

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. № 2

**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. — № 2. — 204 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»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

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.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ209

Гриняк В. М., Акмайкин Д. А., Девятисильный А. С. Оценка перспектив использования данных метеоспутников для планирования маршрута судна в арктических водах209

Каретников В. В., Менишиков А. И., Рудых С. В. Некоторые аспекты создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов на внутренних водных путях222

Сахаров В. В., Чертков А. А., Очина Л. Б. Маршрутизация сетей с отрицательными весами звеньев в пакете оптимизации MATLAB230

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Семенов А. Д. Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования243

Кузьмицкий М. Л., Ксенофонтов Н. М., Базавлук И. Н. Анализ причин повреждений элементов центральной опоры поворотного устройства Красноярского судоподъемника255

Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов266

Дегтева П. В. Исследование грузооборота речного флота на территории Северного морского пути275

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ284

Хурматова Г. И., Зудин И. В., Шабалин Н. В. Технология подводного обследования устьев разведочных ликвидированных скважин на примере Долгинского нефтяного месторождения284

Ольховик Е. О., Афонин А. Б., Тезиков А. Л. Обоснование плана проведения площадного обследования высокоширотных маршрутов296

Холопцев А. В., Подпорин С. А. Участки Северного морского пути с наибольшей повторяемостью ветров северных румбов в XXI веке305

Фирсов Ю. Г., Зинченко А. Г. Проблемы наименования равнин и котловин центрально-арктической области поднятий Северного Ледовитого океана315

Иванов Р. В., Полубелов Д. А. Влияние размеров и осадки судна на качество выполнения комплексных гидрографических изысканий332

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ340

Пинчук А. Н., Коржев В. К., Вишневский Л. И. Влияние увеличения числа лопастей судового лопастного движителя на его виброактивность при работе в неравномерном поле скоростей за корпусом судна340

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА349

Горобец А. Г. Вихревые потоки в судовых системах и устройствах349

Том 11. № 2

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.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма

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

Г. В. Егоров

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

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>Т. А. Клепикова</i> , д.ф.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., директор РРР	
<i>А. Л. Тезиков</i> , д.т.н.	
<i>В. И. Черненко</i> , д.т.н.	
<i>В. Б. Чистов</i> , д.т.н.	

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	357
<i>Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М.</i> Разработка гребного вентильно-индукторного двигателя для систем электродвижения большой мощности	357
<i>Колесниченко В. Ю.</i> Единая электроэнергетическая система и гребная электрическая установка танкера ледового класса ARC7 «Штурман Скуратов».....	367
<i>Саушев А. В., Бова Е. В.</i> Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов.....	380
<i>Широков Н. В.</i> Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии.....	396

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 Sci-
ences, Prof.

G. V. Yegorov
General Director of "Marine
Engineering Bureau - St.
Petersburg", doctor of technical
Sciences, Prof.

F. V. Karmazinov
Strategic Program Coordina-
tor 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 Trans-
port

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

M. Yusupov
director of "St. Petersburg Insti-
tute for Informatics and Automa-
tion 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>

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION209

Grinyak V. M., Akmaykin D. A., Devyatitsilnyi A. S. Assessment of the prospects
for using meteorological satellite data for planning a vessel route in the Arctic
waters209

Karetnikov V. V., Menshikov A. I., Rudikh S. V. Some aspects of creating
a telecommunication automated system for organizing the vessels traffic
on inland waterways222

Saharov V. V., Chertkov A. A., Ochina L. B. Routing the networks with negative
weights of links in the MATLAB optimization package230

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Semenov A. D. Application the simulation
modeling methods for planning a container terminal internal operations243

Kuzmitskiy M. L., Ksenofontov N. M., Bazavluk I. N. Analysis of the causes
of damage to the elements of the center prop of the revolving gear of the
Krasnoyarsk ship's elevator255

Yuyukin I. V. Optimization of navigational isosurface simulation
by the methods of basic finite splines266

Degteva P. V. A study of cargo turnover of the river fleet along
the Northern sea route275

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY284

Khurmatova G. I., Zudin I. V., Shabalin N. V. Subsea survey technology
of abandoned exploratory wells on the example of the Dolginsky oil field284

Ol'khovik E. O., Afonin A. B., Tezikov A. L. A planning rationale for conducting
the areal surveys of high-latitude routes296

Kholoptsev A. V., Podporin S. A. Areas of the Northern Sea Route with
the highest frequency of the northern winds in the XXI century305

Firsov Yu. G., Zinchenko A. G. The problems of naming the plains and basins
of the Central-Arctic area of rises of the Arctic Ocean315

Ivanov R. V., Polubelov D. A. Impact of vessel dimensions and draft
on the quality of integrated hydrographic surveys332

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR340

Pinchuk A. N., Korzhov V. K., Vishnevsky L. Y. The effect of increasing
the blades number of ship's blade propeller on its vibro-activity at operation
in the uneven velocity field behind the vessel hull340

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES349

Gorobets A. G. Vortex flows in the ship's systems and devices349

**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
T. A. Klepikova,
doctor of philosophical 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,
General Director
of FSI Russian River Register
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....357

Romanovsky V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Development
of the propulsion switched reluctance drive for the vessels with high
power electric propulsion systems357
Kolesnichenko V. U. The unified electric power system and electrical
propulsion system of the ARC7 ice-class tanker «Shturman Skuratov»367
Saushev A. V., Bova E. V. The quality indicators and optimality criterion
at the structural-parametric synthesis of automated electric drives380
Shirokov N. V. Warning control of ship's electric power system
in case of the power sources failure396

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR USING METEOROLOGICAL SATELLITE DATA FOR PLANNING A VESSEL ROUTE IN THE ARCTIC WATERS

V. M. Grinyak^{1,3}, D. A. Akmaykin², A. S. Devyatisilnyi³

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

² — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

³ — Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, Russian Federation

Planning a route for a vessel's passage from a port of departure to a port of destination is a topical, complicated and multifaceted problem. Due to the constant weather and ice condition changes along the vessel's course the problem of planning an optimum route should be solved dynamically taking into consideration a current and predicted situation. Thus, using the information provided by the meteorological services according to satellite monitoring data is considered promising. Nowadays there is a great number of controlled means of sensing which allows us to obtain the information on both atmosphere and hydrosphere conditions of the Earth practically in real time. At present an orbital grouping of the Earth remote sensing satellites for measuring surface wind speed over the ocean, ice conditions and significant wave height has over ten space vehicles, and their number is constantly increasing. Within the framework of e-navigation development, using the meteorological data directly on shipboard has become possible. The problem of modeling the satellite monitoring to evaluate the frequency of updating the data on weather in the selected position of the earth's surface, which are provided by existing meteorological services, is considered in the paper. The well-known equation of artificial satellite motion in an elliptical orbit is the basis of this model. The obtained results contribute to formulate a systematized concept that the use of meteorological satellite data to solve the problem of planning long range navigation in view of weather and ice conditions is promising. In case there are data from only one satellite, even with the widest swath (e.g. QuikScat), the mean time of data obtainment (the data age) at the Arctic latitudes will be from some hours up to twelve hours. The Average Wait Time of the sensing data for both an individual meteorological satellite and a group of meteorological satellites has been analyzed in the paper. The graphs of the time intervals distribution between consecutive observations of positions on the Earth surface by the different groups of meteorological satellites at the Arctic latitudes are presented. The conclusion on the implementability of planning the vessel route, taking into account the ice conditions when there is a surface wind and sea along the intended vessel course, in view of the information obtained from existing satellite weather sensors is made.

Keywords: navigation safety, route planning, polar waters, weather satellite, meteorological data, satellite track, queuing model.

For citation:

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

УДК 519.68:15:681.5

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МЕТЕОСПУТНИКОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА СУДНА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

В. М. Гриняк^{1,3}, Д. А. Акмайкин², А. С. Девятисильный³

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

² — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

³ — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация.

Статья посвящена проблеме планирования маршрутов морских судов. Рассматривается задача поиска оптимального маршрута судна при его следовании в арктических водах, в характерных для полярных акваторий сложных метеоусловиях. Указывается на перспективность использования данных о погоде (ветре, волнении, ледовой обстановке), предоставляемых специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга. Отмечается, что проблемой спутниковых метеоданных является то, что они не обеспечивают глобального актуального представления о погоде, поскольку для полного покрытия сканерами поверхности Земли одному спутнику требуется значительное время. Поэтому особенно важным является исследование характера спутниковых метеоданных с точки зрения их характерного «возраста» и возможности комплексирования информации различных метеосервисов, которому посвящена предлагаемая работа. Ставится и решается задача моделирования движения искусственного спутника Земли в классических представлениях небесной механики. Отмечается возможность упрощенного решения задачи для спутников, движущихся по орбитам, близких к круговым. Путем вычисления траектории спутника определяется область земной поверхности, наблюдаемая спутником на каждом обороте. Отмечается специфическая особенность наблюдения приполярной области, обусловленная комплексированием орбитального движения на низких и средних орбитах и собственного вращения Земли. С учетом вычислений выполнена оценка среднего времени ожидания данных зондирования арктической области как от отдельного спутника, так и от их группы. Дана оценка площади арктической зоны (50–90 % в зависимости от числа спутников) с приемлемым возрастом метеоданных. Предложен подход к выбору метеоспутников для сбора данных о погоде по планируемому маршруту следования судна, основанный на известной вероятностной модели массового обслуживания. Сделан вывод о реализуемости задачи планирования маршрута судна с учетом данных о погоде, полученных с использованием имеющихся технических средств.

Ключевые слова: безопасность судоходства, планирование маршрута, полярные воды, метеоспутник, метеоданные, траектория спутника, модель массового обслуживания.

Для цитирования:

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

Введение (Introduction)

Обеспечение безопасности мореплавания представляет собой многоаспектную проблему, постоянно привлекающую внимание исследователей [1]–[3]. К настоящему времени в рамках этой проблемы сформировался широкий круг характерных задач, одной из которых является задача планирования маршрута перехода судна от порта отправления к порту назначения [4].

Планирование маршрута перехода осуществляется с учетом многих факторов. Основными из них являются географические характеристики района перехода и технические возможности судна (например, максимальная дальность плавания, скорость, осадка, длина). Известны методы планирования маршрута, связанные с решением оптимизационных задач, учитывающие направление и скорость ветра и течения по маршруту и минимизирующие время перехода и расход топлива. Основанные на классических моделях теории управления [5] или алгоритмах эвристического типа [6]–[8], они зачастую характеризуются высокой вычислительной сложностью [8]–[10], что требует нетривиальных подходов к их реализации.

В Арктике при планировании маршрута перехода особую значимость имеют не экономические критерии, а показатели траектории, связанные с безопасностью [11]–[13]. Полярные воды характеризуются повышенной сложностью судоходства, прежде всего, из-за неблагоприятных погодных условий: частые и сильные шторма, плохая видимость, сложная ледовая обстановка, опас-

ность обледенения, быстрая смена погоды. Ввиду такого множества факторов и их изменчивости, опыта и знаний судоводителя может быть недостаточно для принятия правильного решения о выборе безопасного маршрута. В этом случае целесообразно использование автоматизированных систем планирования маршрута, которые должны решать задачу динамически, с учетом текущей и прогнозируемой обстановки, причем данные о ней должны быть максимально достоверными. Является перспективным использование информации, предоставляемой специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга [14]. В настоящее время существует большое количество спутников (более десяти), оборудованных средствами дистанционного зондирования Земли, позволяющих получить информацию о состоянии атмосферы и гидросферы практически в реальном времени и их количество постоянно увеличивается [15], [16]. Спутниковые средства способны измерять скорость ветра над водной поверхностью и высоту волн, оценивать ледовые условия. В рамках развития е-Навигации стало возможным использование таких метеоданных непосредственно на судах [17], [18].

