter DC-DC*), преобразуясь затем в переменное напряжение 450 В стандартной частоты (*DC-AC Inverter*). Основная часть энергии направляется на электродвижение (*Propulsion*), проходит через управляемый конвертер постоянного напряжения (*Buck Converter DC-DC*), который выдает необходимое напряжение от 0 до 600 В, управляя униполярным ГЭД (*Superconducting DC Homopolar Motor*).

Обсуждение (Discussion)

При сопоставлении ГЭУ с униполярным ГЭД и аналогичной системы на переменном токе с асинхронной машиной был выполнен сравнительный анализ элементов установки, представленный в следующей таблице:

Сравнительные характеристики основных элементов ГЭУ переменного тока и униполярной ГЭУ мощностью 19 МВт, 150 об/мин

Элемент ГЭУ	ГЭУ переменного тока		Униполярная ГЭУ	
	м ³	т	м ³	т
Генератор	34,7	50,5	38	51,5
Преобразователь частоты	21,0	9,0	–	–
Фильтр	10,6	4,3	–	–
Выпрямитель	–	–	2,8	0,85
Понижающий преобразователь	–	–	12	4,1
ГЭД	44,7	117,4	15,0	63,2
Всего	111	181,2	67,8	120 + 5 (шинопровод)

Сравнение проводилось для ГЭУ мощностью 19 МВт, генераторная установка напряжением 4160 В, 3600 об/мин. Для ГЭУ с униполярным ГЭД предполагается использовать аналогичный

генератор как для ГЭУ переменного тока, но с выпрямительным блоком. Для управления асинхронного ГЭД используется преобразователь частоты и фильтр, тогда как для ГЭУ с униполярной машиной вместо данных элементов используются выпрямитель тока и понижающий преобразователь общей массой порядка 5 т. При учете массы униполярного ГЭД было добавлено 2 т на вес компрессоров криогенной системы. Результат показал, что при использовании ГЭУ с униполярными машинами появляется существенное преимущество в экономии веса и объема порядка, соответственно, 56 т и 43 м³ (экономия более 30 %).

Заключение (Conclusion)

По мнению специалистов ведущих фирм-производителей и проектировщиков электрических машин, униполярные машины отличаются своей простотой и высокой эффективностью [6], [19], [23], [24]. Будучи чистыми электрическими устройствами постоянного тока, они являются перспективными двигателями с постоянным крутящим моментом, а также генераторами тока. Униполярные двигатели и генераторы имеют главные преимущества, а именно: низкий коэффициент веса на единицу мощности, длительный эксплуатационный период обслуживания, высокая эффективность, низкий уровень шума. Униполярные машины характеризуются присущим им низким напряжением и высокими рабочими токами, что делает задачу обеспечения связи между двигателями и генераторами трудновыполнимой. Однако применение новых технологий в области высокотемпературных сверхпроводников и жидкометаллического токосъема позволяет создавать машины достаточной мощности, удовлетворяющие жестким требованиям для применения их в системах электродвижения на судах. Передовые конструкции униполярных двигателей указывают на то, что эти электрические машины дают значительное уменьшение веса и пульсаций момента по отношению к существующим системам, таким образом, указывая на перспективность концепции применения их в составе ГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровцинова Л. М. Перспективность гребных электрических установок с униполярными машинами / Л. М. Бровцинова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, А. Ю. Румянцев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. — 2014. — № 7. — С. 37–39.
2. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.
3. Ратников В. И. О применении гребных электрических установок в единых электроэнергетических системах на научно-исследовательских судах рыбопромыслового флота / В. И. Ратников // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 31–33.
4. Романовский В. В. Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.
5. Лазаревский Н. А. Структурные схемы гребных установок, анализ и перспективы развития / Н. А. Лазаревский, В. А. Хомяк, Ф. А. Гельвер, В. Ф. Самосейко // Судостроение. — 2012. — № 3 (802). — С. 44–47.
6. Геча В. Я. Конструкция компенсационной обмотки униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2014. — Т. 139. — № 2. — С. 7–10.
7. Суханов Л. А. Электрические униполярные машины / Л. А. Суханов, Р. Х. Сафиуллина, Ю. А. Бобков; под ред. Л. А. Суханова. — М.: ВНИИЭМ. Отд-ние науч.-техн. информации, стандартизации и нормализации в электротехнике, 1964. — 136 с.
8. Геча В. Я. Определение контактного сопротивления для токосъема униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 145. — № 2. — С. 3–7.

9. Пат. 2037942 Российская Федерация, МПК H02K 31/02. Униполярная электрическая машина / В. Р. Терровере; заяв. Пермский государств. ун-т им. А. М. Горького; патентообл. Терровере Владимир Родрихович. — № 4880113/07; заявл. 05.11.1990; опубл. 19.06.1995.

10. Пат. 2158462 Российская Федерация, МПК H02K 31/00, H02K 1/06. Униполярная электрическая машина / В. А. Урманов; заяв. и патентообл. Владимир Алексеевич Урмаев. — № 99126877/09; заявл. 16.12.1999; опубл. 27.10.2000, Бюл. № 30.

11. Пат. 109350 Российская Федерация, МПК H02K 31/02. Униполярная электрическая машина постоянного тока / А. В. Стыскин, Р. Р. Ишмухаметов; заяв. и патентообл. Уфимский государственный авиационный технический университет. — № 2011116714/07; заявл. 27.04.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.

12. Смирнов А. Ю. Синтез 3D-моделей униполярной индукторной машины / А. Ю. Смирнов, А. Б. Дарьенков, А. Ю. Зимин, Т. Н. Уснунц-кригер // *Электротехника*. — 2018. — № 3. — С. 12–17.

13. Романовский В. В. Качество электроэнергии гребных электрических установок судов ледового плавания и ледоколов / В. В. Романовский, А. И. Лебедев, А. Г. Гостев // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 6 (28). — С. 56–60.

14. Румянцев А. Ю. Направление развития гребных электрических установок / А. Ю. Румянцев // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 56–58.

15. Румянцев А. Ю. Пути повышения энергоэффективности судовых электроэнергетических систем / А. Ю. Румянцев // Труды научно-методической конференции «Инновационные технологии в области электропривода и электрооборудования». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 37–38.

16. General Atomics Company [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ga.com/general-atomics-to-design-and-fabricate-advanced-propulsion-motor-for-us-navy> (дата обращения: 26.04.2019).

17. Gieras J. F. Superconducting electrical machines-State of the art / J. F. Gieras // *Organ*. — 2009. — Vol. 12. — Pp. 09.

18. Fuger R. Superconducting Motor Developments at Guina Energy Technologies / R. Fuger, A. Guina, D. Sercombe, J. Kells, A. Matsekh, K. Labes, T. Lissington, C. Fabian, G. Chu // 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). — IEEE, 2015. — Pp. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.

19. Fuger R. A superconducting homopolar motor and generator—new approaches / R. Fuger, A. Matsekh, J. Kells, D. B. T. Sercombe, A. Guina // *Superconductor Science and Technology*. — 2016. — Vol. 29. — Is. 3. — Pp. 034001.

20. Schaubel K. M. Development of A superconducting Magnet System for The ONR / GENERAL Atomics Homopolar Motor / K.M. Schaubel, A.R. Langhorn, W.P. Creedon, N.W. Johanson, S. Sheynin, R.J. Thome // AIP Conference Proceedings. — AIP, 2006. — Vol. 823. — Is. 1. — Pp. 1819–1826. DOI: 10.1063/1.2202611.

21. Исследовательский портал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://revolution-green.com/homopolar-motor-liquid-metal-brushes/#disqus_thread (дата обращения: 26.04.2019).

22. Thome R. J. Homopolar motor technology development / R. J. Thome, W. Creedon, M. Reed, E. Bowles, K. Schaubel // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. — IEEE, 2002. — Vol. 1. — Pp. 260–264. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043229.

23. Maleki T. Homopolar micromotor with liquid metal rotor / T. Maleki, B. Ziaie // TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. — IEEE, 2007. — Pp. 1135–1138. DOI: 10.1109/SENSOR.2007.4300335.

24. Wang Z. Performance of twin-rotor DC homopolar motor (2011). LSU Master's Theses. 1136 [Электронный ресурс] / Z. Wang. — Режим доступа: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/1136 (дата обращения: 26.04.2019).

REFERENCES

1. Brovtsinova, L. M., V. F. Samoseyko, A. V. Saushev, and A. Yu. Rumyantsev. “Prospects of rowing electrical units with unipolar cars.” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* 7 (2014): 37–39.

2. Romanovskiy, Viktor Viktorovich, Mirza Alimovich Sjubayev, and Igor Markovich Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.
3. Ratnikov, V. I. "O primeneni grebnykh elektricheskikh ustanovok v edinykh elektro-energeticheskikh sistemakh na nauchno-issledovatel'skikh sudakh rybopromyslovogo flota." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 31–33.
4. Romanovskii, V. V., V. S. Ivanov, and A.I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.
5. Lazarevsky, N. A., V. A. Khomyak, F. A. Gelver, and V. F. Samoseyko. "Block diagrams of propulsion plants, analysis and prospects." *Shipbuilding* 3(802) (2012): 44–47.
6. Gecha, V. Ya., A. B. Zakharenko, and A. K. Nadkin. "Konstruktsiya kompensatsionnoi obmotki unipolyarnoi elektricheskoi mashiny." *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* 139.2 (2014): 7–10.
7. Sukhanov, L. A., R. Kh. Safiullina, and Yu. A. Bobkov. *Elektricheskie unipolyarnye mashiny*. M.: VNIIEM. Otd-nie nauch.-tekhn. informatsii, standartizatsii i normalizatsii v elektrotekhnike, 1964.
8. Gecha, V. Ya., A. B. Zakharenko, and A. K. Nadkin. "Opredelenie kontaktnogo soprotivleniya dlya tokos»ema unipolyarnoi elektricheskoi mashiny." *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* 145.2 (2015): 3–7.
9. Terrovere, Vladimir Rodrikhovich. RU 2 037 942 C1, IPC H 02 K 31/02. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina. Russian Federation, assignee. Publ. 19 June 1995.
10. Urmaev, Vladimir Alekseevich. RU 2 158 462 C1, IPC H 02K 31/00, H 02K 1/06. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Oct. 2000.
11. Styskin, A. V., and R. R. Ishmukhametov. RU 109 350 U1, IPC H 02K 31/02. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina postoyannogo toka. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Oct. 2011.
12. Smirnov, A. Y., A. B. Dar'enkov, A. Y. Zimin, and T. N. Usnunts-Kriger. "Synthesis of 3D Models of a Unipolar Inductor Machine." *Russian Electrical Engineering* 89.3 (2018): 147–151. DOI: 10.3103/S1068371218030161.
13. Romanovsky, V. V., and A. I. Lebedev. "Electricity quality of rowing electrical installations of ice ships and icebreakers." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 56–60.
14. Rumyantsev, A. Yu. "Napravlenie razvitiya grebnykh elektricheskikh ustanovok." *Sbornik tezisev dokladov natsional'noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S. O. Makarova*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 56–58.
15. Rumyantsev, A. Yu. "Puti povysheniya energoeffektivnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem." *Trudy nauchno-metodicheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v oblasti elektroprivoda i elektrooborudovaniya»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 37–38.
16. General Atomics Company. Web. 26 Apr. 2019 <<http://www.ga.com/general-atomics-to-design-and-fabricate-advanced-propulsion-motor-for-us-navy>>.
17. Gieras, Jacek F. "Superconducting electrical machines-State of the art." *Organ* 12 (2009): 09.
18. Fuger, Rene, Ante Guina, David Sercombe, John Kells, Arkadiy Matsekh, Kurt Labes, Tony Lissington, Cesimiro Fabian, and Grace Chu. "Superconducting Motor Developments at Guina Energy Technologies." *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. IEEE, 2015. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.
19. Fuger, Rene, Arkadiy Matsekh, John Kells, D. B. T. Sercombe, and Ante Guina. "A superconducting homopolar motor and generator—new approaches." *Superconductor Science and Technology* 29.3 (2016): 034001.
20. Schaubel, K. M., A. R. Langhorn, W. P. Creedon, N. W. Johanson, S. Sheynin, and R. J. Thome. "Development of a superconducting magnet system for the ONR/General Atomics homopolar motor." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 823. No. 1. AIP, 2006. 1819–1826. DOI: 10.1063/1.2202611.
21. Issledovatel'skii portal. Web. 26 Apr. 2019 <https://revolution-green.com/homopolar-motor-liquid-metal-brushes/#disqus_thread>.
22. Thome, R. J., W. Creedon, M. Reed, E. Bowles, and K. Schaubel. "Homopolar motor technology development." *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Vol. 1. IEEE, 2002. 260–264. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043229.
23. Maleki, Teimour, and Babak Ziaie. "Homopolar micromotor with liquid metal rotor." *TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*. IEEE, 2007. 1135–1138. DOI: 10.1109/SENSOR.2007.4300335.
24. Wang, Z. *Performance of twin-rotor DC homopolar motor* (2011). LSU Master's Theses. 1136. Web. 26 Apr. 2019 <https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/1136>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Румянцев Алексей Юрьевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru, stehnika@mail.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