С точки зрения обсуждаемой задачи планирования безопасного маршрута перехода проблемой использования спутниковых метеоданных является то, что они не обеспечивают глобального актуального представления о состоянии льда, морского волнения и ветра, так как для полного покрытия своими сканерами поверхности Земли одному спутнику требуется значительное время. Другими словами, данные от одного спутника о погоде и ледовых условиях по пути следования судна могут оказаться устаревшими. Поэтому является актуальным исследование характера спутниковых метеоданных в контексте их «возраста» и возможности комплексирования информации различных метеосервисов для решения задачи планирования безопасного маршрута перехода судна.

В опубликованных ранее работах [19], [20] авторами моделировался процесс спутникового мониторинга с целью оценки частоты обновления данных о погоде в выбранной точке поверхности Земли. Однако задача решалась для низких широт (до 60°). Между тем трассы спутников в высоких широтах (от 60° до 90°) имеют специфические особенности. В настоящей работе проведен анализ среднего времени ожидания данных зондирования арктической области как от отдельного спутника, так и от группы метеоспутников. Представляемые результаты позволяют сделать выводы о количестве спутников, необходимых для получения актуальных метеоданных, и выработать подход к выбору метеосервисов для планирования безопасного маршрута в арктических водах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Примем за основу математической модели задачи известные уравнения движения искусственных спутников по эллиптической орбите. Будем использовать правую ортогональную систему отсчета x, y, z , с началом в центре Земли, осью z , направленной на север и плоскостью xy , лежащей в плоскости экватора. Движение искусственного спутника Земли может быть приближенно описано известной ограниченной задачей двух тел [21], [22]:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\mu G \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор спутника; G — гравитационная постоянная; μ — масса Земли.

Решение этого дифференциального уравнения можно (также приближенно) описать известным уравнением Кеплера [22]:

$$E - e \sin E = M, \quad (2)$$

где M — угловое расстояние между перицентром орбиты и радиус-вектором гипотетического тела, движущегося по круговой орбите радиуса, равного большой полуоси a искомой эллиптической

орбиты (средняя аномалия); E — угловой параметр, называемый *эксцентрической аномалией*, используемый для выражения переменной длины радиуса-вектора $\mathbf{r}$; e — эксцентриситет орбиты (величина, определяемая параметрами орбиты).

Значение величины M в момент времени t может быть найдено по формуле

$$M(t) = (t - t_0) \sqrt{\frac{\mu G}{a^3}}, \quad (3)$$

где t_0 — момент времени одного из проходов спутником перигея, принимаемый за начало отсчета; a — величина, определяемая параметрами орбиты.

Значение величины E в выражении обычно находится путем решения уравнения Кеплера относительно E численными методами. Например, популярен метод простой итерации, где последовательные приближения E имеют вид $E_{i+1} = -e \sin E_i + M$.

Далее определяется величина ϑ , называемая *истинной аномалией* — это угол, между радиус-вектором спутника r и направлением на перигей. Истинная аномалия ϑ связана с эксцентрической аномалией E уравнением

$$\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}. \quad (4)$$

Длина радиус-вектора спутника

$$|\mathbf{r}| = a(1 - e \cos E). \quad (5)$$

Рассмотрим вспомогательную систему координат $x'y'$, связанную с эллипсом движения спутника. Пусть ее начало отсчета лежит в центре Земли, ось x' направлена вдоль большой полуоси эллипса, ось y' перпендикулярна ей. Координаты точки местонахождения спутника в системе $x'y'$ могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} x' &= |\mathbf{r}| \cos \vartheta; \\ y' &= |\mathbf{r}| \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (6)$$

Координаты спутника в системе отсчета x,y,z определяются наклоном орбиты и положением перигея относительно системы координат x,y,z , которые вычисляются путем последовательного умножения вектора $\mathbf{r}' = (x', y', 0)$ на матрицы поворота M_x, M_y, M_z :

$$\mathbf{r} = M_x M_y M_z \mathbf{r}'. \quad (7)$$

Здесь

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad M_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}; \quad M_z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где α, β, γ — углы поворота вокруг координатных осей.

По известным значениям компонент радиус-вектора спутника $\mathbf{r}$ в момент времени t легко определить географические координаты точки поверхности Земли, над которой находится спутник:

$$\varphi(t) = \arcsin \left(\frac{z(t)}{|\mathbf{r}(t)|} \right); \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \arctg(y(t), x(t)) - (t - t_0) \omega_3 - \lambda(t_0). \quad (9)$$

Здесь $\varphi(t), \lambda(t)$ — географические координаты (широта и долгота) точки траектории спутника; ω_3 — угловая скорость вращения Земли; $\lambda(t_0)$ — угловое положение нулевого меридиана Земли в начальный момент времени.

В формуле (9) функция арктангенса доопределяется до области значений $(-\pi, \pi)$, так что $\arctg(y(t), x(t)) = \arctg(y(t) / x(t)) + C$, значение константы C зависит от знака переменных x и y .

В том случае, если орбита спутника близка к круговой ($e < 0,02$), в рассматриваемой задаче с достаточной степенью приближения можно считать, что длина радиус-вектора, равная большой полуоси a , и угловая скорость движения спутника, равная $\sqrt{\mu G/a^3}$, постоянны.

Моделируя движение спутника при заданных значениях высоты и наклонения орбиты, а также учитывая ширину полосы поверхности Земли, сканируемой его сенсорами, можно получить информацию о характерном возрасте метеоданных. Пусть t_i^s — время начала i -го наблюдения спутником точки земной поверхности, t_i^f — время окончания i -го наблюдения. Для каждой точки на поверхности Земли за весь моделируемый период времени будем иметь две последовательности из N таких значений.

Средним временем ожидания спутника назовем следующую величину:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=2}^N (t_i^f - t_{i-1}^s)}{N-1}. \quad (10)$$

С учетом механики движения спутника, сферической формы Земли и равномерности ее собственного вращения среднее время ожидания при $N \rightarrow \infty$ будет одинаковым для точек, находящихся на одной широте. Поэтому следует рассматривать среднее время ожидания спутника на той или иной широте, которое и будет соответствовать среднему возрасту метеоданных. Представление о среднем возрасте метеоданных позволяет оценить их пригодность для планирования безопасных маршрутов судов.

Результаты (Results)

Оценки среднего возраста метеоданных проводились для некоторых спутников, связанных с существующими информационными сервисами [23]–[25]. Интерес, прежде всего, представляли спутники, трассы которых пролегают в полярных широтах, имеющие относительно широкую полосу захвата (табл. 1).

Таблица 1

Параметры орбит и сенсоров некоторых метеоспутников

№ п/п.	Название спутника	Высота орбиты, км	Наклонение орбиты, град.	Ширина полосы захвата, км
1	QuikScat	803	98,6	1410
2	ScatSat-1	720	98,28	1400
3	Hy-2A	971	99,34	1350
4	ERS	780	98,5	500
5	ASCAT	800	98,6	500
6	Jason-2	1380	66,05	315

Движение спутников моделировалось в течение 20 сут, затем задавались 36 точек на каждой из широт (по одной точке на каждые 10 град долготы) и вычислялось среднее время между последовательными наблюдениями каждой точки $t_{\text{ср}}$. Полученные для 36 точек одной широты результаты усреднялись.

На рис. 1 показан фрагмент проведенных расчетов — часть поверхности Арктики, наблюдаемая спутником ScatSat-1 в течение 3,5 ч. В течение этого времени спутник делает около двух оборотов, сканируя более 45 % поверхности в области широт от 70° до 90°, т. е. почти половину этой зоны.

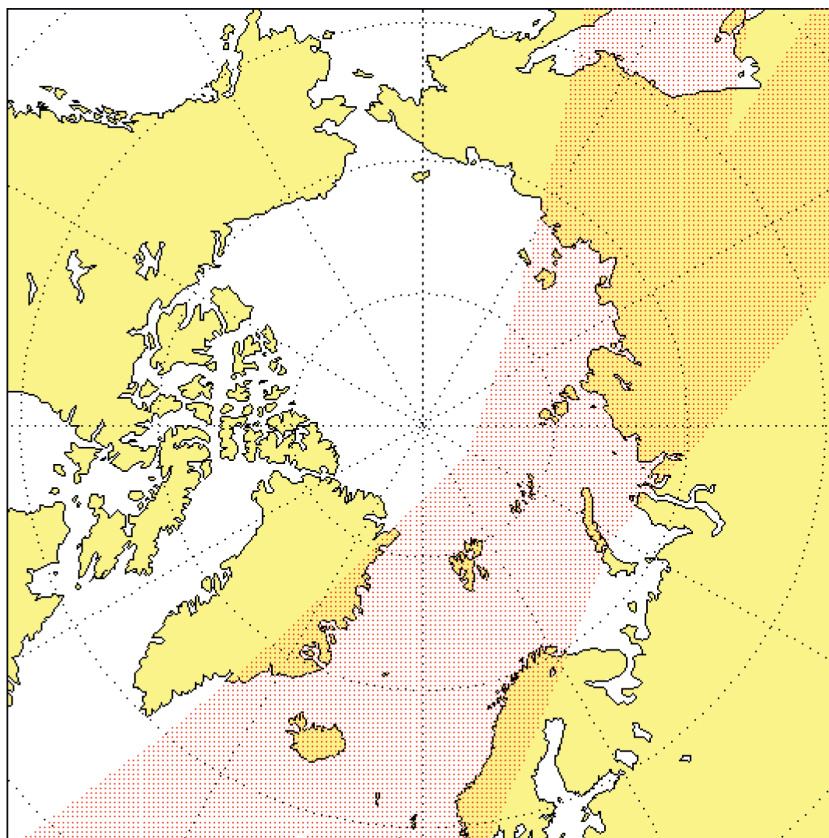


Рис. 1. Поверхность приполярной области, наблюдаемая спутником ScatSat-1 за два оборота (красная полоса)

В табл. 2 показаны результаты вычислений среднего «возраста» метеоданных спутников на различных широтах.

Таблица 2

Среднее время ожидания спутниковых данных о погоде на различных широтах, ч

№ п/п.	Название спутника	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	QuikScat	10,1	8,6	6,0	4,0	4,6	11,8	Нет
2	ScatSat-1	10,8	8,6	6,4	3,8	4,2	7,6	Нет
3	Hy-2A	11,2	9,0	5,8	4,6	6,0	Нет	Нет
4	ERS	30,4	24,4	18,4	11,2	9,2	Нет	Нет
5	ASCAT	31,8	25,8	18,4	11,2	9,8	Нет	Нет
6	Jason-2	>48	>48	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Так, данные о погоде на 85 град. широты могут предоставить только спутники QuikScat и ScatSat-1, среднее время между наблюдениями составит 11,8 и 7,6 ч соответственно. Ни один из спутников «не видит» полюса. Видна явная зависимость времени ожидания данных от ширины полосы захвата (прямая) и высоты орбиты (обратная). Спутник Jason-2, из-за узкой полосы захвата, высокой орбиты и ее наклона, практически «не видит» полярной области, а время обновления его данных составляет более двух суток. Характерный период обновления данных в наиболее востребованной судоводителями области широт 70–80° (Северный Морской путь, Северо-Западный проход) составляет 3,8–18,4 ч.