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: *ep-gumrf@bk.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Саушев Александр Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rumyantsev, Aleksey Yu. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru, stehnika@mail.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

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: *ep-gumrf@bk.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Saushev, Alexander V. —
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: *saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 9 июля 2019 г.

Received: July 9, 2019.

EXPERIENCE OF DESIGNING AND TESTING THE FIRST NATIVE SHIPBOARD VALVE DIESEL-GENERATOR

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

The most wide spread sources of electric power for modern ships are diesel-generator sets, operating with constancy of rotation speed. Load of diesel-generator changes in wide range in different ship functioning modes. It is noted that diesel-generator operation at a constant speed with low load has a number of shortcomings such as increasing the fuel and lubricant consumption, decreasing the efficiency and the drive motor resource. The problem solution is connected with increasing the diesel-generators quantity in electric power plant or with changing their functioning mode. In the first case the capital expenditures and the equipment maintenance costs increase. In the second case it's necessary to realize the valve mode of diesel-generator functioning. The valve diesel-generator can operate with variable rotation speed in function of load that decreases the fuel consumption and increases the drive motor resource. Realization of valve mode of a diesel-generator operation with variable rotation speed is able in case of using it jointly with semiconductor converter which is necessary to stabilize the electrical parameters (voltage and frequency) in shipboard electric power network when the valve diesel-generator operates with variable rotation speed. Applying the valve diesel-generators in electric power plants permits to use the generator sets of equal rated power and decrease their total quantity. For decreasing the rated power and, therefore, the cost of electric power plants equipment, it is possible to implement two functioning modes of diesel-generator in electric power plant: the traditional mode with constant rotation speed with loads close to the rated value, and the valve mode with decreased rotation speed at low load. The experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator with variable rotation speed, realized on the dump scow «Silnaya» of HB600 project, is considered. The results of the experimental researches of different functioning modes of electric power plant with valve diesel-generators are presented. The results of the experimental researches confirm expediency to use the valve diesel-generator with variable rotation speed in the autonomous electric power systems with distribution on alternating current and in the integrated electric power systems with distribution on direct current.

Keywords: scow, shipboard electric power plant, structural diagram, generator set, diesel-generator, variable rotation speed, valve generator, semiconductor converter, electric power quality, experimental research.

For citation:

Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 766–775. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775.

УДК 621.315:621.3.025

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ПЕРВОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

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 «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Основными источниками электроэнергии на современных судах являются дизель-генераторные агрегаты, работающие с постоянной частотой вращения. В разных режимах эксплуатации судна нагрузка на дизель-генераторах изменяется в широком диапазоне. Отмечается, что работа дизель-гене-

ратора с постоянной частотой вращения на долевой нагрузке имеет ряд недостатков, к которым следует отнести увеличение расхода горюче-смазочных материалов, снижение КПД и ресурса приводного двигателя. Решение проблемы связано с увеличением количества дизель-генераторов в составе судовой электростанции или изменением их режима эксплуатации. В первом случае увеличивается стоимость оборудования и эксплуатационные расходы, во втором — необходимо реализовать вентильный режим работы дизель-генератора. Вентильный дизель-генератор может работать с переменной частотой вращения в функции изменения нагрузки, что снижает удельный расход топлива и увеличивает моточасовой ресурс приводного дизеля. Реализация вентильного режима эксплуатации дизель-генератора с переменной частотой вращения возможна при комплектации его полупроводниковым преобразователем, который необходим для стабилизации электрических параметров (напряжения и частоты) в судовой сети при переменной частоте вращения вентильного дизель-генератора. Применение в составе судовых электростанций вентильных дизель-генераторов позволяет использовать генераторные агрегаты одинаковой мощности, при этом можно сократить их количество. Для уменьшения мощности, а, соответственно, и стоимости судовых электростанций возможна реализация двух режимов эксплуатации дизель-генератора: традиционного — с постоянством частоты вращения при нагрузке, близкой к номинальной, и вентильного — с пониженной частотой вращения дизель-генератора на долевой нагрузке. Рассмотрен опыт проектирования и испытаний первого отечественного судового дизель-генератора переменной частоты вращения, реализованного на грунтоотвозной шаланде «Сильная» пр. НВ600. Представлены результаты экспериментальных исследований различных режимов эксплуатации судовой электростанции с вентильными дизель-генераторами. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что вентильный дизель-генератор переменной частоты вращения целесообразно применять как в автономных судовых электростанциях с распределением электроэнергии на переменном токе, так и в единых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе.

Ключевые слова: шаланда, судовая электростанция, структурная схема, генераторный агрегат, дизель-генератор, переменная частота вращения, вентильный генератор, полупроводниковый преобразователь, качество электроэнергии, экспериментальные исследования.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Опыт проектирования и испытания первого отечественного судового вентильного дизель-генератора / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 766–775. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775.

Введение (Introduction)

Основным источником электроэнергии на современных судах являются дизель-генераторы (ДГ), работающие с постоянной частотой вращения. Нагрузка на судовую электростанцию (СЭС) изменяется в широком диапазоне в разных режимах эксплуатации судна, что приводит к изменению нагрузки на ДГ. Работа ДГ с постоянной частотой вращения при работе на долевой нагрузке имеет ряд недостатков, к которым следует отнести увеличение расхода горюче-смазочных материалов, снижение КПД и ресурса приводного дизеля [1]–[3]. Решение проблемы связано с увеличением количества ДГ в составе СЭС или изменением их режима эксплуатации. В первом случае увеличивается стоимость оборудования и эксплуатационные расходы, во втором — необходимо реализовать вентильный режим работы ДГ. Вентильный ДГ может работать с переменной частотой вращения в функции изменения нагрузки. Для стабилизации электрических параметров (напряжения и частоты) в судовой сети при переменной частоте вращения вентильного ДГ применяется полупроводниковый преобразователь (ПП) [4]–[6].

В статье рассмотрен опыт создания и испытаний судового вентильного ДГ с переменной частотой вращения. Вентильный ДГ переменной частоты вращения впервые установлен на отечественном судне (грунтоотвозной шаланды «Сильная» проекта НВ600). ДГ прошел швартовные и ходовые испытания и успешно предъявлен Российскому морскому регистру судоходства (далее — РС). Одним из результатов испытаний вентильного ДГ явилось введение РС в «Правила классификации и постройки морских судов, 2019 г.» новой гл. 23 «Специальные требования к вентильным генераторным агрегатам», разработанной при непосредственном участии АО «НПЦ «Электродвижение судов».

Методы и материалы (Methods and Materials)

В 2018 г. на Онежском судостроительно-судоремонтном заводе (г. Петрозаводск) завершено строительство самоходной грунтоотвозной шаланды «Сильная» пр. НВ600 (рис. 1). Судно построено по заказу ФГУП «Росморпорт», головной проектант судна — ЗАО «Спецсудопроект».



Рис. 1. Самоходная грунтоотвозная шаланда «Сильная», пр. НВ600

Основные характеристики судна:

длина габаритная 56,1 м;
 ширина 11,2 м;
 водоизмещение 1606 т;
 валовая вместимость 835 т;
 объем грунтового трюма 600 м³;
 скорость хода 6,5 уз;
 экипаж 3 чел.;
 автономность по запасам 5 сут.

Схема общего расположения самоходной грунтоотвозной шаланды пр. НВ600 приведена на рис. 2.

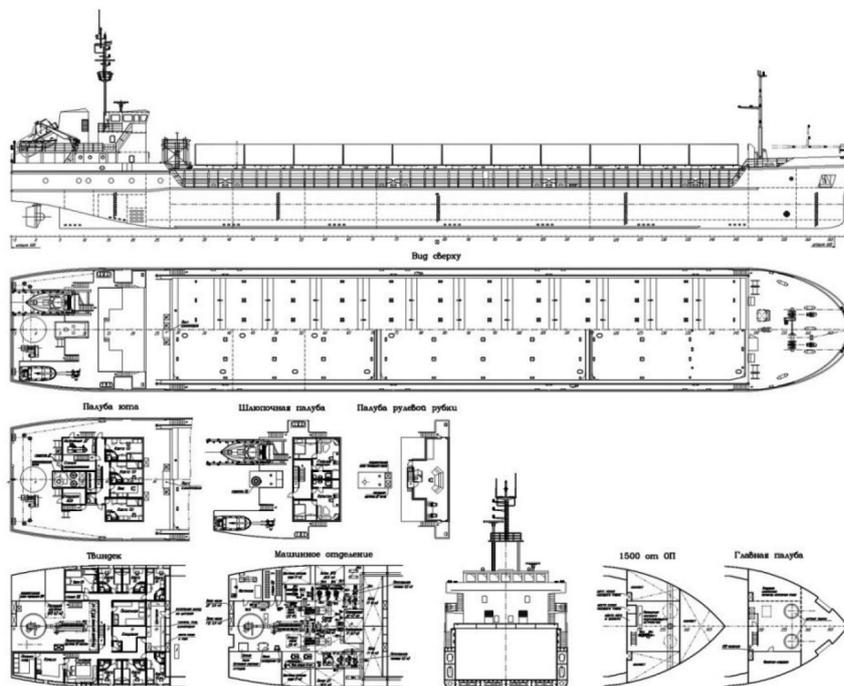


Рис. 2. Схема общего расположения самоходной грунтоотвозной шаланды пр. НВ600

Основными режимами эксплуатации судна являются: стоянка без погрузки, стоянка с погрузкой, маневрирование, ходовой и аварийный. Движение шаланды обеспечивают два главных дизеля мощностью 369 кВт с частотой вращения 1800 мин⁻¹, работающие на полноповоротные механические винторулевые колонки с винтом фиксированного шага. Частота вращения винта — 600 мин⁻¹.

В состав судовой электростанции (СЭС) входит два вспомогательных дизель-генератора (ДГ), мощностью 100 кВт каждый (рис. 3), с номинальной частотой вращения 1500 мин⁻¹, главный распределительный щит (ГРЩ) переменного тока напряжением 400 (230) В, частотой 50 Гц, два понижающих трансформатора напряжением 400/230 В [3].



Рис. 3. Вспомогательный судовой дизель-генератор

Проведенные испытания СЭС на первом судне данной серии показали, что при стоянке и ходовом режиме нагрузка на ДГ уменьшается до 10–15 кВт и более. Длительная работа ДГ с долевой нагрузкой приводит к повышенному расходу горюче-смазочных материалов и недопустима при снижении нагрузки менее 10 %. Традиционное решение проблемы связано с установкой дополнительного ДГ меньшей мощности [7]–[9].

Исполнитель работ АО «НПП «Электродвижение судов» предложил заказчику — ФГУП «Росморпорт» — на базе ранее установленных штатных ДГ реализовать вентильный режим эксплуатации путем снижения частоты вращения вспомогательного ДГ при работе на долевой нагрузке и установки полупроводникового преобразователя (ПП) для поддержания постоянных параметров электроэнергии в судовой сети. Снижение частоты вращения позволит обеспечить продолжительную работу приводного двигателя на малой нагрузке и уменьшить расход горюче-смазочных материалов [5]. В результате проведенного сравнительного технико-экономического анализа заказчиком, в лице Управления развития и строительства флота ФГУП «Росморпорт» (нач. В. И. Штрамбранд), предпочтение было отдано второму варианту с реализацией в составе СЭС вентильного ДГ. Схемное решение СЭС в вентильными ДГ рассмотрено в публикации [1]. На завершающем этапе строительства судна была проведена модернизация СЭС с целью реализации вентильного ДГ на базе штатного агрегата путем дополнительной установки ПП, состоящей из двух полупроводниковых модулей (выпрямитель / инвертор), входного и выходного фильтра (рис. 4).

Дополнительно в процессе модернизации СЭС была проведена доработка ГРЩ и системы регулирования частоты вращения приводного дизеля. Секция вентильного ДГ ГРЩ приведена на рис. 5.



Рис. 4. Полупроводниковые модули (справа) и фильтры (слева)



Рис. 5. Секция вентильного ДГ в составе ГРЩ

СЭС с вентильными ДГ работает следующим образом. При работе вспомогательного ДГ с нагрузкой в диапазоне 30–100 % от номинальной величины генератор напрямую подключен к ГРЩ. ДГ при этом работает с номинальной частотой вращения (1500 мин^{-1}). При снижении нагрузки на ДГ до 30 % (30 кВт) и менее осуществляется подключение ПП, и вспомогательный ДГ переходит на работу с пониженной частотой вращения (1250 мин^{-1}). При снижении частоты вращения вспомогательного ДГ пропорционально снижается частота электрического тока и незначительно уменьшается напряжение на выходе генератора [10]–[12].

Стабилизацию выходных параметров электроэнергии в судовой сети, в соответствии с требованиями РС, осуществляет ПП. В случае увеличения нагрузки в судовой сети повышается частота вращения ДГ до номинального значения (1500 мин^{-1}), происходит отключение ПП и генератор напрямую подключается к ГРЩ. Применение ПП не меняет схему построения СЭС. Переход с номинальной частоты вращения ДГ на пониженную частоту производится без изменения схемы генерирования электроэнергии. Снижение надежности СЭС не происходит в связи с тем,

что в случае отказа ПП ДГ может работать с номинальной частотой и напрямую подключается к шинам ГРЩ. Процессы переключения режимов эксплуатации ДГ происходят автоматически без обесточивания судна. Применение ПП не требует дополнительного технического обслуживания со стороны экипажа судна и расходов на эксплуатацию.

В ходе проведения швартовых и ходовых испытаний грунтоотвозной шаланды «Сильная» пр. НВ600 были выполнены экспериментальные исследования основных режимов эксплуатации СЭС с вентильными ДГ.

Основные задачи при проведении экспериментальных исследований:

- проверка перехода вентильного ДГ с номинальной частоты вращения на минимальную и обратно;
- проверка поддержания постоянства напряжения и частоты в судовой сети при работе вентильного ДГ на пониженной частоте вращения при плавном изменении нагрузки;
- проверка поддержания постоянства напряжения и частоты в судовой сети при прямом включении судового асинхронного электропривода на номинальной и пониженной частоте вращения;
- проверка перехода с режима прямого подключения генератора на ГРЩ к вентильному режиму работы посредством включения и отключения ПП.

Схема СЭС с указанием точек подключения электроизмерительных приборов для осциллографирования установившихся и переходных процессов представлена на рис. 6.

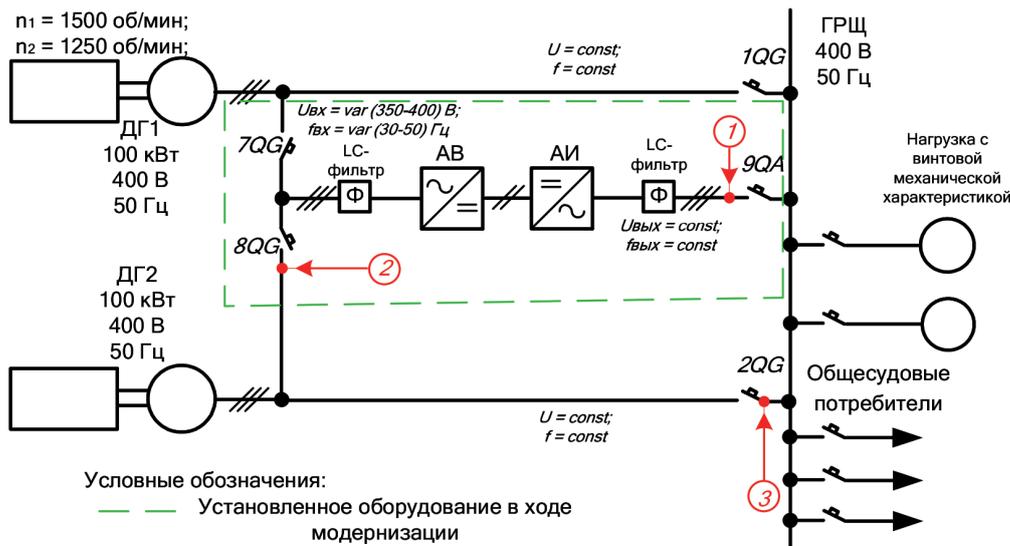


Рис. 6. Схема СЭС с вентильным ДГ грунтоотвозной шаланды «Сильная» пр. НВ600 с указанием точек для осциллографирования:

ДГ — дизель-генератор; АВ — активный выпрямитель; АИ — автономный инвертор; ГРЩ — главный распределительный щит; Ф — фильтр

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Экспериментальные исследования СЭС с вентильными ДГ на грунтоотвозной шаланде проекта НВ600 проводились с использованием электронного осциллографа с функциями анализатора качества электроэнергии Fluke 435. При проведении экспериментальных исследований выполнялись измерения мгновенных значений параметров электроэнергии и коэффициента несинусоидальности формы кривой напряжения (THD). Видеокадры измерений комплексом Fluke 435 в процессе проведения экспериментальных исследований электрических параметров судовой сети представлены на рис. 7.

Электрические измерения проводились при работе вентильного ДГ при различных значениях нагрузки на ГРЩ и частоты вращения вентильного ДГ. Мгновенные значения напряжения при минимальной частоте вращения ДГ с разной нагрузкой приведены на рис. 8.



Рис. 7. Видеокadres измерений комплексом Fluke 435 электрических параметров судовой сети в процессе проведения экспериментальных исследований

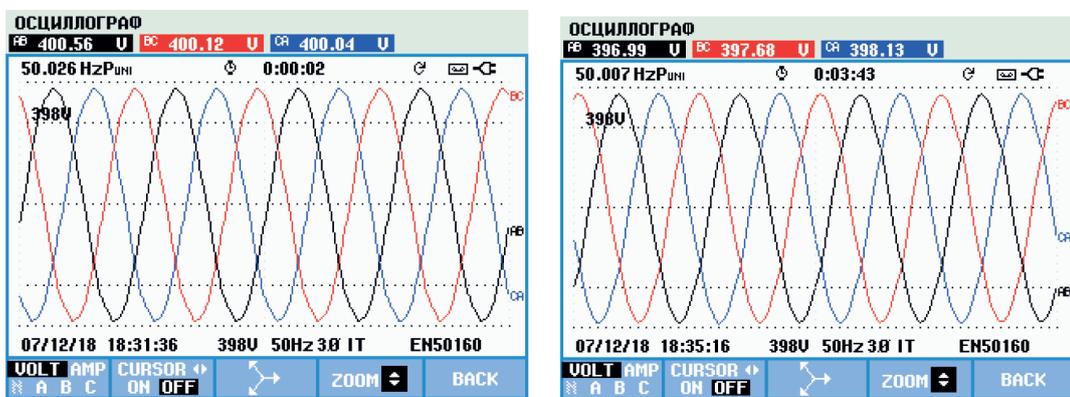


Рис. 8. Мгновенные значения напряжения на ГРЩ при $n_{\text{ДГ}} = 1250 \text{ мин}^{-1}$ и $P_{\text{сэс}} = 2 \text{ кВт}$; $P_{\text{сэс}} = 38 \text{ кВт}$

В ходе проведения экспериментальных исследований выполнялись непрерывные измерения коэффициента несинусоидальности формы кривой напряжения и тока (*THD*) в судовой сети при работе вентильного ДГ в установившемся режиме при частоте вращения $n = 1250$ и 1500 мин^{-1} и изменении нагрузки от 2 до 38 кВт. Значение коэффициента несинусоидальности формы кривой напряжения и тока (*THD*), измеренное в процессе проведения экспериментальных исследований, приведено на рис. 9.

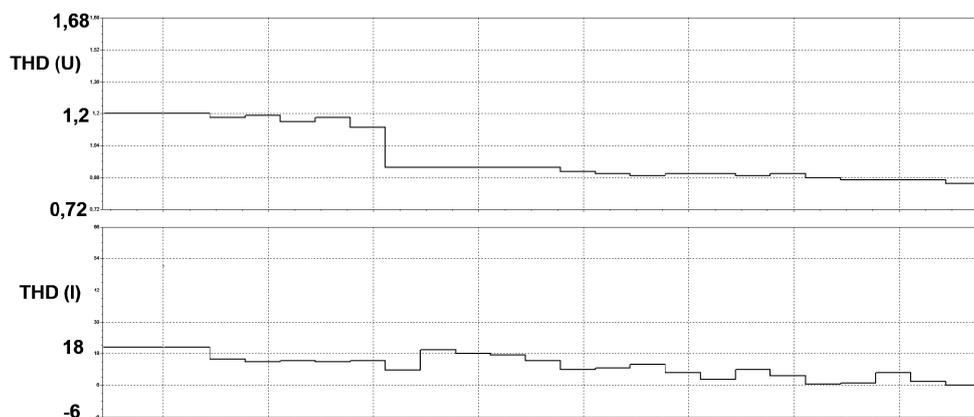


Рис. 9. Значение коэффициента несинусоидальности формы кривой напряжения THD на шинах ГРЩ при работе вентильного ДГ с переменными частотой вращения и нагрузкой

Результаты экспериментальных исследований показали, что при изменении частоты вращения вентильных ДГ с 1250 до 1500 мин⁻¹ и нагрузки от нуля до номинальной величины значения напряжения и частоты тока на шинах ГРЩ оставались постоянными, равными, соответственно, 395–400 В и 50 Гц. Значение коэффициента несинусоидальности формы кривой напряжения (*THD*) на шинах ГРЩ во всех режимах эксплуатации вентильного ДГ не превышало 1,2 %. Таким образом, вентильный ДГ переменной частоты вращения целесообразно применять как в автономных СЭС с распределением электроэнергии на переменном токе, так и на судах с распределением электроэнергии на постоянном токе в единых судовых электроэнергетических системах [13]–[15].