Перспективным способом уменьшения среднего времени ожидания метеоданных является работа не с одним, а сразу с несколькими спутниками. На рис. 2 показана поверхность Арктики, наблюдаемая системой спутников ScatSat-1 и ERS в течение 3,5 ч.

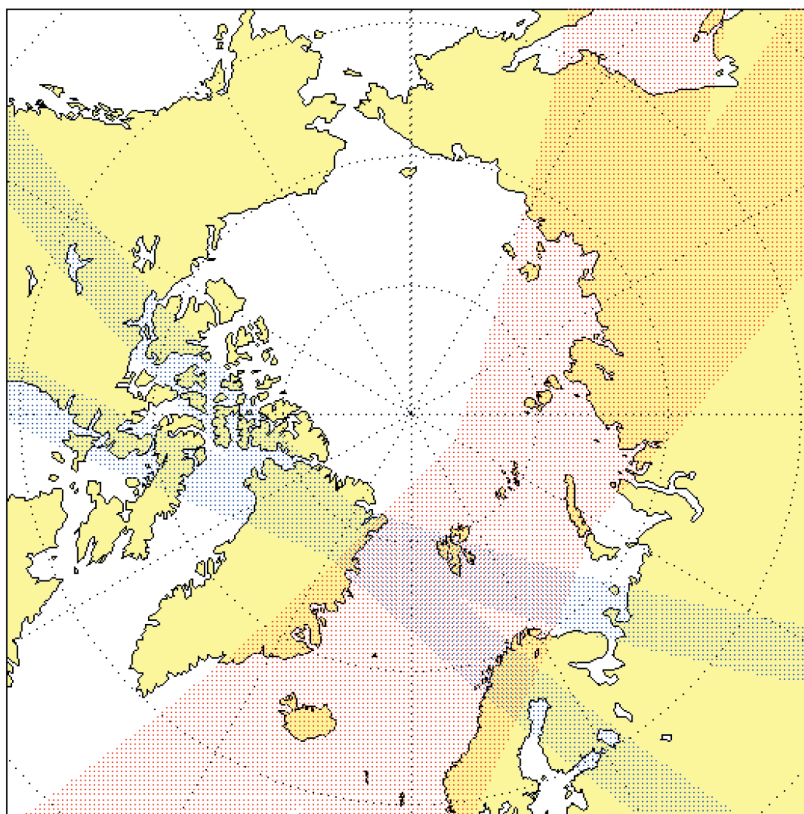


Рис. 2. Поверхность приполярной области, наблюдаемая системой спутников ScatSat-1 (красная полоса) и ERS (синяя полоса) за два оборота

Видно, что дополнительный спутник существенно (примерно до 60 %) увеличивает площадь сканируемой за это время поверхности в области широт от 70° до 90°. Табл. 3 содержит результаты вычислений среднего «возраста» метеоданных некоторых таких систем, состоящих из двух спутников.

Таблица 3

**Среднее время ожидания данных группы
из двух метеоспутников на различных широтах, ч**

№ п/п.	Название спутников	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	QuikScat + Hy-2A	5,4	4,2	3,0	2,0	2,6	11,8	Нет
2	ScatSat-1 + ERS	7,8	6,2	4,8	2,9	3,0	7,6	Нет
3	Hy-2A + ASCAT	8,2	6,4	4,4	3,4	3,8	Нет	Нет

Видно, что период обновления данных в области широт 70–80° составляет 2,0–4,8 ч. Такой временной интервал вполне соответствует ожиданиям характерной скорости изменения погодных условий в указанных широтах [26]. Как показали ранее проведенные исследования [19], [20], время ожидания наблюдения спутником той или иной точки поверхности Земли $t_i^f - t_{i-1}^s$ можно приближенно описать известной вероятностной моделью массового обслуживания [27]. В этом случае вероятность F того, что время ожидания меньше заданного t , описывается экспоненциальным распределением:

$$F(t) = 1 - e^{-qt},$$

где $q = 1/m$ — среднее количество наблюдений точки за единицу времени; m — среднее время (математическое ожидание) между наблюдениями.

В рассматриваемой задаче величина $t_{\text{ср}}$ является оценкой величины m . При таких модельных представлениях функция распределения вероятности для группы из n спутников при известном среднем времени ожидания для каждого из них: $m_1, m_2, \dots, m_n$, вычисляется следующим образом:

$$F_{12 \dots n}(t) = 1 - e^{-(q_1 + q_2 + \dots + q_n)t},$$

где $q_1 = 1/m_1, q_2 = 1/m_2$ и т. д.

Для среднего время ожидания группы из n спутников $m_{12 \dots n}$ справедлива формула

$$\frac{1}{m_{12 \dots n}} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \dots + \frac{1}{m_n}.$$

Это соотношение полностью подтверждается результатами моделирования. В этом легко убедиться, сопоставив данные табл. 2 и 3. Теперь, оценив по данным моделирования среднее время ожидания $t_{\text{ср}}$ каждого спутника, можно подобрать набор метеоспутников, способных обеспечить требуемое значение периода обновления данных.

Обсуждение (Discussion)

Представленные результаты исследования позволяют получить представление о возможности использования данных метеоспутников при решении задач планирования маршрута в арктических водах. Даже если имеются данные всего одного спутника, среднее время ожидания (возраст) данных для спутников с «широкой» полосой захвата (QuikScat, ScatSat-1 и Hy-2A) составляет от полсуток до нескольких часов (табл. 2). С учетом характерной динамики погодных условий и возможной экстраполяции данных (прогноза погоды и ледовой обстановки) это делает вполне возможным решение исходной задачи планирования безопасного маршрута перехода. Для спутников с «узкой» полосой захвата (ERS, ASCAT, Jason-2) возраст данных может составлять более суток. Достоверный прогноз погоды на столь большом интервале времени зачастую невозможен [26], что ставит под сомнение перспективу решения оптимизационной задачи планирования маршрута в целом.

Вместе с тем данные спутников с «узкой» полосой захвата позволяют существенно увеличить площадь поверхности полярной зоны, по которой имеются «свежие» метеоданные (рис. 2 и 3) при включении их в систему спутников. В силу особенностей орбитального движения и собственно вращения Земли, спутниковые трассы соседних витков одного спутника в полярных широтах пролегают близко друг от друга, что уменьшает площадь наблюдаемой в единицу времени поверхности (красные полосы на рис. 1). Включение в систему еще одного спутника позволяет качественно уменьшить средний возраст имеющихся метеоданных. Например, добавление к спутнику ScatSat-1 спутника ERS позволило уменьшить среднее время ожидания данных на 2–3 ч (см. рис. 2 и 3, табл. 2 и 3). Из рис. 3 видно, что система, состоящая из этих двух спутников, в течение 12 ч выполняет наблюдение на территории до 90 % площади Арктики, при этом примерно на 80 % территории имеются данные, «возраст» которых составляет менее 8 ч. Включение в систему трех-четырех спутников, в том числе с широкой полосой, даст еще более заметный эффект.

Несмотря на хорошие результаты, которые дает модель массового обслуживания при решении задачи оценки среднего времени ожидания данных системы спутников, следует отметить, что время ожидания наблюдения спутником той или иной точки поверхности Земли $t_i^f - t_{i-1}^s$ является не случайной, а детерминированной величиной. Поэтому функция экспоненциального распределения описывает рассматриваемый процесс лишь приближенно, давая только качественную картину явления.

Данные о погоде, полученные со спутников с «широкой» полосой захвата, зачастую характеризуются невысоким разрешением 30–50 км [28], [29]. Однако, как показывают результаты моделирования [30]–[32], разрешение порядка 50 км вполне позволяет адекватно решать задачу планирования маршрута перехода судна с учетом погодных условий.

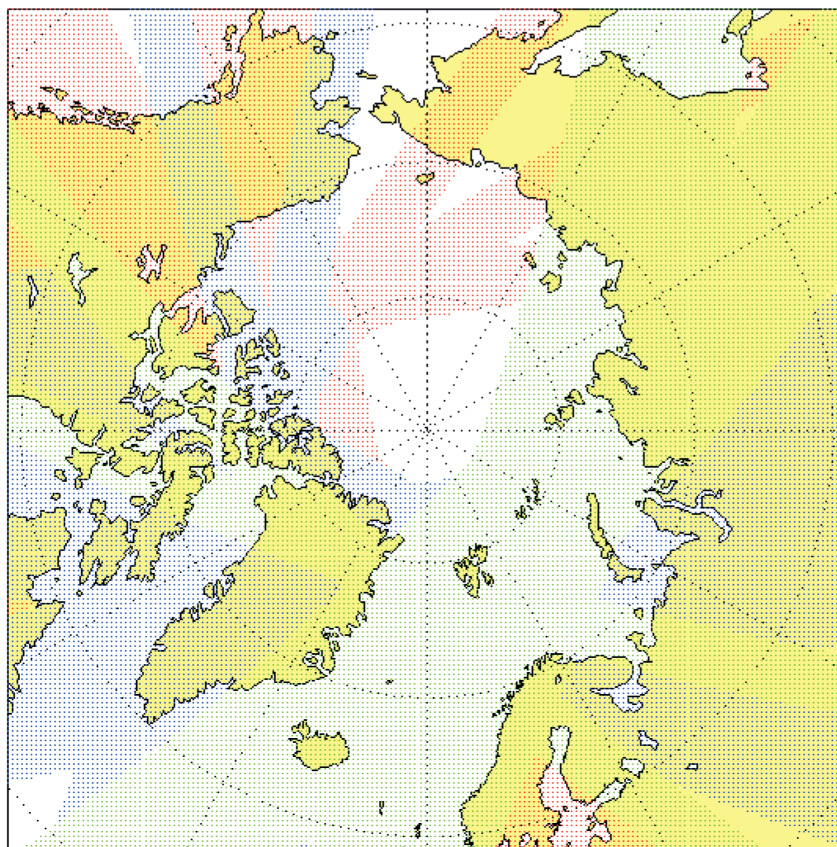


Рис. 3. Возраст метеоданных группы спутников ScatSat-1 и ERS:
зеленый фон — до 4 ч, синий фон — 4–8 ч, красный фон — 8–12 ч

Заключение (Conclusion)

Задача планирования маршрута перехода судна является актуальной в судоводительской практике. Одним из путей дальнейшего повышения эффективности судовождения в арктических водах является оптимизация маршрута с учетом данных о погоде и ледовой обстановке. Для решения соответствующей оптимизационной задачи необходимы актуальные данные о погоде, получение которых возможно с помощью специальных метеоспутников. Предложенная математическая модель задачи, основанная на уравнениях движения спутника по эллиптической орбите и дополненная представлениями классической задачи массового обслуживания, позволяет оценивать характерное время ожидания данных зондирования Земли группой метеоспутников, в том числе в области полярных широт. Полученные оценки позволяют формировать набор спутников, необходимых для получения актуальных метеоданных, а также требования к работе соответствующих метеосервисов.

Комплексирование данных нескольких спутников существенно уменьшает время ожидания данных о погоде в той или иной точке поверхности Земли. Наблюдаемый эффект заметен даже при включении в систему спутников с «узкой» полосой захвата. Результаты моделирования задачи позволяют сделать вывод о принципиальной возможности получения актуальных (возраст 2–3 ч) метеоданных по наиболее востребованным путям следования судов в Арктике (в частности, Северному морскому пути). Это, в свою очередь, делает возможным создание информационной системы поддержки принятия решений судоводителями при выборе маршрута перехода судна в условиях полярных вод на основе спутниковых метеоданных.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 18-29-16129.

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. Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
3. Седова Н. А. Оценка степени опасности наблюдаемой цели на море с использованием систем искусственного интеллекта / Н. А. Седова, В. А. Седов, Н. Г. Левченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — Т. 3. — № 4 (38). — С. 106–114.
4. Акмайкин Д. А. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С. Ф. Ключева // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
5. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
6. Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / К. В. Федоренко, А. Л. Оловянных // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
7. Lu R. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping / R. Lu, O. Turan, E. Boulougouris, C. Banks, A. Incecik // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Pp. 18–28. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.042.
8. Lin Y.-H. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements / Y.-H. Lin, M.-C. Fang, R. W. Yeung // Applied Ocean Research. — 2013. — Vol. 43. — Pp. 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.
9. Wang H.B. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing / H. B. Wang, X. G. Li, P. F. Li, E. I. Veremey, M. V. Sotnikova // The Journal of Navigation. — 2018. — Vol. 71. — Is. 4. — Pp. 989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.
10. Сотникова М. В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий / М. В. Сотникова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — № 2. — С. 181–196.
11. Афонин А. Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. 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.
13. Трипольников В. П. О регистрации рисков ледовой навигации на северном морском пути / В. П. Трипольников // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 125–130. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-125-130.
14. Ружичка З. З. Информационно-технологическое обеспечение задач обработки и представления радиометрических спутниковых данных / З. З. Ружичка, К. В. Музалевский, О. Э. Якубайлик, Е. Г. Швец // Информационные технологии. — 2017. — № 7. — С. 529–535.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#V-ebOyiLSUl. (дата обращения: 01.01.2019).
16. OSTM/Jason-2 Products Handbook / под ред. J. P. Dumont [и др.]. — 2001. — 72 p.
17. Гладских Е. П. Развитие средств навигационного оборудования прибрежной зоны российской федерации в соответствии с концепцией е-навигации / Е. П. Гладских [и др.] // Навигация и гидрография. — 2016. — № 43. — С. 13–21.

18. Малеев П. И. Особенности, состояние и перспективы развития е-навигации морских объектов / П. И. Малеев, Н. И. Леденев // Навигация и гидрография. — 2012. — № 33. — С. 16–20.
19. Акмайкин Д. А. Комплексное использование данных метеоспутников для измерения параметров ветра и волнения вдоль маршрута судна / Д. А. Акмайкин, О. А. Букин, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 941–953. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953.
20. Гриняк В. М. Исследование реализуемости планирования оптимального маршрута судна с учетом спутниковых метеоданных / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, Ю. С. Иваненко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2017. — № 2 (17). — С. 15.
21. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета / М. Б. Балк. — М.: Наука, 1965. — 338 с.
22. Маркеев А. П. Теоретическая механика / А. П. Маркеев. — М.: ЧеРо, 1999. — 572 с.
23. Chelton D. B. On the Use of QuikSCAT Scatterometer Measurements of Surface Winds for Marine Weather Prediction / D. B. Chelton, M. H. Freilich, J. M. Sienkiewicz, J. M. Von Ahn // Monthly Weather Review. — 2006. — Vol. 134. — Is. 8. — Pp. 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1.
24. Risien C. M. A satellite-derived climatology of global ocean winds / C. M. Risien, D. B. Chelton // Remote Sensing of Environment. — 2006. — Vol. 105. — Is. 3. — Pp. 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
25. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба. — М.: Радиотехника, 2010. — 675 с.
26. Chelton D. B. Scatterometer-Based Assessment of 10-m Wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models / D. B. Chelton, M. H. Freilich // Monthly Weather Review. — 2005. — Vol. 133. — Is. 2. — Pp. 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1.
27. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. — М.: Наука, 1988. — 445 с.
28. Бондур В. Г. Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений / В. Г. Бондур, А. Б. Мурынин // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 6. — С. 3. DOI: 10.7868/S0205961415060020.
29. Гавриков А. В. Модификация базы данных спутниковой альтиметрии GLobWave для решения задач диагностики поля морского волнения / А. В. Гавриков, М. А. Крицкий, В. Г. Григорьева // Океанология. — 2016. — Т. 56. — № 2. — С. 322–327. DOI: 10.7868/S0030157416020064.
30. Гриняк В. М. Оптимизация маршрута перехода судна с учетом параметров волнения / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, В. И. Люлько // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2018. — № 4. — С. 15.
31. Гриняк В. М. Планирование маршрутов судов с учетом опасности морского волнения / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Д. А. Акмайкин // Транспорт: наука, техника, управление. — 2018. — № 12. — С. 10–16.
32. Гриняк В. М. Планирование маршрута с учетом опасности волнения по пути следования судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Д. А. Акмайкин // Навигация и гидрография. — 2018. — № 53. — С. 14–23.

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. Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. “Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158
3. Sedova, Nelly A., Viktor A. Sedov, and Natalia G. Levchenko. “Risk assessment of the observed target on sea using artificial intelligence system.” *Marine Intellectual Technologies* 3.4(38) (2017): 106–114.
4. Akmaykin, Denis A., Dmitry B. Khomenko, and Svetlana F. Klueva. “Overview features and perspectives of modern automated ship route planning systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
5. Chertkov, Alexander A. “Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified BellmanFord Algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

6. Fedorenko, Kirill V., and Arkadii L. Olovyannikov. "Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
7. Lu, Ruihua, O. Turan, E. Boulougouris, C. Banks, and A. Incecik. "A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping." *Ocean Engineering* 110 (2015): 18–28. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.042.
8. Lin, Yu-Hsien, Ming-Chung Fang, and Ronald W. Yeung. "The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements." *Applied Ocean Research* 43 (2013): 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.
9. Wang, Hong-Bo, Xiao-Gang Li, Peng-Fei Li, Evgeny I. Veremey, and Margarita V. Sotnikova. "Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing." *The Journal of Navigation* 71.4 (2018): 989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.
10. Sotnikova, M. V. "Algorithms of marine ships routing taking into account weather forecast." *Vestnik of Saint Petersburg university applied mathematics. Computer science. Control processes* 2 (2009): 181–196.
11. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "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.
13. Tripolnikov, V. P. "On registration of ice navigation risks along the Northeast Passage." *Arctic: Ecology and Economy* 2(30) (2018): 125-130. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-125-130.
14. Ruzicka, Z. Z., K. V. Muzalevskiy, O. E. Yakubailik, and E. G. Shvetsov. "Information Technological Support of Tasks of Processing and Submission of Radiometric Satellite Data." *Information Technologies* 23.7 (2017): 529–535.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2. Web. 1 Jan. 2019 <http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#.V-ebOyiLSUL>.
16. Dumont, J. P., et al, eds. *OSTM/Jason-2 Products Handbook*. 2001.
17. Gladskih, E. P., V. N. Kostin, V. A. Maksimov, and Yu. M. Repin. "Razvitie sredstv navigatsionnogo oborudovaniya pribrezhnoi zony rossiiskoi federatsii v sootvetstvii s kontseptsiei e-navigatsii." *Navigatsiya i gidrografiya* 43 (2016): 13–21.
18. Maleev, P.I., and N.I. Ledenev. "Osobennosti, sostoyanie i perspektivy razvitiya e-navigatsii morskikh ob»ektov." *Navigatsiya i gidrografiya* 33 (2012): 16–20.
19. Akmaykin, Denis A., Oleg A. Bukin, and Victor M. Grinyak. "Complex employment of data of meteorological satellites for meterage wind and wave parameters along the ship's route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 941–953. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953.
20. Grinyak, V. M., D. A. Akmaykin, and Yu. S. Ivanenko. "Feasibility study for ship trajectory planning problem using marine weather data from satellites." *Modeling, optimization and information technology* 2(17) (2017): 15.
21. Balk, M. B. *Elementy dinamiki kosmicheskogo poleta*. M.: Nauka, 1965.
22. Markeev, A. P. *Teoreticheskaya mekhanika*. M.: CheRo, 1999.
23. Chelton, Dudley B., M. H. Freilich, J. M. Sienkiewicz, and J. M. Von Ahn. "On the use of QuikSCAT scatterometer measurements of surface winds for marine weather prediction." *Monthly Weather Review* 134.8 (2006): 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1.
24. Risien, Craig M., and Dudley B. Chelton. "A satellite-derived climatology of global ocean winds." *Remote Sensing of Environment* 105.3 (2006): 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
25. Verba, V. S. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya*. M.: Radiotekhnika, 2010.
26. Chelton, Dudley B., and Michael H. Freilich. "Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models." *Monthly Weather Review* 133.2 (2005): 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1.
27. Gnedenko, B. V. *Kurs teorii veroyatnostei*. M.: Nauka, 1988.
28. Bondur, V. G., and A. B. Murynin. "Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra." *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics* 52.9 (2016): 877–887. DOI: 10.1134/S0001433816090085.

29. Gavrikov, A. V., M. A. Krinitsky, and V. G. Grigorieva. "Modification of Globwave satellite altimetry database for sea wave field diagnostics." *Oceanology* 56.2 (2016): 301–306. DOI: 10.1134/S0001437016020065.
30. Grinyak, V. M., D.A. Akmaykin, and V. I. Lulko. "Ships route planning with respect of sea wave properties." *Modeling, optimization and information technology* 4 (2018): 15.
31. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisilny, and D. A. Akmaykin. "Route planning for vessels with respect to sea waves danger." *Transport: science, equipment, management* 12 (2018): 10–16.
32. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisilny, and D. A. Akmaykin. "Ships Route Planning with Respect of Sea Waves Danger." *Navigation and Hydrography* 53 (2018): 14–23.

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

Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: akmaykin@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

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

Akmaykin, Denis A. —
PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: akmaykin@gmail.com

Devyatisilnyi, Alexander S. —
Dr. of Technical Sciences,
Chief Researcher
Institute of Automation
and Control Processes FEBRAS
5, Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию 6 марта 2019 г.
Received: March 6, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229

SOME ASPECTS OF CREATING A TELECOMMUNICATION AUTOMATED SYSTEM FOR ORGANIZING THE VESSELS TRAFFIC ON INLAND WATERWAYS**V. V. Karetnikov, A. I. Menshikov, S. V. Rudikh**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issues on the formation of a telecommunication automated system for organizing the vessels movement taking into account the prospects for its use in a complex of measures to ensure unmanned navigation on Russian inland waterways are described in the paper. At present, the unmanned technology and automation technology are highly promising. As a result of new trends, the coastal services will also receive the development, which will be required to adapt to new conditions and decrease the number of controllers. Based on this, it seems possible to reduce the role of the human factor from both the vessel and the coastal services in the process of movement organization on inland waterways of the Russian Federation. To create a telecommunication automated system for organizing the vessels movement, the basic principles of construction and operation of an electronic queue are discussed in the paper. The issues related to the difficulties of creating and implementing the system in inland waterway transport were considered. Based on this, a flowchart of the algorithm for the operation of this system has been proposed, and its special version has been considered, which allows you to visually get acquainted with specified principles of operation. The formation of the priority of the vessels movement in certain areas during the sluicing process is considered. It is also proposed to take into account a number of permissions and restrictions that may be encountered in the sluicing process. Based on this, the recommendations on the organization of a special order of the pass and priority for the best optimization and the costs reduction during the operation of the river fleet have been formulated. In the final part of the paper, the further development of the aforementioned system with the support of the Volga-Balt Administration is proposed.