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования и испытаний можно сделать следующие выводы:

1. На грунтоотвозной шаланде «Сильная» пр. НВ600В впервые в отечественном судостроении успешно внедрена СЭС с вентильными ДГ переменной частоты вращения переменного тока. Для реализации вентильных ДГ был дополнительно установлен ПП, фильтры, проведена настройка системы регулирования частоты вращения приводного дизеля и модернизация ГРЩ.

2. Применение вентильных ДГ в составе СЭС позволяет уменьшить количество генераторных агрегатов, повысит их экономичность и моторесурс. В разработанной СЭС на базе вентильных ДГ возможна реализация при автономной и параллельной работе как традиционного способа регулирования приводного дизеля с поддержанием постоянства частоты вращения, так и оптимального регулирования частоты вращения в функции изменения нагрузки.

3. Проведенные швартовные и ходовые испытания показали, что вентильный ДГ во всех режимах эксплуатации СЭС работает устойчиво, переход на вентильный режим эксплуатации ДГ и обратно происходит без обесточивания и изменения значений напряжения и частоты.

4. В установившихся режимах работы вентильных ДГ во всем диапазоне изменения частоты вращения и нагрузки параметры электроэнергии (напряжение и частота тока) на шинах ГРЩ поддерживаются постоянными. Качество вырабатываемой электроэнергии при работе вентильного ДГ соответствует требованиям РС. Коэффициент несинусоидальных искажений формы кривой напряжения *THD* при работе вентильного ДГ на судовую сеть не превышал 1,2 % во всех режимах эксплуатации.

5. Одним из результатов успешных испытаний вентильного ДГ явилось введение РС в «Правила классификации и постройки морских судов» (ред. 2019 г.) новой гл. 23 «Специальные требования к вентильным генераторным агрегатам».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовая электростанция с вентильными дизель-генераторами переменной частоты вращения / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

2. Григорьев А. В. Первый отечественный судовой вентильный дизель-генераторный агрегат переменного тока / А. Григорьев, В. Фатов, С. Малышев // Морской флот. — 2018. — № 5 (1539). — С. 40–42.

3. Куколев А. А. Классификационные требования, предъявляемые к судовым дизель-генераторам / А. А. Куколев // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2017. — № 2 (19). — С. 24–26.

4. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 39–43.

5. Бурмакин О. А. Имитационная модель судовой электростанции / О. А. Бурмакин, М. П. Шилов, Ю. С. Малышев, С. В. Попов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 48. — С. 273–280.

6. Вишнеvский Л. В. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Л. В. Вишнеvский [и др.] // *Электромашиностроение и электрооборудование*. — 2007. — № 68. — С. 26–29.

7. Григорьев А. В. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова* — 2016. — № 1 (35). — С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

8. Коробко Г. И. Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе / Г. И. Коробко, О. С. Хватов, И. Г. Коробко // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. — 2017. — № 1. — С. 55–61.

9. Григорьев А. В. Оптимальная регулировочная характеристика дизель-генераторного агрегата / А. В. Григорьев // *Электросистемы*. — 2006. — № 1 (13). — С. 23–25.

10. Сугаков В. Г. Внешняя форсировка систем возбуждения судовых синхронных генераторов / В. Г. Сугаков [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2015. — № 3. — С. 103–111.

11. Алаев А. В. Распределение реактивной мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов / А. В. Алаев, П. А. Дараган, Р. А. Байбаков // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2016. — № 2 (79). — С. 70–74.

12. Романовский В. В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

13. 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.

14. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona [et al.] // *Energy Conversion and Management*. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080

15. Zahedia B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems / B. Zahedia, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // *Journal of Power Sources*. — 2014. — Vol. 255. — Pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

REFERENCES

1. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship electric power plant with valve diesel-generators of variable rotation speed.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-193-201.

2. Grigoryev, A., V. Fatov, and S. Malyshev. “Perviy otechestvenniy sudovoy ventilniy dizel-generatorniy agregat peremennogo toka.” *Morskoy flot* 5(1539) (2018): 40–42.

3. Kukolev, A. “Classification societies requirements for diesel generators.” *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 2(19) (2017): 24–26.

4. Grigoryev, A. V., and V.Yu. Kolesnichenko. “Improving the efficiency of marine diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 39–43.

5. Burmakin, O. A., M. P. Shilov, Y. S. Malyshev, and S.V. Popov. “A ship power plant simulation model.” *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 48 (2016): 273–280.

6. Vishnevskii, L. V., A. M. Veretennik, I.P. Kozyrev, and I.E. Voitetskii. “Vklyuchenie sinkhronnykh generatorov v mnogoagregatnyuyu sudovuyu elektro-stantsiyu.” *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* 68 (2007): 26–29.

7. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. “Opportunities of introduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.

8. Korobko, G. I., O. S. Khvatov, and I. G. Korobko “Designing and modelling of variable speed diesel generators for ship unified electric power systems.” *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 1 (2017): 55–61.

9. Grigoryev, A. V. “Optimalnaya regulirovochnaya kharakteristika dizel-generatornogo agregata.” *Elektrosistemy* 1(13) (2006): 23–25.
10. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, Y. S. Malyshev, A. A. Toshchev, and I. V. Sychushkin. “External boost of excitation systems of marine synchronous generators.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 103–111.
11. Alaev, V. V., P. A. Daragan, and R.A. Baibakov. “Distribution of reactive power of ship synchronous generators.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(79) (2016): 70–74.
12. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. “Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
13. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabrielli, 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.
14. 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.
15. Zahedi, Bijan, Lars E. Norum, and Kristine B. Ludvigsen. “Optimized efficiency of all-electric ships by DC hybrid power systems.” *Journal of power sources* 255 (2014): 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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 17 июля 2019 г.
 Received: July 17, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITHOUT EXTERNAL PHASE-SHIFTING DEVICES FOR SHIP AUTOMATION SYSTEMS

A. B. Karakaev, A. V. Kostenko

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

It is shown that to date, the single-phase asynchronous motors (SPAM) without external phase-shifting device (PSD), a precise description of physical processes in which exists only in the theoretical form, are used in the modern vessel automation systems. A new mathematical model of such electric motor is offered. The currently existing mathematical models do not include an algebraic description of electromagnetic processes in the steady operation mode of an electric motor, and take into account only their influence in the transitional processes. The necessity to include such calculation at the mathematical modeling of small size SPAM is established.

For these purposes, a new mathematical model that considers the transients influence in all operation modes of the asynchronous electric machine is proposed. The standard approaches to the mathematical modeling of single-phase asynchronous motors are analyzed, the conclusion on impossibility of their use for calculations of electric machines without external PSD for ship automation systems without considering transitional processes in these engines in steady mode of their operation is made. The solution of this problem is topical for ship and shore automation systems, since the equations obtained during the study assist to correctly estimate the loss values in the single-phase asynchronous motors, on which the main part of the ship's automatic control systems is being built. To explain the phenomena occurring in the electric motor, a well-known schematic diagram of SPAM without external PSD is presented. The result is a new mathematical model describing the electromagnetic processes occurring in the single-phase asynchronous motor in a steady mode, as well as the resulting mathematical model makes it possible to calculate the electromechanical transients occurring in SPAM without PSD.

Keywords: single-phase asynchronous motors, mathematical model, phase-shifting devices.

For citation:

Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. "A mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 776–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785.

УДК 621.3.01(076)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ВНЕШНИХ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

А. Б. Каракаев, А. В. Костенко

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

Показано, что на сегодняшний день на судах морского и речного флота в системах автоматизации все более активно применяются однофазные асинхронные двигатели без внешних фазосдвигающих устройств, точное описание физических процессов в которых существует лишь теоретически, предлагается новая математическая модель такого электродвигателя. Существующие в настоящее время математические модели не включают алгебраического описания электромагнитных процессов в установившемся режиме работы электродвигателя, а учитывает только их влияние в переходных процессах. Установлена необходимость включения такого расчета при выполнении математического моделирования однофазных асинхронных двигателей небольших размеров. Для этих целей в статье предложена новая математическая модель, которая учитывает влияние переходных процессов во всех режимах работы асинхронной электрической машины. Проанализированы типовые методы и подходы

к построению математических моделей, сделан вывод о невозможности их использования применительно к расчетам электрических машин без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики и без учета переходных процессов, протекающих в таких двигателях в установившемся режиме их работы. Подчеркивается, что решение данной задачи является актуальным для судовых и береговых систем автоматики, так как полученные в ходе исследования уравнения помогают корректно оценивать значения потерь в однофазных асинхронных электродвигателях, на которых строится основная часть систем автоматического управления судна. Для пояснения явлений, происходящих в электромоторе, приведена общеизвестная принципиальная схема однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств. Результатом работы является получение новой математической модели, описывающей электромагнитные процессы, протекающие в однофазных асинхронных двигателях в установившемся режиме. Полученная математическая модель дает возможность расчета электро-механических переходных процессов, протекающих в них.

Ключевые слова: однофазные асинхронные двигатели, математическая модель, фазосдвигающие устройства.

Для цитирования:

Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 776–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-776-785.

Введение (Introduction)

Как показывает опыт проведенных исследований, разработка специальных однофазных асинхронных двигателей (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ) с высокими энергетическими показателями для большинства сфер народного хозяйства, а также судостроения является все более актуальной [1]. В настоящее время проводятся исследования в области применения специального однофазного асинхронного двигателя для судовых вентиляционных систем, в частности в коаксиальных системах вентиляции, а также в других системах автоматики. Использование сдвоенного ОАД для судовой вентиляции позволяет уменьшить массогабаритные показатели действующих систем, а также улучшить показатели надежности и живучести вентиляционного устройства и судна в целом. Внедрение в современные системы вентиляции специального ОАД может внести ощутимый вклад в их эффективность, что играет ключевую роль в жизнеобеспечении экипажа судов [2].

Методы изучения ОАД с питанием от однофазной и трехфазной сетей разрабатываются и улучшаются на протяжении многих лет, однако проблемы математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов не решались так же быстро в связи с несовершенностью вычислительных методов, поэтому теоретическое описание процессов в ОАД превосходит математическое [3]. Конденсаторы, используемые для фазового сдвига, позволяют добиться значительного увеличения крутящего момента, но несмотря на простоту их использования, имеются серьезные недостатки. Например, включение конденсаторов может вызвать резонансные явления [4], которые опасны как для самих конденсаторов, так и для пусковой обмотки двигателя. Поэтому целесообразно вести разработку математической модели ОАД без ВФСУ.

Общеизвестно, что к числу общих для всех однофазных асинхронных двигателей малой мощности особенностей, которые необходимо учитывать при обосновании математической модели и ее анализе, относятся следующие:

1. Большие относительные значения активного и реактивного сопротивления обмотки статора. Так, в отличие от асинхронных машин средней и большой мощности, активное сопротивление статора имеет один порядок с реактивным, а иногда и превышает его в 2–3 раза, что необходимо учитывать при оценке характеристик двигателя.