Keywords: Volga-Baltic basin, demurrage, electronic queue system, vessel traffic organization system.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Aleksandr I. Menshikov, and Sergey V. Rudy'kh. "Some aspects of creating a telecommunication automated system for organizing the vessels traffic on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 222–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229.

УДК 528.088**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ
НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ****В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы по организации телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов с учетом перспектив ее использования в комплексе мероприятий по обеспечению беспилотного судоходства на ВВП РФ. Отмечается, что на сегодняшний день большой потенциал имеет развитие беспилотных технологий и технологий автоматизации. Вследствие новых тенденций развитие также получают и береговые службы, которым потребуется адаптация к новым условиям и уменьшение количества диспетчеров. Исходя из этого представляется возможным снижение роли человеческого фактора как со стороны судна, так и со стороны береговых служб в процессе организации движения на ВВП РФ. Для создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов в работе рассмотрены базовые принципы построения и функционирования электронной очереди. Затронуты вопросы, связанные со сложностями создания и внедрения системы на внутреннем водном

транспорте. На основании этого предложена блок-схема алгоритма работы этой системы и рассмотрен ее специальный вариант, что позволяет наглядно ознакомиться с указанными принципами работы. Рассмотрено формирование приоритета движения судов на определенных участках во время процесса шлюзования. Предлагается учитывать ряд разрешений и ограничений, с которыми можно столкнуться в процессе шлюзования. На основании этого сформулированы рекомендации по организации особого порядка пропуска и приоритета для наилучшей оптимизации и снижения затрат в процессе эксплуатации внутреннего водного транспорта. В заключительной части работы предложена дальнейшая разработка рассматриваемой системы при поддержке ФБУ «Администрация «Волго-Балт».

Ключевые слова: Волго-Балтийский бассейн, простой судов, электронная очередь, система организации движения.

Для цитирования:

Каретников В. В. Некоторые аспекты создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 222–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229.

Введение (Introduction)

Данная работа является продолжением исследований по созданию телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения (ТАСОД) на внутренних водных путях (ВВП), на примере участка Волго-Балтийского бассейна (ВББ) [1]. Из публикации [1] известно, что внедрение в производственную деятельность ТАСОД положительным образом отразится на эффективности работы основной трассы, а именно:

- повышение пропускной способности;
- снижение простоя судов;
- повышение безопасности судоходства на участке ВББ;
- уменьшение влияния человеческого фактора;
- снижение финансовых затрат.

Помимо непосредственной пользы при эксплуатации ТАСОД для организации движения на ВВП необходимо учитывать перспективы ее использования в случае крупномасштабного внедрения на водном транспорте беспилотных судов и судов с дистанционным управлением. На данный момент в мире активно разрабатываются беспилотные и автоматизированные суда [2]–[5]. К 2020–2021 гг. планируется создание опытных образцов, после чего ожидается стремительный рост количества данных типов судов. По оценкам зарубежных экспертов [6], крупномасштабный переход на безэкипажные суда прогнозируется к 2030 г. Исходя из этого ТАСОД должна быть гибкой и работоспособной в обычных условиях конвенциональных судов, а также иметь поддержку операций с беспилотными и автоматизированными судами.

Анализ источников [2], [3] подтверждает тенденции и заинтересованность зарубежных компаний в развитии технологий систем организации движения для данных судов. Так, австралийская компания Newcastle Port Corporation в ближайшее время планирует ввести новую систему очереди, что, по прогнозам, уменьшит количество судов, ожидающих грузовых операций на якоре.

Целью работы является рассмотрение возможных принципов и алгоритмов работы ТАСОД, а также определение возможных сложностей при создании рабочего алгоритма. В частности, в ней рассмотрены следующие вопросы:

- исследование сложности ВББ, накладывающих ограничения на использование текущих алгоритмов;
- определение приоритетов судопропуска;
- создание варианта алгоритма работы ТАСОД.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для удобства логического построения алгоритма систему предлагается условно разделить на две части. Первая часть — это процесс электронной очереди. В него входит получение дан-

ных о количестве и типах судов и формировании расписания. Вторая часть — расчет рекомендуемой скорости судна, корректировка маршрута и скорости судна (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема принципа построения алгоритма работы системы

Для создания системы необходимо прежде всего разработать подходящий алгоритм. ВББ имеет ряд особенностей, которые могут осложнить использование универсальных алгоритмов построения электронных очередей. Несмотря на это, необходимо изучить существующий опыт в этой области, взяв за основу наиболее подходящую систему электронной очереди и адаптировав ее. К таким особенностям можно отнести следующие:

- сочетание озерных и речных условий с резким изменением метеорологической обстановки;
- извилистые фарватеры в стесненных каменистых участках со свальными течениями;
- наличие судоходных гидротехнических сооружений;
- влияние гидроэлектростанций на уровневый режим (колебания уровней могут носить существенный характер, в результате чего значительно изменяются скорости течения, поэтому для учета этих факторов необходимо задать соответствующий параметр;
- наличие лимитирующих участков;
- возможность шлюзования более одного судна одновременно;
- прижимные и свальные течения;
- участки с запретом расхождения и обгона судов и составов;
- участки с ограничениями скорости;

При установке значения приоритета для более рационального и целесообразного распределения флота на всем отрезке пути действия ТАСОД предлагается использовать важнейшие принципы, касающиеся правил пропуска судов через шлюзы ВВП, с учетом рассмотренной в публикации [1] услуги внеочередного прохода судов.

При наличии на подходе к границам шлюза или шлюзованного участка ВВП очереди из судов, рассчитанной более чем на одно шлюзование, система должна обеспечивать следующий упрощенный алгоритм пропуска (рис. 2):

первый приоритет — пассажирские и иные суда, следующие по расписанию;

второй приоритет — нефтеналивные суда с нефтью и / или нефтепродуктами, а также их остатками, с температурой вспышки паров ниже 60 °С, суда с взрывчатыми и отравляющими веществами, суда со скоропортящимися грузами;

третий приоритет — коммерческие внеочередные суда (суда, которые воспользовались платной услугой внеочередного пропуска через шлюз);

четвертый приоритет — средства плавучей механизации и суда технического флота, а также суда, перевозящие специальные грузы;

пятый приоритет — сухогрузные самоходные суда и толкаемые составы, нефтеналивные суда и составы с нефтью и / или нефтепродуктами, а также их остатками, с температурой вспышки паров 60 °С и выше;

шестой приоритет — сухогрузные буксируемые составы, плоты и иные суда.

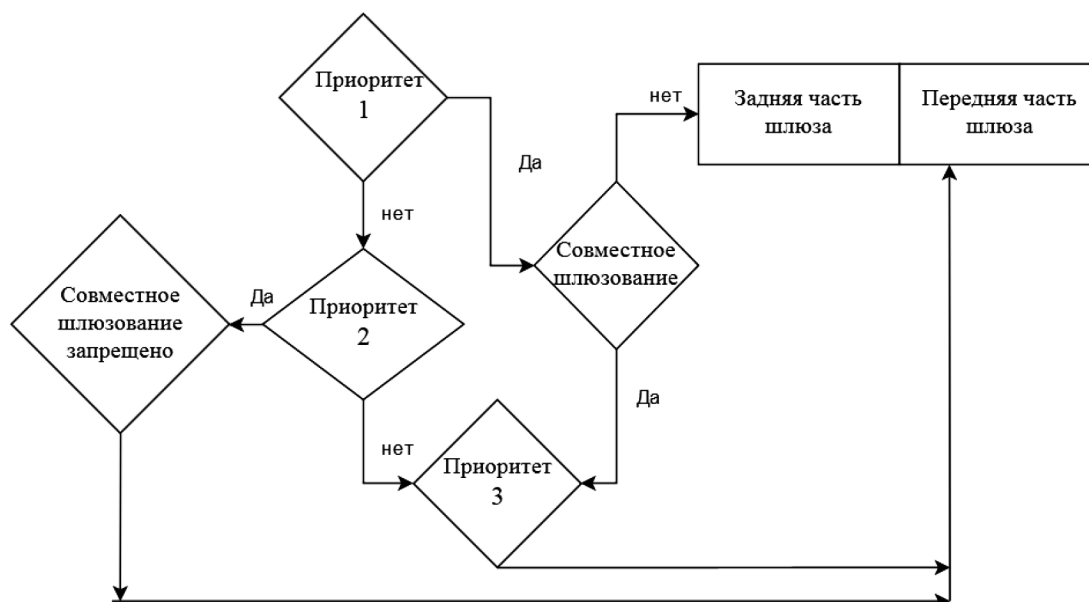


Рис. 2. Упрощенный алгоритм пропуска

ТАСОД позволит решать задачу снижения неравномерности подхода судов и уменьшения количества холостых шлюзований, что положительно скажется не только на увеличении пропускной способности шлюзов, но и на экономии водных ресурсов и оптимизации энергетических затрат [7].

При скоплении у границ шлюза или шлюзованного участка ВВП судов более чем на два шлюзования система должна формировать специальную очередь шлюзований, которая обеспечит наиболее безопасную и рациональную процедуру судопропуска.

Кроме того, в алгоритм должны включены следующие разрешения на шлюзование:

- нефтеналивных судов и составов с нефтью и / или нефтепродуктами, а также их остатками независимо от температуры вспышки паров;

- сухогрузных судов и составов, судов технического флота с нефтеналивными самоходными судами и составами с нефтью и / или нефтепродуктами, а также их остатками с температурой вспышки паров 60 °С и более;

- пассажирских судов (в том числе скоростных) с сухогрузными судами и составами и судами технического флота.

В случае совместного шлюзования в алгоритм также должны быть заложены следующие ограничения:

- нефтеналивные самоходные суда размещаются первыми в камере шлюза;
- требуемая дистанция более 1 м между бортами судов в случае, когда сухогрузные суда поставлены в камеру шлюза на траверзе нефтеналивного самоходного судна;

- пассажирские скоростные суда должны быть размещены в камере шлюза последними и устанавливаются таким образом, чтобы у них на траверзе не было других водоизмещающих судов (за исключением маломерных судов);

- суда, перевозящие взрывчатые или отравляющие вещества, должны быть размещены в камере шлюза без остановки у причальных стенок или причальных палов;

– маломерные суда должны быть размещены в камере шлюза последними;
– совместное шлюзование судов, перевозящих в качестве груза отравляющие, взрывчатые и радиоактивные вещества, с иными судами запрещается [8].

Согласно исследованиям [9], [10], вследствие использования электронной очереди пропускная способность увеличивается на 15–30 %.

Система в учреждениях, использующих электронную очередь: пунктах пропуска, пунктах пограничного контроля и таможни, медучреждениях, обычно имеет следующий порядок действий:

- вызвать следующего клиента;
- повторить вызов;
- отложить вызов;
- начать / закрыть рабочее время;
- приостановить работу.

Этапы проектирования системы электронной очереди:

- определение видов услуг;
- определение необходимого вспомогательного оборудования;
- выбор, реализация программной и аппаратной части для клиентов и операторов;
- разработка системы с расчетом конкретных требований заказчика;
- выбор периферийного оборудования.

Результаты (Results)

Электронную очередь необходимо разделить по времени на два этапа (отрезка).

Первый этап. На начальном отрезке формируется предварительная электронная очередь. На нем порядок очередности судов представляется без учета каких-либо задержек и внештатных ситуаций. Однако, с той или иной вероятностью, судно или группа судов может столкнуться с определенными ограничениями или по каким-либо причинам изменить график следования. По этой причине на предпоследнем, т. е. критическом участке, система занесет судно из предварительной базы с нечеткой позицией в списке очереди в исполнительную базу.

Второй этап. Предполагается, что регулировка скорости всех судов, осуществляющих движение на трассе ВВП, оказывает благоприятное влияние на безопасность судоходства, снижая тем самым нагрузку на судоводителей. Система в автоматизированном (автоматическом) режиме будет отслеживать каждое судно к ожидаемому времени прибытия в порядке сформированной очереди и давать рекомендации относительно режима изменения скорости движения на определенных участках с учетом всех возможных обстоятельств. Для того чтобы исключить пренебрежение правилами и ошибки, возникающие из-за человеческого фактора, должны быть введены контрольные точки (КТ), при прохождении которых система будет заранее сообщать ожидаемое время прибытия, опоздания или время заблаговременного прибытия, если судно идет с опережением графика. Зная расстояние до КТ или шлюза и период времени, в течение которого необходимо прибыть на КТ, можно рассчитать необходимую скорость. Однако при этом необходимо учитывать прохождение участков, накладывающих определенные ограничения, а также необходима оптимизация, исключая случаи, когда на участке, запрещающем обгон судов, первым будет двигаться тихоходное судно, создавая тем самым торможение всей колонны.

ТАСОД позволит распределить неравномерный судопоток по Волго-Балтийскому бассейну, а поскольку расход топлива кубически пропорционален скорости, данные меры благоприятно скажутся на уменьшении расхода топлива, что позволит снизить затраты, связанные с простоями судов в ожидании шлюзования. Следовательно, предполагаемый алгоритм работы системы должен минимизировать простой судов на якоре. Для того чтобы система была жизнеспособной, следует добавить специальные условия, благодаря которым фрахтователи могут компенсировать свою ответственность за демередж, владельцы — сократить расходы на бункер, а порты — снизить риски и выбросы в их регионе.

Обсуждение (Discussion)

В источнике [11] отмечается, что внедрение систем организации движения судов, таких как ТАСОД, позволит улучшить координацию судоходства, увеличить пропускную способность и повысить уровень безопасности на ВВП, что, в свою очередь, позволит создать предпосылки для внедрения элементов цифровой экономики в транспортной отрасли.

Заключение (Conclusion)

С развитием электронных технологий наблюдается рост количества и качества различной информации, а именно: о наличии причала, о метеорологических данных о скорости корабля и др. Вследствие этого заинтересованные стороны могут извлечь большую выгоду благодаря более тщательному анализу влияния политики по обеспечению безопасности и чартерных контрактов на эффективность работы.

Необходимо отметить, что применение телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов может благоприятно отразиться на снижении простоев судов и увеличении пропускной способности. Анализируя современные тенденции развития беспилотных технологий и роботизации [2], [3], [6], [11], следует обратить внимание на то, что использование данной системы-приобретает все большую перспективность и рациональность, так как позволяет уменьшить влияние человеческого фактора как со стороны судна, так и со стороны портовых и береговых средств.

К основным преимуществам электронной очереди в телекоммуникационной автоматизированной системе организации движения относятся следующие:

- предварительная подготовка судна к прохождению шлюзов.
- увеличение скорости обслуживания до 30 % благодаря структурированию и организации судопропуска;
- фиксирование истории обслуживания: накопленные аналитические данные используются для анализа и повышения эффективности профильной деятельности (например, информация о востребованности услуг, колебании спроса и т. д.), а также контроля работы персонала.
- улучшение репутации за счет использования инновационных технологий.

В 2018 г., по приказу Росморречфлота, введен в эксплуатацию региональный центр комплексной автоматизированной системы сбора и оперативной передачи актуализированных электронных навигационных карт на суда подведомственных Росморречфлоту организаций.

В Волго-Балтийском бассейне проводится тестирование перспективных систем мониторинга средств навигационного оборудования (СНО), в том числе по каналам автоматической идентификационной системы (АИС). В конце 2018 г. на трех участках Ладожского озера запрограммированы и эксплуатируются так называемые *виртуальные СНО — АИС*. Проводятся испытания комплектов мониторинга физических (реальных) СНО — АИС с целью определения возможности их использования на внутренних водных путях РФ. Также в 2018 г. был введен в эксплуатацию комплекс оборудования ГЛОНАСС / GPS в пос. Свирица, Ленинградской обл. (ККС «Свирица»). В 2019 г. планируется проверка качества сигнала [12]. Исходя из этого телекоммуникационные автоматизированные системы организации движения судов целесообразно создавать на примере ВББ, используя имеющийся опыт специалистов и технические возможности ФБУ «Администрация «Волго-Балт» и в дальнейшем проецируя его на другие бассейны ВВП РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин А. В. К вопросу создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения на внутренних водных путях / А. В. Васин, В. В. Каретников, А. И. Меншиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 870–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-870-879.
2. Рублёвский В. А. Перспективы беспилотных судов в автоматизированных портах / Портоориентированная логистика – 2018: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. 1–2 ноября

2018 г. / В. А. Рублёвский, А. И. Меншиков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — С. 181–188.

3. Каретников В. В. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.

4. Chen Z. Classification of vessel motion pattern in inland waterways based on Automatic Identification System / Z. Chen, J. Xue, C. Wu, L. Qin, L. Liu, X. Cheng // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 161. — Pp. 69–76. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.072.

5. Кондратьев А. И. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России / А. И. Кондратьев, О. А. Худяков, А. Н. Попов // Транспортное дело России. — 2016. — № 6. — С. 138–140.

6. Chabot D. Trends in drone research and applications as the Journal of Unmanned Vehicle Systems turns five / D. Chabot // Journal of Unmanned Vehicle Systems. — 2018. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. VI–XV. DOI: 10.1139/juvs-2018-0005.

7. Решетников М. А. Методические вопросы обоснования глубин на подходах к судоходным гидротехническим сооружениям / М. А. Решетников, И. В. Липатов // Современный научный вестник. — 2013. — Т. 6. — № 2. — С. 9–14.

8. Решетников М. А. Обоснование безопасных глубин для крупнотоннажного судна при его выходе из камеры судоходного шлюза: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Максим Алексеевич Решетников. — Н. Новгород, 2016. — 150 с.

9. Дыров В. Б. Применение автоматизированных систем обслуживания клиентов ПАО «МРСК Сибири» / В. Б. Дыров, Я. А. Кунгс // Инновационная наука. — 2016. — № 1–2 (13). — С. 46–49.

10. Черкашнев Р. Ю. Направления развития инновационной деятельности в коммерческом банке / Р. Ю. Черкашнев // Социально-экономические явления и процессы. — 2017. — Т. 12. — № 1 — С. 107–113.

11. Kim K. I. Context-aware information provisioning for vessel traffic service using rule-based and deep learning techniques / K. I. Kim, K. M. Lee // International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. — 2018. — Vol. 18. — Is. 1. — Pp. 13–19. DOI: 10.5391/IJFIS.2018.18.1.13.

12. Волго-Балт: путь между Севером и Югом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sharkgroup.ru/blog/volgo-balt-put-mezhdu-severom-i-yugom.html> (дата обращения: 10.01.2019).

REFERENCES

1. Vasin, Andrey V., Vladimir V. Karetnikov, and Aleksandr I. Menshikov. “Creation of automated telecommunication traffic routing system on inland waterways.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 870–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4- 870-879.

2. Rublevskii, V. A., and A. I. Menshikov. “Perspektivy bespilotnykh sudov v avtomatizirovannykh portakh.” *Porto orientirovannaya logistika – 2018: Materialy 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2018. 181–188.

3. Karetnikov, Vladimir V., Ivan V. Pashchenko, and Andrei I. Sokolov. “Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.

4. Chen, Zhijun, Jie Xue, Chaozhong Wu, LingQiao Qin, Liqun Liu, and Xiaozhao Cheng. “Classification of vessel motion pattern in inland waterways based on Automatic Identification System.” *Ocean Engineering* 161 (2018): 69–76. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.072

5. Kondratiev, A., O. Khudyakov, and A. Popov. “On the implementation of unmanned vessels in the Russian merchant marine.” *Transport business of Russia* 6 (2016): 138–140.

6. Chabot, Dominique. “Trends in drone research and applications as the Journal of Unmanned Vehicle Systems turns five.” *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 6.1 (2018): VI–XV. DOI: 10.1139/juvs-2018-0005.

7. Reshetnikov, M. A., and I. V. Lipatov. “Metodicheskie voprosy obosnovaniya glubin na podkhodakh k sudokhodnym gidrotekhnicheskim sooruzheniyam.” *Sovremennyy nauchnyy vestnik* 6.2 (2013): 9–14.

8. Reshetnikov, M. A. Obosnovanie bezopasnykh glubin dlya krupnotonnazhnogo sudna pri ego vykhode iz kamery sudokhodnogo shlyuza. PhD diss. Nizhnii Novgorod, 2016.

9. Dyrov, V. B., and Ya. A. Kungs. “Primenenie avtomatizirovannykh sistem obsluzhivaniya klientov PАО «МРСК Сибири».” *Innovatsionnaya nauka* 1-2(13) (2016): 46–49.

10. Cherkashnev, Roman Yuryevich. "The directions of development of innovative activity in commercial bank." *Social and Economic Phenomena and Processes* 12.1 (2017): 107–113.

11. Kim, Kwang-Il, and Keon Myung Lee. "Context-aware information provisioning for vessel traffic service using rule-based and deep learning techniques." *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems* 18.1 (2018): 13–19. DOI: 10.5391/IJFIS.2018.18.1.13.

12. Volgo-Balt: put' mezhdru Severom i Yugom. Web. 10 Jan. 2019 <<https://www.sharkgroup.ru/blog/volgo-balt-put-mezhdru-severom-i-yugom.html>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_svpv@gumrf.ru,

spguwc-karetnikov@yandex.ru

Меншиков Александр Игоревич — аспирант

Научный руководитель:

Каретников Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: gogashe@yandex.ru

Рудых Сергей Витальевич —

доктор технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_svpv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir 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: kaf_svpv@gumrf.ru,

spguwc-karetnikov@yandex.ru

Menshikov, Aleksandr I. — Postgraduate

Supervisor:

Karetnikov, Vladimir V.