2. Резкое снижение электромагнитной постоянной времени из-за относительно большого активного сопротивления. Электромагнитная постоянная времени T меньше электромеханической постоянной времени T на порядок и более. В связи с этим значение переходных электромагнитных процессов по сравнению со значением электромеханических процессов незначительно.

3. Малое число пазов на статоре, а значит, и малое число пазов на полюс и фазу, что обуславливает большое влияние обмоточных и зубцовых высших гармонических, при отсутствии применения специальных конструктивных мер.

4. Значительное влияние на выходные показатели и свойства в симметричных машинах различного рода технологической асимметрии. У неуправляемых асинхронных микродвигателей это может привести к колебаниям пускового момента при различных угловых положениях ротора.

5. Значительный по величине намагничивающий ток и наличие обратно вращающегося поля, которое обуславливает низкий КПД у большинства ОАД.

6. Необходимость приспособления в ряде случаев исполнения двигателей к конструкции механизмов, например, совмещение некоторых узлов машины с рабочими органами устройств.

7. Сложность теплового расчета микродвигателей, связанная с разветвленностью путей передачи тепла и необходимостью учета способа крепления и расположения в механизме.

8. Наличие асимметрии, чаще всего электрической, обусловленной схемой включения (для расчета характеристик таких двигателей приходится использовать методы симметричных составляющих, двух вращающихся полей или теорию двух реакций).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для малых электрических машин отношение активных сопротивлений контуров и индуктивных сопротивлений рассеяния к индуктивному сопротивлению намагничивания значительно больше, чем для крупных машин. Поэтому упрощения, возможные в теории крупных машин, связанные с пренебрежением первичными параметрами, совершенно недопустимы для малогабаритных электрических двигателей. По указанной причине векторные диаграммы не могут использоваться для представления основных закономерностей в электрических микромашинах. Здесь наиболее целесообразными и эффективными являются алгебраические методы исследования, в которых составляются уравнения ЭДС машины с последующим их решением относительно токов. Это позволяет получить выражения для основных характеристик машин в функции приложенных напряжений и ее параметров и, таким образом, наиболее рационально подойти к вопросам проектирования.

Теоретический анализ электрических микромашин переменного тока выполняется такими же методами, как и крупных машин. Причем для исследования и расчета характеристик и показателей можно использовать наиболее распространенные методы, в том числе теорию вращающихся полей, метод симметричных составляющих или теорию двух реакций. Наиболее целесообразным для исследования ОАД представляется теория двух реакций якоря [5], в использовании которой накоплен значительный опыт, в том числе для двигателей, подобных исследуемому. Согласно теории двух реакций, любая несимметричная система токов, магнитодвижущих сил (МДС) и напряжений представляет собой составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям. При расчетах рассматриваются МДС и магнитные потоки отдельно по каждой из осей. Причем любую симметричную обмотку ротора заменяют двумя взаимно перпендикулярными с одинаковыми параметрами (активными и индуктивными). При этом в машине с короткозамкнутым ротором токи i_d и i_q являются проекциями результирующего вектора тока и МДС. Все параметры обмоток приводят к обмотке статора, совпадающей с продольной осью машины. Ход решения является следующим: составляются уравнения напряжений и ЭДС для всех контуров, уравнения решаются относительно токов обмоток, а затем выводится выражение для электромагнитного момента двигателя.

В настоящее время расчет двигателя на основе метода конечных элементов является наиболее достоверным способом анализа его параметров и нелинейных зависимостей. Этот метод необходим при проектировании прецизионных приводов. Наиболее эффективный результат, как показывают исследования, будет получен тогда, когда при расчете двигателя будет достигнута реализация большого количества соотношений конструктивных параметров. В случае широкой области поиска анализ всех сопоставляемых вариантов только методом конечных эле-

ментов неэффективен вследствие значительных затрат машинного времени, необходимых для расчета одного варианта. В особенности это справедливо для расчета пространственных трехмерных магнитных полей двигателя [6]. По трудоемкости теория двух реакций равноценна методу симметричных составляющих. Более того, выражения для токов, найденные методом симметричных составляющих, можно получить из уравнения ЭДС обобщенной машины в осях d и q , если рассматривать переход к симметричным составляющим как преобразование координат. Учитывая данные обстоятельства, целесообразно использовать для теоретических исследований электромагнитных процессов в ОАД теорию двух реакций.

Асинхронная машина — многообмоточная, при ее расчетах необходимо учитывать контуры вихревых токов статора и ротора. Очевидно, не может быть точного математического описания процессов электромеханического преобразования энергии в реальной электрической машине, так как каждый из источников пространственных гармоник является источником пространственно-полевых помех, а источников гармоник в электрическом поле имеется несколько десятков [7]. В связи с этим используют уравнения, составленные на основе определенного ряда предположений, которые заменяют реальную машину идеализированной. Применяются следующие допущения:

1. Поскольку в исследуемом двигателе предлагается применять нормальные распределенные обмотки с фазными зонами $2\pi/3$, выполненные с соответствующими сокращениями шагов, и хорошо известно, что в этом случае пространственные высшие гармонические МДС, потоки и индукции достигают малых значений и практически не оказывают влияние на работу машины, данное обстоятельство позволяет принять в теоретических расчетах допущение, что МДС, потоки, индукции распределены в пространстве по законам косинуса или синуса.

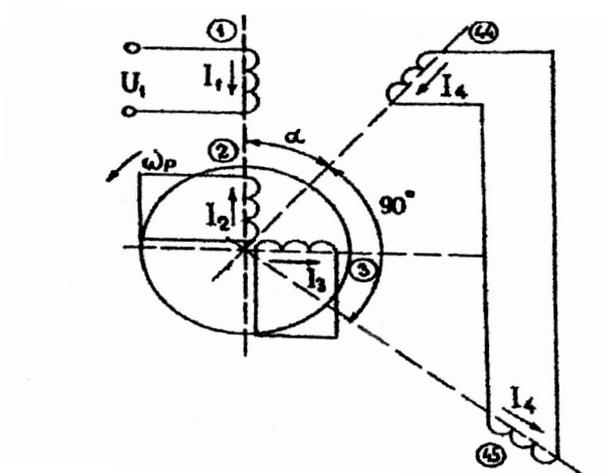
2. Известно, что современные питающие сети отличаются весьма высоким *клирфактором*. Это позволяет сделать допущение, что ЭДС, напряжения, токи и потоки изменяются во времени по синусоидальным (косинусоидальным) законам.

3. Известно, что в подавляющем большинстве случаев питающая сеть в сотни раз по мощности превосходит мощность отдельного электродвигателя. Поэтому можно считать питающую сеть обладающей бесконечно большой мощностью, т. е. полагать внутреннее сопротивление источника напряжения, равным нулю.

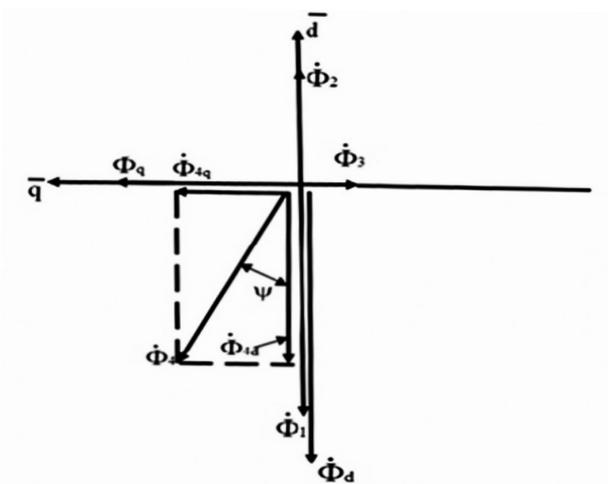
4. Асинхронные электродвигатели малой мощности часто работают в насыщенном режиме. Однако, если не пренебречь этим явлением, то нельзя пользоваться линейной зависимостью между потоками и МДС. Кроме того, в этом случае результирующий поток, создаваемый несколькими контурами, невозможно определить сложением потоков отдельных контуров. Для того чтобы было можно пренебречь насыщением, с целью его учета изменяют параметры машины (берутся «насыщенные» их значения). В пределах рассматриваемого режима работы двигателя его параметры остаются практически неизменными, что и позволяет применять *принцип наложения*.

Двигатель имеет симметричные круглые расслоенные магнитопроводы статора и ротора. В пазах ротора уложена обычная симметричная короткозамкнутая обмотка. В пазах магнитопровода статора размещены три однофазные распределенные обмотки. На рисунке *a* приведена электрическая схема рассматриваемой машины. Здесь 1 — однофазная распределенная обмотка возбуждения, подключаемая к сети; 44 и 45 — две однофазные распределенные обмотки, соединенные последовательно друг с другом. 2 и 3 — эквивалентные обмотки. I_1 — ток обмотки возбуждения. I_2 и I_3 — токи соответствующих эквивалентных обмоток. I_4 — ток в однофазных распределенных обмотках. Оси обмоток 44 и 45 сдвинуты относительно друг друга на 90 эл. град. Обмотка 45 имеет меньшее количество витков по сравнению с обмоткой 44 и предназначена для увеличения суммарного пространственного сдвига потоков в двигателе, обеспечивающего образование вращающегося поля. Она включается последовательно-встречно по отношению к обмотке 44 и исключает режим короткого замыкания, который может возникнуть, если ее исключить и замкнуть обмотку 44 накоротко. Короткозамкнутая обмотка ротора представлена на схеме двумя эквивалентными обмотками 2 и 3 . Направления токов указаны соответствующими стрелками.

а)



б)



Электрическая схема (а)
и диаграмма магнитных потоков электродвигателя (б)

При такой конструктивной схеме двигатель будет работать следующим образом: ток в обмотке возбуждения I создает пульсирующее во времени магнитное поле возбуждения ΦI , направленное в пространстве по продольной оси d . Это поле наводит в обмотках 2, 44 и 45 соответствующие ЭДС и так как контуры указанных обмоток замкнуты, в них протекают, соответственно, токи I_2 и I_4 . Ток I_4 создает в обмотках 44 и 45 МДС F_{44} и F_{45} , которые, складываясь в пространстве, образуют результирующую МДС с осью, смещенной на некоторый угол относительно оси обмотки I . Результирующая МДС, как показано на рисунке б, создает магнитный поток Φ_4 , имеющий продольную Φ_{4d} и поперечную Φ_{4q} составляющие. Продольная составляющая Φ_{4d} , складываясь с потоком Φ_1 и потоком обмотки 2 — Φ_2 , образует общий продольный поток двигателя Φ_d . Поперечная составляющая наводит в обмотке 3 соответствующую ЭДС, под действием которой течет ток I . Поперечный поток статора, складываясь с потоком обмотки 3 — Φ_3 , образует поперечный поток машины Φ_q . Токи I_1 и I_4 сдвинуты относительно друг друга по фазе во времени, так как между обмотками контуров этих токов имеются трансформаторные связи. Таким образом, при неподвижном роторе в двигателе имеются два потока, сдвинутые относительно друг друга как в пространстве, так и во времени, что приводит к образованию вращающегося поля. Взаимодействие вращающегося поля с токами обмотки ротора обеспечивает создание некоторого пускового момента, под влиянием которого ротор начнет вращаться.