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: gogashe@yandex.ru

Rudy'kh, Sergey V. —

Dr. of Technical Sciences

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str. St. Petersburg 198035,

Russian Federation

e-mail: kaf_svpv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2019 г.

Received: March 3, 2019.

ROUTING THE NETWORKS WITH NEGATIVE WEIGHTS OF LINKS IN THE MATLAB OPTIMIZATION PACKAGE

V. V. Saharov, A.A. Chertkov, L.B. Ochina

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

The subject of research in the field of unmanned maritime and river navigation vessels is the new technological principles and models of unmanned navigation with high reliability and accuracy in the autonomous regimes on the specified path, with the use of satellite navigation, electronic charts and ground-based radio navigation systems. Non-crew vessels management from the shore requires the implementation of group management by the mobile objects, taking into account the update of the local maps of the shipping situation. When selecting the vessels routes, it is necessary to solve the operational problem of determining the shortest vessel route (Autonomous mobile object) at the specific navigation conditions, which directly defines the energy efficiency of the vessel in the voyage. The solution of the operational problem of selecting the shortest paths (routes) for a group of vessels moving in the direction of the specified targets with known coordinates located in a limited space is presented in the paper. A model and an optimization algorithm allowing, in comparison with existing solutions, to significantly expand the class of tasks by introducing the negative weights of individual sections of the path (graph arcs) and make the transition to solving high-dimensional problems are proposed. The key issue in the problem of automation and formation of the routes is the selection of the mathematical apparatus not only for the calculation of the shortest routes, but also for their recovery. For this purpose, a recursive optimization method based on the integer linear programming is proposed for high-dimensional tasks. The practical implementation of the proposed algorithm is demonstrated by the example of calculating a network model with a complex topology, using an iterative procedure for the program compiled in the MATLAB codes. It is shown that the computer model realized on its basis has properties of convergence of calculations and convenience of practical use. In contrast to the existing ones, the proposed model allows to remove the restrictions associated with the presence of negative weights and cycles at the network, to automate the calculations of the shortest paths in the places of branching by means of digital technologies. The correctness of the obtained solutions is confirmed, which makes it possible to use the model and algorithm as a component of the tasks tool designed to control the transport process.

Keywords: automation, algorithm, route, shortest paths, network model, network links, negative weight links, optimization, recursive procedure.

For citation:

Saharov, Vladimir V., Alexander A. Chertkov, and Ludmila B. Ochina. "Routing the networks with negative weights of links in the MATLAB optimization package." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 11.2 (2019): 230–242. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-230-242.

УДК 681.5

МАРШРУТИЗАЦИЯ СЕТЕЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ВЕСАМИ ЗВЕНЬЕВ В ПАКЕТЕ ОПТИМИЗАЦИИ MATLAB

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Л. Б. Очина

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

В рамках исследований новых технологических принципов и моделей беспилотного судовождения с использованием спутниковых средств навигации, электронных карт и наземных радионавигационных систем решается задача управления безэкипажными судами, функционирующими в автономных режимах при следовании по заданному пути с целью осуществления группового управления подвижными объектами с учетом обновления локальных карт судоходной обстановки. При выборе маршрутов движения судов требуется решать операционную задачу определения наикратчайшего пути следования

судна (автономного подвижного объекта) в конкретных навигационных условиях, что непосредственно определяет энергоэффективность судна в рейсе. В работе представлено решение операционной задачи выбора наикратчайших путей (маршрутов) для группы судов, движущихся в направлении заданных целей с известными координатами, расположенными в ограниченном пространстве. Предложен алгоритм оптимизации, позволивший, в сравнении с существующими алгоритмами, значительно расширить класс решаемых задач путем введения отрицательных весов отдельных участков пути (дуг графа) и осуществить переход к решению задач высокой размерности. Ключевым вопросом в проблеме автоматизации и формирования маршрутов является выбор математического аппарата не только для расчета кратчайших маршрутов, но и для их восстановления. С этой целью для задач большой размерности в работе предложен рекурсивный метод оптимизации, базирующийся на целочисленном линейном программировании. Практическая реализация предложенного алгоритма демонстрируется на примере расчета сетевой модели со сложной топологией с применением итерационной процедуры по программе, составленной в кодах MATLAB. Показано, что реализованная на ее основе компьютерная модель обладает свойствами сходимости вычислений и удобством практического использования. В отличие от существующих предложенная модель позволяет снять ограничения, связанные с наличием отрицательных весов и циклов на сети, и автоматизировать расчеты кратчайших путей в местах разветвлений средствами цифровых технологий. Подтверждена корректность полученных решений, что позволяет использовать модель и алгоритм как составляющую инструмента задач, предназначенных для управления транспортным процессом.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, маршрут, кратчайшие пути, сетевая модель, звенья сети, отрицательные веса звеньев, оптимизация, рекурсивная процедура.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Маршрутизация сетей с отрицательными весами звеньев в пакете оптимизации MATLAB / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Л. Б. Очина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 230–242. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-230-242.

Введение (Introduction)

Вопросы выбора маршрутов движения судов в условиях применения безэкипажных технологий организации движения становятся исключительно актуальными, требующими оперативных решений при изменениях ситуации как на линии, так и в портах назначения. Так, например, для экономии топлива и энергии на линии необходимо выполнять оценки резерва ходового времени судна до порта назначения и использовать его без изменений объемов транспортной работы, совершаемой судном. При движении судов в условиях штормовой погоды и групповом управлении судами возможны решения, связанные с коррекцией расписания, также приводящей к образованию резервов ходового времени. Резервы экономии топлива и энергии могут быть также оценены и использованы при прохождении шлюзованных участков пути, что требует гибких оперативных решений диспетчерских служб. Выбор наикратчайших либо наиболее эффективных маршрутов движения судов с учетом загрузки, стоимости груза, расходов на перевозки, характеристик логистики и других факторов — это тот класс задач, который требует для принятия оптимальных решений создания новых операционных технологий, моделей и алгоритмов, базирующихся на инструментариях компьютерных систем. Оценка и выбор оптимальных (наикратчайших) маршрутов для организации движения судов могут производиться методами организации движения с использованием исследования операций. Этот класс задач принято решать с помощью теории графов, с введением узлов и дуг с различными весами и другими способами, что позволяет в удобной форме графически интерпретировать как объекты, так и их модели.

Для моделирования на графах стохастических и детерминированных систем созданы многочисленные алгоритмы, фактически формирующие инструменты для решения задач данного класса. К основополагающим работам в этой предметной области следует отнести алгоритмы Дейкстры [1], Беллмана – Форда [2], модифицированный алгоритм Беллмана – Форда, подробно рассмотренные в работах [3]–[7]. С развитием интеллектуальных методов и систем, нейронных сетей, генетических алгоритмов, а также Fuzzy Systems, моделей ANFIS и других появились

алгоритмы для принятия решений в системах высокой размерности, представленные в работах [8]–[10], в которых определены новые операционные пространства для координации действий по управлению подвижными объектами.

Оптимизационные задачи на операционных пространствах приобретают направленность на научное обоснование и решение практических задач выбора маршрутов движения судов, использования мобильных роботов, видеороботов в системах обслуживания и оказания транспортных услуг в условиях рыночного спроса [11]–[14]. Научная и практическая значимость сетевых моделей существенно расширяется. Их применение для формирования маршрутов движения судов, сходящихся в узлах и на операционных подпространствах на подходах к портам, при лоцманских проводках, в условиях приливов и отливов требует принятия особых мер по обеспечению безопасности и безаварийности выполнения всех технологических операций. Системное решение этих задач требует разработки и создания алгоритмической и программной инструментальной базы для безэкипажного управления судами с берега.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим оценку и выбор кратчайших маршрутов движения судов на выбранных операционных подпространствах на примере разветвленной сети с системой целей, моделирующих реальную ситуацию. Будем считать, что известными являются координаты расположения целей на подпространствах. Задача состоит в выборе маршрутов, движение по которым к цели потребует минимальных временных затрат. Рабочее время при управлении группой судов оценим по времени $T_{\max}$, необходимому для прибытия к наиболее удаленной цели. Скорость движения судов, согласно принятой терминологии в маршрутизации сетей — «агентов», выберем одинаковой для всех объектов. Временем «обработки» судов при достижении целей пренебрегаем. Принятые условия позволяют принять скорость «агента», равной единице. Тогда время выполнения операции условно можно принять равным длине маршрута движения судна.

В процессе решения задачи используем рекуррентный способ последовательных операций, который применяют для параметрической оценки маршрута каждого «агента». На нулевой итерации может быть выбран произвольно любой «агент», для которого далее находится самая близко расположенная к нему цель. Далее фиксируется расположение «агента» в новом положении, и решение повторяется до момента прохождения этим «агентом» всех заданных ему целей. Согласно рекурсии, эти цели исключаются из перечня (списка) целей, выбирается следующий по очередности «агент», для которого задача решается аналогично. Вычислительный алгоритм можно отнести к классу локально оптимальных (или «жадных») алгоритмов, что связано с возможностью попадания решения в локальный минимум.

В предлагаемой работе приведен алгоритм, который, в отличие от алгоритмов Дейкстры и Беллмана – Форда, позволяющих также решать задачу о кратчайшем пути, обеспечивает одно-временную оценку кратчайших путей между любыми двумя узлами сети. Этот алгоритм позволяет производить оценку переменных состояния на взвешенных графах как с положительными, так и отрицательными весами ребер, обеспечивая возможность введения корректирующих действий по результатам вычислений с учетом сходимости решения к оптимуму. В известном алгоритме Беллмана – Форда эти операции не выполняются, а применение динамического программирования для оценки кратчайших путей является эффективным только при решении задач невысокой размерности. При этом, согласно предложенному алгоритму, все подзадачи решаются в инверсном времени с сохранением данных вычислений на каждом шаге.

Формальное описание. Предположим, что требуется найти кратчайшие пути между любыми двумя узлами взвешенного графа. При этом дуги графа с указанием расстояний между узлами могут принимать как положительные, так и отрицательные значения (при отсутствии циклов с отрицательной длиной). Теоретически отсутствующей дуге в графе приписывается вес, равный бесконечности. Однако на практике ограничиваются весом, равным конечному (достаточно большому) числу, которое могло быть больше расстояния любого пути в этом графе.

Поясним сначала на простом графе содержательную составляющую метода. Пусть имеются три узла: i, j и k , а также заданы расстояния между ними (рис. 1). При выполнении условия $d_{ij} > d_{ik} + d_{kj}$ целесообразно произвести замену пути $i \rightarrow j$ по схеме $i \rightarrow k \rightarrow j$. Эта замена обозначает *применение треугольного оператора*. Ее следует выполнять в процессе реализации алгоритма.

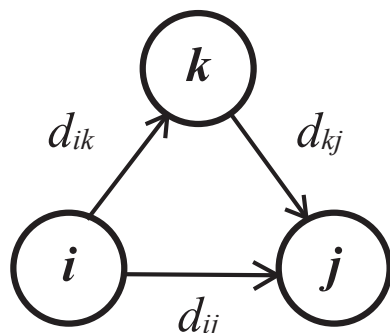


Рис. 1. Определение треугольного оператора

Алгоритм требует выполнения приведенной далее последовательности действий.