Для составления уравнений равновесия напряжений выбираем условные положительные направления таков в соответствии с рисунком *a* (там же точками обозначены начала обмоток). Ориентация потоков показана на рисунке *б*. За положительное направление отсчета углов принимаем направление по ходу стрелки часов, а за положительное направление вращения ротора — направление против хода стрелки часов. Основой для составления уравнений ОАД является общеизвестное уравнение ЭДС для контура, движущегося в переменном внешнем магнитном поле, согласно которому приложенное к контуру напряжение равно падению напряжения в активном сопротивлении сумме противо-ЭДС, трансформации и ЭДС вращения. В исследуемом ОАД, в соответствии с теорией двух реакций, можно выделить четыре контура: обмотки возбуждения, обмотки ротора 2, обмотки ротора 3 и контур, соединенных последовательно-встречно, дополнительных обмоток.

Результаты (Results)

В соответствии с принципом суперпозиции поперечные составляющие магнитных потоков дополнительных обмоток складываются, а продольные — вычитаются [8]:

$$\begin{aligned}\Phi_q &= \Phi_{44q} + \Phi_{45q}; \\ \Phi_d &= \Phi_{44d} + \Phi_{45d}.\end{aligned}\tag{1}$$

С учетом (1) уравнения равновесия напряжении контуров двигателя для установившегося режима работы запишутся в общем виде следующим образом:

$$\begin{aligned}j\omega\Psi_d + (r_1 + jx_1)I_1 &= U_1; \\ j\omega\Psi_d - v\omega\Psi_d + (r'_2 + jx'_2)I'_2 &= 0; \\ j\omega\Psi_d - v\omega\Psi_d + (r'_3 + jx'_3)I'_3 &= 0; \\ j\omega\Psi_d (\cos \alpha - \sin \alpha) + j\omega\Psi_d (\cos \alpha - \sin \alpha) + \\ + \left(\frac{r_{44} + jx'_{44}}{k_{44}} + \frac{r'_{45} + jx'_{45}}{k_{45}} \right) I_4 &= 0.\end{aligned}\tag{2}$$

Как правило, при расчете потерь при несинусоидальном напряжении питания рассматривается разложение потерь на составляющие. [9] Учет потерь в стали и падения напряжения в намагничивающем контуре не только главным индуктивным сопротивлением x_0 , но и на активном сопротивлении r_0 [10] приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}j\omega\Psi_d &= (r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{r_{44}} + \frac{\sin \alpha}{r_{45}} \right) \right]; \\ j\omega\Psi_d &= (r_0 + jx_0) \left[I'_3 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{r_{44}} + \frac{\sin \alpha}{r_{45}} \right) \right];\end{aligned}\tag{3}$$

Тогда система уравнений (2) с учетом (3) примет вид:

$$\begin{aligned}(r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r_1 + jx_1)I_1 &= U_1; \\ (r_0 + jx_0) \left[I_1 + I'_2 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] - \\ - v(r_0 + jx_0) \left[I'_3 + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r'_2 + jx'_2)I'_2 &= 0;\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & (r_0 + jx_0) \left[I_3' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) \right] + \\
 & + v(r_0 + jx_0) \left[I_1 + I_2' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + (r_3' + jx_3') I_3' = 0; \\
 & (r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha) \left[I_1 + I_2' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + \\
 & + (r_0 + jx_0)(\cos \alpha + \sin \alpha) \left[I_3' + I_4 \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] + \\
 & + I_4 \left(\frac{r_{44}' + jx_{44}'}{k_{44}} + \frac{r_{45}' + jx_{45}'}{k_{45}} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Раскрытие квадратных скобок и преобразования приводят к окончательному виду уравнений равновесия напряжений контуров:

$$\begin{aligned}
 & [(r_1 + r_0) + j(x_0 + x_1)] I_1 + (r_0 + jx_0) I_2' + (r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) I_4 = U_1; \\
 & (r_0 + jx_0) I_1 + [(r_2' + r_0) + j(x_0 + x_0')] I_2' - v(r_0 + jx_0) I_3' + \\
 & + \left[(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} + \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) - v(r_0 - jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) \right] I_4 = 0; \\
 & v(r_0 + jx_0) I_1 + v(r_0 + jx_0) I_2' + [(r_3' + r_0) + j(r_3' + r_0)] I_3' + \\
 & + \left[(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{45}} + \frac{\sin \alpha}{k_{44}} \right) + v(r_0 + jx_0) \left(\frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] I_4 = 0; \\
 & [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_1 + [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_2' + \\
 & + [(r_0 + jx_0)(\cos \alpha - \sin \alpha)] I_3' + \\
 & + \left[\frac{(r_{44}' + r_0) + (x_{44}' + x_0)}{k_{45}} + \frac{(r_{45}' + r_0) + j(x_{45}' + x_0)}{k_{45}} \right] I_4 = 0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Обсуждение (Discussion)

При теоретических и расчетных исследованиях следует иметь в виду еще одно существенное обстоятельство. Дело в том, что вследствие неточностей существующих методов теплового и электрического расчетов и неизбежных погрешностей при изготовлении электрических машин окончательные характеристики и параметры, как правило, устанавливаются после изготовления и всесторонних испытаний опытных образцов. Таким образом, при проектировании малых электрических машин значимость методов расчета, особенно теплового, принятых в крупном электромашиностроении, в какой-то мере, снижается.

Как показал анализ, наиболее перспективной схемой ОАД без ВФСУ обладает двигатель, в котором реализуется принцип получения временного фазового сдвига потоков за счет трансформаторной связи между рассредоточенными обмоткой возбуждения и дополнительными обмотками, уложенными в симметричный магнитопровод статора [11].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ОАД без ВФЗУ является сложной электромеханической системой, для расчета которой необходимо построение корректной математической модели, учитывающей все ее параметры при всех возможных режимах работы двигателя. Довольно часто в современном математическом моделировании двигателей малых размеров помимо рассмотренных допущений, в ходе теоретических расчетов пренебрегают потерями в стали двигателя. Однако это в ряде случаев приводит к значительным погрешностям при расчете характеристик двигателя. С учетом последнего, допущение об отсутствии потерь в стали двигателя не принимается. Как показали результаты предварительных исследований ОАД, для микромашин мощностью 6–7 Вт и ниже доля потерь в стали составляет значительную величину и соизмерима с полезной мощностью. Полученные уравнения позволяют описать электромагнитные процессы в ОАД в установившемся режиме работы. Разработанная математическая модель может быть использованы при расчете и проектировании комплексных систем автоматического управления судном.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Расчетным способом получена система уравнений (5), которая описывает электромагнитные процессы в ОАД без ВФЗУ в установившемся режиме. При необходимости данная математическая модель может быть использована также для расчета электромеханических переходных процессов.
2. Разработанная математическая модель включает в расчет при математическом моделировании потери в стали и падения напряжения в намагничивающем контуре не только в главном индуктивном сопротивлении x_0 , но и на активном сопротивлении r_0 . Этим зачастую пренебрегают при выполнении теоретического расчета маломощных ОАД без ВФЗУ, в результате чего уменьшается погрешность при расчетах.
3. ОАД без ВФЗУ является наиболее оптимальным электродвигателем для систем судовой автоматики ввиду отсутствия в ее составе дополнительного инерционного звена — конденсатора для фазового сдвига.
4. На основе анализа сделан вывод об оптимальности достижения фазового сдвига в рассматриваемом двигателе за счет трансформаторной связи между рассредоточенной обмоткой возбуждения и дополнительными обмотками, уложенными в симметричный магнитопровод статора, а, соответственно, и о необходимости ухода от использования конденсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каракаев А. Б.* Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А.В. Костенко // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». — СПб.: Издательство ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 91–92.
2. *Каракаев А.Б.* Применение специального асинхронного электродвигателя для судовых вентиляционных систем / А.Б. Каракаев, Е. С. Хохлов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214.
3. *Malyar V.* Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance / V. Malyar, A. Malyar // Przegląd Elektrotechniczny. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08.
4. *Alshamasin M. S.* Optimization of the Performance of Single -Phase Capacitor-Run Motor / M. S. Alshamasin // American Journal of Applied Sciences. — 2009. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 745–751. DOI: 10.3844/ajassp.2009.745.751.

5. Друбецкий А. Е. Аппроксимация универсальной магнитной характеристики для моделирования тяговых электрических машин / А. Е. Друбецкий // Наука и прогресс транспорта. — 2017. — № 1 (67). — С. 106–116. DOI: 10.15802/stp2017/94031.

6. Баранов М. В. Разработка математической модели высокомоментного синхронного двигателя при проектировании прецизионных приводов / М. В. Баранов, О. А. Корчагин // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 8 (20). — С. 23.

7. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 2001. — С. 233.

8. Каракаев А. Б. Учет потерь в стали при расчете характеристик однофазного асинхронного двигателя без фазосдвигающих устройств / А. Б. Каракаев // В сб.: Электромеханические преобразователи и устройства. Деп. в Информэлектро № 300 ЭТ-Д83 Деп. реф., опубли. в указателе ВИНТИ «Депонированные научные работы». — 1984. — № 2. — С. 156.

9. Батоврин А. А. Электромагнитный момент однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств / А. А. Батоврин, А. Б. Каракаев // Электромеханические преобразователи и устройства: сб. науч. тр. — 1985. — № 5. — С. 156.

10. Казаков Ю. Б. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 5. — С. 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046.

11. Пат. 2680372 Российская Федерация, МПК H02J 1/00. Способ получения фазового сдвига напряжений генераторов и устройство использования фазового сдвига для преобразования механической энергии в эллипсоидное излучение / Г. Л. Багич; заяв. и патентообл. Г. Л. Багич (RU). — № 2017139643; Заявлено 14.11.2017; Опубли. 20.02.2019, Бюл. № 5.

REFERENCES

1. Karakaev, A. B., and A. V. Kostenko. “Razrabotka i primeneniye odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki.” *Sbornik tezisov natsional’noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Izdatel’stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. 91–92.

2. Karakaev, A. B., and E. S. Khokhlov. “Application of special design asynchronous electric motor for the ship ventilation system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214.

3. Malyar, Vasyl, and Andriy Malyar. “Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance.” *Przeglad Elektrotechniczny* 94 (2018): 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08.

4. Alshamasin, Mahdi Salman. “Optimization of the Performance of Single -Phase Capacitor-Run Motor.” *American Journal of Applied Sciences* 6.4 (2009): 745–751. DOI: 10.3844/ajassp.2009.745.751.

5. Drubetskiy, A. Yu. “Approximation of universal magnetic characteristic for modelling electric traction machines.” *Nauka i progress transporta* 1(67) (2017): 106–116. DOI: 10.15802/stp2017/94031.

6. Baranov, M. V., and O. A. Korchagin. “High torque synchronous motor mathematical model development under the design of precision drives.” *Engineering Journal: Science and Innovation* 8(20) (2013): 23.

7. Kopylov, I. P. *Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskikh mashin*. M.: Vysshaya shkola, 2001.

8. Karakaev, A. B. “Uchet poter’ v stali pri raschete kharakteristik odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez fazosdvigayushchikh ustroystv.” *Elektromekhanicheskie preobrazovateli i ustroystva* 2 (1984): 156.

9. Batovrin, A. A., and A. B. Karakaev. “Elektromagnitnyi moment odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv.” *Elektromekhanicheskie preobrazovateli i ustroystva* 5 (1985): 156.

10. Kazakov, Yu. B., and N. K. Shvetsov. “Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage.” *Vestnik IGEU* 5 (2015): 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046.

11. Bagich, G. L. RU 2 680 372 C1, IPC H 02 J 1/00. Sposob polucheniya fazovogo sdviga napryazhenii generatorov i ustroystvo ispol’zovaniya fazovogo sdviga dlya preobrazovaniya mekhanicheskoi energii v ellipsoidnoye izlucheniye. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракаев Александр Бахтыреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru

Костенко Александр Васильевич — аспирант
Научный руководитель:
Каракаев Александр Бахтыреевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: svarshikrylit@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Kostenko, Aleksandr V. — Postgraduate
Supervisor:
Karakaev, Aleksandr B.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: svarshikrylit@gmail.com

Статья поступила в редакцию 28 мая 2019 г.

Received: May 28, 2019.

METHOD OF ENERGY-EFFICIENT MANAGING THE SHIP'S DIESEL-GENERATOR SETS

V. V. Sakharov, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

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

For marine diesel generator sets (DGS), working for a total load of variable modes of active and reactive power, their economy greatly depends on the time of day, weather conditions, ambient temperature, location, as well as flow characteristics of each set. While the total power consumed by ship systems and objects of various purposes can vary widely. In these circumstances, maintenance of efficient operation modes of DGS is possible due to the optimal distribution of the load between the concurrent DGS, at which generated electricity cost is minimized. The task of optimizing the load on generators is complicated by the significant differences in the technical, operating and economic characteristics of individual units of the system, as well as its analytical description in the presence of various regulators of complexity degree. In the presence of powerful computing setting, advanced tools and methods of numerical optimization the implementation of energy-efficient modes of DGS at a qualitatively new level through the use of digital technologies is offered to ensure.

Energy-efficient algorithm of load balancing between concurrent DGS using the optimality principle of R. Bellman, allowing instead of one complex task of energy-saving for a group of k generators to consistently solve k simple task of energy-saving for each generator separately, is developed. Unlike the existing ways to implement the energy-efficient modes, DGS method is applicable for digital management (on-line) of ship's current energy network, not sensitive to nonlinearity of flow characteristics of its sets, as well as to the issue of "dimensionality curse" of ship's network. In the algorithm, the search for optimal solutions is proposed to carry out using rotation and sequential analysis technology elements in each diagonal of a matrix that simplifies the calculations. The algorithm effectiveness and correctness of the obtained results are confirmed by a specific example.

Keywords: diesel-generator sets, parallel work, networking, optimization, fuel consumption, flow characteristics, rotation matrix.

For citation:

Sakharov, Vladimir V., Alexander A. Chertkov, and Sergey V. Saburov. "Method of energy-efficient managing the ship's diesel-generator sets." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 11.4 (2019): 786–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-786-793.

УДК 681.5

СПОСОБ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров

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

Решается проблема обеспечения экономичности дизель-генераторных агрегатов, работающих на общую нагрузку (ДГА) в режимах с изменяемой активной и реактивной мощностью, в зависимости от времени суток, погодных условий, температуры окружающей среды, местоположения, а также расходных характеристик каждого агрегата. При этом суммарная мощность, потребляемая судовыми системами и объектами различного назначения, может изменяться в широких пределах. В этих условиях поддержание экономичных режимов возможно за счет оптимального распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА, при котором стоимость вырабатываемой электроэнергии минимизируется. Отмечается, что решение данной задачи осложняется тем, что ДГА могут иметь различные настройки расходных характеристик, работать на различных сортах топлива, отличаться по номинальной мощности, техническому состоянию, что связано со сложностями создания математических моделей, адекватных объектам. Предлагается при наличии мощных вычислительных сред, развитых инструментов

и методов численной оптимизации обеспечить реализацию энергоэффективных режимов работы ДГА на качественно новом уровне путем использования цифровых технологий. Построен алгоритм энергоэффективного распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА с использованием принципа оптимальности Р. Беллмана, позволяющего вместо одной сложной задачи энергосбережения для группы, состоящей из k генераторов последовательно решать k простых задач энергосбережения для каждого генератора в отдельности. В отличие от существующих способов реализации энергоэффективных режимов работы ДГА, предлагаемый метод применим для цифрового управления (в режиме «on-line») судовой энергосетью, нечувствителен к нелинейностям расходных характеристик ее агрегатов, а также к вопросу «проклятия размерности» судовой сети. В алгоритме поиск оптимальных решений предлагается осуществлять с использованием оператора вращения массивов и технологии последовательного анализа элементов каждой диагонали матрицы, что обеспечивает упрощение вычислений. Эффективность применения алгоритма и корректность полученных результатов подтверждены конкретным примером.

Ключевые слова: дизель-генераторные агрегаты, параллельная работа, сеть, расход топлива, оптимизация, расходные характеристики, матрицы вращения.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Способ энергоэффективного управления судовыми дизель-генераторными агрегатами / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 786–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-786-793.

Введение (Introduction)

Применение цифровых технологий в решении оптимизационных задач позволяет не только эффективно работать с большими массивами чисел, но и совершенствовать вычислительные алгоритмы, обеспечивать их устойчивость и быструю сходимость итерационных процедур. К такой технологии можно отнести рассматриваемый далее способ, основанный на использовании операции вращения матриц.

В составе электроэнергетических систем современных речных землесосов имеется, как правило, несколько дизель-генераторных агрегатов (ДГА), первичные двигатели которых имеют различные расходные характеристики [1]–[2]. В то же время большое число ограничений и моделей расходных характеристик генераторов электроэнергии речных землесосов, из-за значительных погрешностей аппроксимации квадратичными полиномами, вынуждает к поиску других алгоритмов энергоэффективных решений, адекватных реальному процессу (например, алгоритмов оптимального распределения активной мощности генерирующих источников). Наиболее подходящим методом для осуществления цифрового (on-line) управления энергоэффективностью судовых генераторов является принцип оптимальности Р. Беллмана, для которого нелинейность расходных характеристик генераторов, а также размерность решаемых задач с учетом мощностей современных вычислительных сред не имеют существенного значения [3].

Для судовой электростанции основными эксплуатационными режимами являются режимы, в которых потребляемая активная и реактивная мощности изменяются во времени [4]. Энергоэффективность таких систем может быть повышена за счет снижения потерь электроэнергии как в сетях, так и в преобразователях различных видов энергии в электрическую [5]. Судовые дизель-генераторы имеют нелинейные расходные характеристики, что с позиций теории управления предопределяет возможность повышения энергоэффективности на парциальных режимах. Работа ДГА при широком спектре внешних воздействий (на ходу, стоянке в порту, выполнении различных технологических режимов, изменении температуры воздуха и забортной воды, времени суток и др.) на нагрузках, меньших номинальной, определяет резерв экономии топлива в каждом рейсе, использование которого способствует повышению показателей энергоэффективности судна [6]–[7].

Методы и материалы (Methods and Materials)

При условии, если питание сети обеспечивается одним генератором и потребляемая мощность не превышает его номинальной мощности, в процедуре оптимизации нет необходимости. Если на общую нагрузку работают несколько однотипных генераторов, имеющих идентичные

расходные характеристики, то оптимальному режиму их работы будет соответствовать режим с одинаковым распределением потребляемой сетью мощности между этими агрегатами или, иными словами, когда расходные характеристики этих агрегатов не идентичны, для обеспечения экономической работы генераторов требуется перераспределение нагрузки между ними [8]–[9].

Предложен алгоритм энергоэффективного управления параллельно работающими ДГА с различными расходными характеристиками для реализации такого распределения их на общую нагрузку, которое получается с использованием принципа оптимальности Р. Беллмана. На основе алгоритма построена программа в кодах MATLAB, реализующая этот алгоритм. Расходные характеристики имеют вид нелинейных функций:

$$F_i = f_i(P_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

которые определяются экспериментально. Для аппроксимации характеристик могут использоваться полиномы, сплайн-аппроксимации (при работе ДГА на различных видах топлива), способы функциональной «пригонки» нелинейных характеристик к эксперименту, содержащиеся в вычислительных средах (инструменты «fitting»), вейвлет-аппроксимации [10]–[12]. Все указанные способы с достаточной для практики точностью позволяют аппроксимировать функции (1) по экспериментальным значениям F_i и P_i , где P_i — мощность i -го генераторного агрегата; F_i — стоимость электроэнергии при работе агрегата с мощностью P_i ; n — число генераторов, работающих в сети.

Оптимизация должна производиться с введением ограничений [13], [14]. Ограничения-равенства устанавливаются соотношением (2), согласно которому суммарная мощность, генерируемая k генераторами в любой момент t , должна равняться мощности $P(t)$, потребляемой сетью:

$$P(t) = \sum_{i=1}^k P_i(t), k = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Для реализации энергоэффективного управления требуется минимизировать критерий

$$F(t) = \sum_{i=1}^k f_i(P_i(t)), k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

путем распределения мощности между k параллельно работающими ДГА при соблюдении ограничений. Тогда, с учетом ограничений-неравенств, критерий (3) можно представить в виде:

$$J(k, t) = \min \sum_{i=1}^k f_i(P_i(t)) \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$0 \leq P_1(t) \leq P_{1\max};$$

$$0 \leq P_2(t) \leq P_{2\max};$$

.....

$$0 \leq P_k(t) \leq P_{k\max};$$
(4)

где $P_{i\max}$ — максимальная мощность, развиваемая i -генераторным агрегатом.

Ограничения могут изменяться по разным причинам (например, расход моторесурса, ремонт узлов ДГА и др.).

Применяя метод динамического программирования, выполним минимизацию функционала (4) при соблюдении ограничения (2) путем разделения одной сложной задачи на ряд из k простых задач, подлежащих дальнейшему решению:

$$J(k, P) = \min [f_k(P_k) + J(k-1, P - P_k)], 0 \leq P_k \leq P_{k\max} \quad (5)$$

при $P > 0, k = 2, 3, \dots$, причем $J(1, P) = f_1(P)$ для $P \leq P_{1\max}$.

Решение (5) получим, применяя простое свойство многоступенчатых процессов в данном классе задач, с учетом специфики рассматриваемой задачи. При работе на общую нагрузку все генераторные агрегаты не должны работать в режимах максимальной мощности, иначе процесс поиска минимума функционала качества не имеет смысла. Поэтому требуется формировать группы генераторов по развиваемой мощности в различных комбинациях (сочетаниях). Применяемые в этих

случаях расчетные таблицы (например, из работы [1, с. 132]) сложны в использовании. Для управления процессом в реальном масштабе времени необходим алгоритм с программной реализацией вычислительной процедуры, позволяющей минимизировать ее объем и время выполнения. Такая программная поддержка построена на основе инструментария вычислительной среды MATLAB.

Алгоритм демонстрируется на примере, когда расходные характеристики трех параллельно работающих ДГА, режимы которых подлежат оптимизации согласно (5), заданы полиномами второго порядка следующего вида:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0,035P_1^2 + 2,2P_1 + 90; \\ F_2 &= 0,018P_2^2 + 1,42P_2 + 100; \\ F_3 &= 0,015P_3^2 + 0,90P_3 + 130. \end{aligned} \quad (6)$$

Особенность решения задачи оптимизации с использованием рекуррентных соотношений состоит в приведении расчетных данных F_i к матрицам прямоугольной формы. При этом образуется массив размерности $(M \times N)$, где M — число строк, N — число столбцов ($M \geq N$). Основание массива формируется с помощью оператора «Meshgrid». Оптимальные решения, располагающиеся в диагоналях матриц, выбираются путем вращения массивов с использованием оператора «rot 90». Поиск решений выполняется способом поэлементного анализа элементов каждой диагонали. В результате обеспечивается «просмотр» решений (не только оптимальных) для всех возможных комбинаций генераторов, работающих на общую нагрузку. Ограничения на число генерирующих источников электроэнергии в общем случае не вводятся.

Фрагмент первого блока (подготовки данных) программы, реализованной в файле «sah8.m»:

```
% sah8.m 28.04.2019
% Оптимизация режимов работы судовой электростанции землесоса.
% Применение матриц вращения
% =====
% Подготовка данных.
delt=10;
P1=0:delt:50;
P2=0:delt:70;
P3=0:delt:80;
F1=(0.035*(P1.^2)+2.2*P1+90);
F2=(0.018*(P2.^2)+1.42*P2+100);
F3=(0.015*(P3.^2)+0.90*P3+130);
% pause
```

В блоке подготовки данных приняты следующие обозначения: $delt$ — шаг дискретности задаваемой мощности дизель-генераторов; P_1, P_2, P_3 — векторы дискретных значений мощностей, соответственно, первого–третьего генераторов, для которых $P_{1\max} = 50$ кВт, $P_{2\max} = 70$ кВт, $P_{3\max} = 80$ кВт; F_1, F_2, F_3 — расходные характеристики (6), заданные полиномами второго порядка, где значения, равные, соответственно, 90, 100 и 130 ед., приведены для режима холостого хода. Оператор «pause» служит для редактирования входных данных после просмотра значений функций F_1, F_2, F_3 , а также полученных решений.

Во втором блоке программы, согласно соотношениям (5), решается система рекуррентных соотношений и поэтапно реализуется алгоритм оптимизации в пространстве состояний:

```
for T=1:2;
    r1=size(F1);r2=size(F2);
if r1(2)<=r2(2)
    N=r1(2); M=r2(2);
else
```

```

N=r2(2); M=r1(2);
end
[x,y]=meshgrid(F1,F2);
z=x+y;
M;
N;
X=rot90(z,3);
%.....

```

Первый шаг предназначен для численной оптимизации режимов работы двух параллельно работающих генераторов. Решение на втором шаге, согласно рекуррентному соотношению, представляется в форме, удобной для поиска минимума критерия для первых двух и третьего генератора. Аналогично получается решение для первых трех и четвертого генератора — на третьем шаге, для пяти генераторов — на четвертом шаге и т. д. На с. 791 в разделе «Результаты» приведен пример экономичного распределения мощности для электростанции с тремя ДГА. Представлено решение, полученное на двух шагах. Согласно алгоритму, на каждом шаге формируется матрица z размерности $(m \times n)$. С этой целью сначала с помощью оператора «size» определяются размерности $r1$ и $r2$ векторов $F1$, $F2$. Затем находятся элементы матрицы z . Минимумы искомого решения находятся вращением z , выполняемым с применением оператора «rot90», что позволяет анализировать массивы чисел, находящиеся ниже главной диагонали.

Во втором цикле «for-end» формируются матрицы XX , IM и $IM3$. Первая матрица XX служит для размещения оптимальных решений, полученных в соответствующем цикле T , вторая и третья матрицы (соответственно IM и $IM3$) — для размещения оптимальных вариантов распределения мощностей генераторов:

```

XX=[];IM=[];IM3=[];
for cc=-(N-1):(M-1);
    [v,I]=min(diag(X,cc));XX=[XX v];
if cc<=-1
    IM3=[IM3 abs(cc-I)];
else
    IM=[IM I];
end
    IMM=[IM3 IM];
end
X1=rot90(XX,2);IM1=rot90(IMM,2);
Opt1=[X1;IM1.*delt-delt];
%.....
end

```

По окончании вычислительной процедуры сформирована матрица «Opt», содержащая в каждой из четырех строк оптимальные распределения мощности на каждом шаге. В первой строке матрицы находятся минимальные значения критерия, во второй и третьей строках — оптимальные распределения мощности очередного k -го (генератора) и суммарной мощности $(k-1)$ предшествующих генераторов. Элементами четвертой строки представлены значения мощности, потребляемой судовой сетью. Затем вектору $F2$ присваиваются значения первой строки матрицы «Opt». Программа возвращается ко второму шагу с использованием расходной характеристики F_i третьего генераторного агрегата. С выполнением цикла «for ... end» завершается вычислительная процедура в целом.

Результаты (Results)

Оптимальные распределения мощности параллельно работающих на общую нагрузку генераторных агрегатов.

>> % Решение на первом шаге: >> Opt (:,1:13)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
190.0	206.0	225.6	248.8	274.3	301.1	331.5	364.0	398.0	435.6	475.1	521.6	575.1
0	0	0	0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	30.0	40.0	50.0
0	10.0	20.0	30.0	30.0	40.0	50.0	50.0	60.0	70.0	70.0	70.0	70.0
0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0

>> % Решение на втором шаге:

>> Opt (:,1:21)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
320.0	330.5	344.0	360.0	376.5	396.0	415.6	438.1	461.30	486.8	512.3	539.1	567.6
0	10.0	20.0	20.0	30.0	40.0	40.0	50.0	50.0	50.0	60.0	60.0	70.0
0	0	0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	30.0	40.0	40.0	50.0	50.0
0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
14	15	16	17	18	19	20	21					
598.0	629.5	662.0	696.0	733.6	773.1	819.6	873.1					
70.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0					
60.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0					
130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0					

Обсуждение (Discussion)

Из приведенных расчетных данных следует, что на первом шаге решения — для двух (первого и второго) параллельно работающих генераторов число столбцов матрицы “Opt” равно 13; на втором — для трех генераторов получено 21 решение.

Рассмотрим последовательность действий по использованию полученного решения. Предположим, что потребляемая сетью мощность генерируется первым и вторым генераторами и составляет 120 кВт. Тогда, согласно расчетным данным на первом шаге, оптимальные распределения мощности равны: для первого генератора 50 кВт; для второго — 70 кВт. Минимальные потери, согласно критерию, равны 575.1 расчетных единиц (см. последний столбец, первую строку).

Для трех работающих генераторов на общую нагрузку при потребляемой мощности 120 кВт (см. решение: второй шаг, первая строка, 13 столбец) минимум критерия составит 567.6. При таком распределении мощности третий генератор 70 кВт, второй — 40 кВт, первый — 10 кВт.

Предположим, что потребляемая сетью мощность составила 180 кВт. Тогда, согласно расчетным данным, минимальным затратам будет соответствовать следующее распределение мощности генераторов: P1 = 60 кВт, P2 = 40 кВт; P3 = 80 кВт.

Полученный результат можно проверить путем прямой подстановки P1, P2 и P3 в формулы F1, F2, F3 (см. текст файла «sah8.m» (с. 789)). Значение минимума критерия составляет для полученного распределения 873.1. Очевидно, что любое другое распределение не будет соответствовать минимуму критерия качества.

Выводы (Summary)

1. Полученные с применением принципа оптимальности Беллмана результаты энергоэффективных решений для группы дизель-генераторов, работающих на судовую сеть потребителей электроэнергии, полностью подтверждают его практическую реализуемость, базирующуюся на инвариантном погружении и рекуррентных соотношениях.

2. Для повышения точности решения необходимо уменьшить шаг дискретности с учетом ограничений в форме равенств и неравенств. Для устойчивости системы при скачкообразных изменениях нагрузки сети следует применять PID-регуляторы [15], а также различные классы интеллектуальных систем.

3. Алгоритм пригоден для автоматизации и оптимизации распределения нагрузки судовых ДГА, а также решения задач диспетчеризации источников электроэнергии в электроэнергетических сетях и системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Автоматизация и повышение эффективности использования топлива на судах / С. О. Барышников, А. А. Кузьмин, В. В. Сахаров, С. Н. Тарануха. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 390 с.
2. Дмитриенко Д. В. Алгоритм повышения экономичности электроэнергетических систем на водном транспорте с использованием функций нечеткой логики / Д. В. Дмитриенко, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.
3. Bellman R. On a Routing Problem / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. — 1958. — Vol. 16. — № 1. — С. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
4. Гаврилов А. Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду / А. Гаврилов, А. Махнитко // Elektroenergetika. — 2008. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–32.
5. Чертков А. А. Энергоэффективное управление судовой динамической системой на основе теории неравенств / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 54–58.
6. Гришкин В. В. О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов / В. В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 153–166.
7. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — №3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
8. Cho B. B. A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. MS (Master of Science) Thesis / B. B. Cho. — The University of Iowa, 2010. — 32 p. DOI: 10.17077/etd.qux5q9b5.
9. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations. — 2014. — 55 p. [Электронный ресурс] / Mia Elg. — Режим доступа: http://laradi.fi/images/files/suyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения: 10.11.2014).
10. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999. — 720 p.
11. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — 2nd edition. — McGraw-Hill Primis: Custom Publishing, 2002. — 712 p.
12. Shrivastava A. A. Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for / A. Shrivastava, H. M. Siddiqui // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 50–57.
13. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
14. Ramesh G. Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods / G. Ramesh, T. K. Sunil // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. — 2015. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.
15. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 164–171.

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., A. A. Kuzmin, V. V. Saharov, and S.N. Taranuha. *Avtomatizacia i povyshenie effektivnosti ispolzovaniia topliva na sudah*. SPb.: Izd-vo Politeh. un-ta, 2016.
2. Dmitrienko, Dmitry V., Alexander A. Chertkov, and Sergei V. Saburov. “The algorithm of a formance gain of electroenergy systems for water transport using fuzzy logic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.
3. Bellman, Richard. “On a Routing Problem.” *Quarterly of Applied Mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.

4. Gavrilov, A., and A. Mahnitko. "Analysis of the effects of the modes of operation of thermal power plants on the environment Wednesday." *Elektroenergetika* 1.2 (2008): 27–32.
5. Chertkov, Alexander A., Dmitry S. Tormashov, and Sergei V. Saburov. "Shipping dynamic system energoefficient control on the base of inequality theory." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 54–58.
6. Grishkin, V.V. "O dejatelnosti v oblasti sokraschenija vybrosov parnikovyh gazov s sudov." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 153–166.
7. Ivanchenko, Alexander A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
8. Cho, Brian Bumseok. *A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. MS (Master of Science) thesis.* The University of Iowa, 2010. DOI: 10.17077/etd.qux5q9b5.
9. Elg, Mia. *Energy Efficiency related Rules and Regulations - EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations.* 2014. Web. 10 Nov. 2014 <http://laradi.fi/images/iles/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf>.
10. Saadat, Hadi. *Power System Analysis.* USA: McGraw-Hill, 1999.
11. Saadat, Hadi. *Power System Analysis.* 2nd edition. McGraw-Hill Primis Custom Publishing 2002.
12. Shrivastava, A., and H.M. Siddiqui. "A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System." *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology* 2.3 (2014): 50–57.
13. Saharov, Vladimir V., Alexander G. Taranin, and Alexander A. Chertkov. "Energoefficient ship steering control algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
14. Ramesh, Guguloth, and T. K. Sunil. "Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods." *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* 3.2 (2015): 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.
15. Chertkov, Alexander A., Dmitry S. Tormashov, and Sergei V. Saburov. "Dynamic systems parametric arrange by means PID tuner in MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сахаров Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Чертков Александр Александрович — доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант
 Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Sakharov, Vladimir V. — 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: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Chertkov, Alexandr A. — 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: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Saburov, Sergey V. — Postgraduate Supervisor:
 Sakharov, Vladimir V.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2019 г.
 Received: June 24, 2019.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 11. № 4

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.08.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 24,25. Тираж 500 экз. Заказ № 433/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7