Начальный шаг. Формируем исходную матрицу расстояний D_0 и матрицу последовательности прохождения узлов S_0 . Помечаем знаком «—» диагональные элементы обеих матриц (табл. 1 и 2), поскольку эти элементы в вычислительном алгоритме не используются. Примем $k = 1$ и перейдем к основному шагу.

Таблица 1

Начальная матрица расстояний

	1	2	...	j	...	n
1	—	d_{12}	...	d_{1j}	...	d_{1n}
2	d_{21}	—	...	d_{2j}	...	d_{2n}
□	...	...	...	...	...	...
i	d_{i1}	d_{i2}		d_{ij}	...	d_{in}
□	...	...	...	...	...	...
n	d_{n1}	d_{n2}	...	d_{nj}	...	—

Таблица 2

Матрица последовательности узлов

	1	2	...	j	...	n
1	—	2	...	J	...	n
2	1	—	...	j	...	n
□	...	...	...	...	...	...
i	1	2		J	...	n
□	...	...	...	...	...	...
n	1	2	...	j	...	—

Основной шаг k . Зададим для выбора элемента матрицы строку k и столбец k как ведущие компоненты вычислительного алгоритма. Применим треугольный оператор к элементам d_{ij} матрицы D_{k-1} .

Если соблюдаются условия, определенные неравенством

$$d_{ik} + d_{kj} < d_{ij} (i \neq k, j \neq k \text{ и } i \neq j),$$

то выполняем следующие действия:

- формируем матрицу Dk , заменяя в матрице $Dk-1$ элемент d_{ij} суммой $d_{ik} + d_{kj}$;
- заменяем в матрице $Sk-1$ элементы $s_{i,j}$ на k и образуем Sk . Затем полагаем $k = k + 1$ и повторяем операцию, предусмотренную шагом k .

Ведущими строкой и столбцом на шаге $k = n$ полагаем последнюю строку и последний столбец матрицы D_{n-1} . Аналогично строим матрицы D_n и S_n . Далее никаких действий не производим, что соответствует завершению вычислений.

Пример. Определим для сети, приведенной на рис. 2, кратчайшие пути между произвольно выбранными двумя узлами.

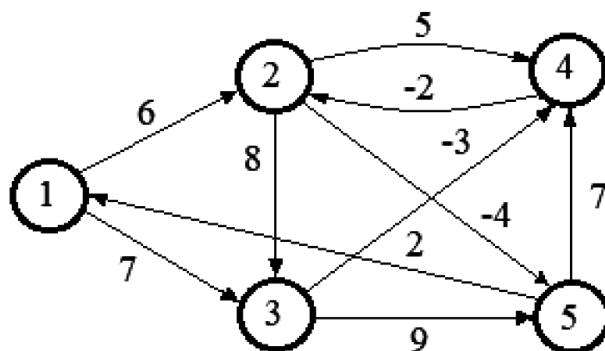


Рис. 2. Исходный взвешенный граф

Рассмотрим подробно работу алгоритма в пошаговом режиме с использованием фрагментов программы в кодах MATLAB (MatLab 2017b (9.3.0.713579), License Number: 123456).

Шаг 0. Строятся начальные матрицы расстояний (весов) D_0 (табл. 3) и последовательности узлов S_0 (табл. 4) непосредственно по заданной структуре сети.

Таблица 3

Начальная матрица весов ребер взвешенного графа

	1	2	3	4	5
1	0	6	7	100	100
2	100	0	8	5	-4
3	100	100	0	-3	9
4	100	-2	100	0	100
5	2	100	100	7	0

Таблица 4

Начальная матрица последовательности узлов S_0

	1	2	3	4	5
1	0	2	3	4	5
2	1	0	3	4	5
3	1	2	0	4	5
4	1	2	3	0	5
5	1	2	3	4	0

Для формирования матрицы S_0 инициализируются вершины графа согласно алгоритму.

Приведем фрагмент программы инициализации вершин графа:

```
for J=1:n
    if J==I
        S(I,J)=0;
    else
        S(I,J)=J;
    end
end
```


Шаг 1. На этом шаге $k = 1$. Это означает, что ведущими строкой и столбцом станут первая строка и первый столбец, выделенные на матрице D_0 светло-серым фоном. Рамкой и более темным фоном выделены следующие элементы пятой строки, значения которых можно улучшить с помощью *треугольного оператора*:

– элемент d_{52} , так как $d_{52} > d_{51} + d_{12}$;

– элемент d_{53} , так как $d_{53} > d_{51} + d_{13}$.

На первом шаге вычислений в цикле формируем матрицы D_1 и S_1 на основе матриц D_0 и S_0 в указанной последовательности:

1) заменим значение $d_{52} = 100$ (из матрицы D_0) суммой значений $d_{51} + d_{12} = 2 + 6 = 8$ и установим новое значение элемента $s_{52} = 1$ с шагом $k = 1$;

2) заменим значение $d_{53} = 100$ суммой значений $d_{51} + d_{13} = 2 + 7 = 9$, а в матрице S_1 установим новое значение элемента s_{53} , равное единице. В результате матрицы D_1 и S_1 примут вид, приведенный в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Матрица D_1

	1	2	3	4	5
1	0	6	7	100	100
2	100	0	8	5	-4
3	100	100	0	-3	9
4	100	-2	100	0	100
5	2	8	9	7	0

Таблица 6

Матрица S_1

	1	2	3	4	5
1	0	2	3	4	5
2	1	0	3	4	5
3	1	2	0	4	5
4	1	2	3	0	5
5	1	1	1	4	0

Шаг 2. На этом шаге $k = 2$. Ведущими строкой и столбцом станут вторая строка и второй столбец, выделенные на матрице D_1 светло-серым фоном. Рамкой и более темным фоном выделены следующие элементы, значения которых также можно улучшить с помощью *треугольного оператора*:

– в первой строке — элементы d_{14} и d_{15} , так как $d_{14} > d_{12} + d_{24}$ и $d_{15} > d_{12} + d_{25}$;

– в четвертой строке — элементы d_{41} , d_{43} и d_{45} , так как $d_{41} > d_{42} + d_{21}$, $d_{43} > d_{42} + d_{23}$ и $d_{45} > d_{42} + d_{25}$.

На втором шаге вычислений в цикле формируем значения матриц D_2 и S_2 на основе матриц D_1 и S_1 в следующем порядке:

1) заменим значения $d_{14} = 100$ и $d_{15} = 100$ суммами значений, соответственно, $d_{12} + d_{24} = 6 + 5 = 11$, $d_{12} + d_{25} = 6 + (-4) = 2$ и установим значения элементов $s_{14} = s_{15} = 2$;

2) заменим значения $d_{41} = 100$, $d_{43} = 100$, $d_{45} = 100$ суммами значений:

$$d_{42} + d_{21} = (-2) + 100 = 98, d_{42} + d_{23} = (-2) + 8 = 6, d_{42} + d_{25} = (-2) + (-4) = -6$$

и установим значения элементов $s_{41} = s_{43} = s_{45} = 2$.

В итоге матрицы D_2 и S_2 примут вид, приведенный в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Матрица D_2

	1	2	3	4	5
1	0	6	7	11	2
2	100	0	8	5	-4
3	100	100	0	-3	9
4	98	-2	6	0	-6
5	2	8	9	7	0

Таблица 8

Матрица S_2

	1	2	3	4	5
1	0	2	3	2	2
2	1	0	3	4	5
3	1	2	0	4	5
4	2	2	2	0	2
5	1	1	1	4	0

Шаг 3. На этом шаге $k = 3$. Ведущими строкой и столбцом становятся третья строка и третий столбец, выделенные на матрице D_2 светло-серым фоном. Рамкой и более темным фоном выделены элементы, значения которых можно улучшить с помощью треугольного оператора:

- в первой строке — элемент d_{14} , так как $d_{14} > d_{13} + d_{34}$;
- в пятой строке — элемент d_{54} , так как $d_{54} > d_{53} + d_{34}$.

На третьем шаге вычислений в цикле формируем значения матриц D_3 и S_3 на основе матриц D_2 и S_2 путем замены значений $d_{14} = 11$, $d_{54} = 7$ суммами значений: $d_{13} + d_{34} = 7 + (-3) = 4$, $d_{53} + d_{34} = 9 + (-3) = 6$ и устанавливаем значения элементов $s_{14} = s_{54} = 3$.

Таким образом, матрицы D_3 и S_3 примут вид, приведенный в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Матрица D_3

	1	2	3	4	5
1	0	6	7	4	2
2	100	0	8	5	-4
3	100	100	0	-3	9
4	98	-2	6	0	-6
5	2	8	9	6	0

Таблица 10

Матрица S_3

	1	2	3	4	5
1	0	2	3	3	2
2	1	0	3	4	5
3	1	2	0	4	5
4	1	2	2	0	2
5	1	1	1	3	0

Шаг 4. На этом шаге $k = 4$. Ведущими строкой и столбцом станут четвертая строка и четвертый столбец, которые выделены на матрице D_2 светло-серым фоном. Рамкой и более темным фоном выделены элементы, значения которых можно улучшить с помощью *треугольного оператора*:

- в первой строке — элементы d_{12}, d_{15} , так как $d_{12} > d_{14} + d_{42}$ и $d_{15} > d_{14} + d_{45}$;
- в третьей строке — элементы d_{31}, d_{32}, d_{35} , так как $d_{31} > d_{34} + d_{41}$, $d_{32} > d_{34} + d_{42}$ и $d_{35} > d_{34} + d_{45}$;
- в пятой строке — элемент d_{52} , так как $d_{52} > d_{54} + d_{42}$.

На четвертом шаге вычислений формируем в цикле значения матриц D_4 и S_4 на основе матриц D_3 и S_3 в следующем порядке:

1) заменим значения $d_{12} = 6$ и $d_{15} = 2$ суммами значений, соответственно, $d_{14} + d_{42} = 4 + (-2) = -2$, $d_{14} + d_{45} = 4 + (-6) = -2$ и устанавливаем значения элементов $s_{12} = s_{15} = 4$;

2) заменим значения $d_{31} = 100$, $d_{32} = 100$, $d_{35} = 9$ суммами значений, соответственно:

$$d_{34} + d_{41} = (-3) + 98 = 95, d_{34} + d_{42} = (-3) + (-2) = -5, d_{34} + d_{45} = (-3) + (-6) = -9$$

и установим значения элементов $s_{31} = s_{32} = s_{35} = 4$;

3) заменим значение $d_{52} = 8$ суммой значений $d_{54} + d_{42} = 6 + (-2) = 4$ и установим значение элемента $s_{52} = 4$. Таким образом, матрицы D_4 и S_4 примут вид, приведенный в табл. 11 и 12.

Таблица 11

Матрица D_4

	1	2	3	4	5
1	0	2	7	4	-2
2	100	0	8	5	-4
3	95	-5	0	-3	-9
4	98	-2	6	0	-6
5	2	4	9	6	0

Таблица 12

Матрица S_4

	1	2	3	4	5
1	0	4	3	3	4
2	1	0	3	4	5
3	4	4	0	4	4
4	2	2	2	0	2
5	1	4	1	3	0

Шаг 5. На этом шаге $k = 5$. Ведущими строкой и столбцом станут пятая строка и пятый столбец, выделенные более светлым фоном на матрице D_4 . Рамкой и более темным фоном выделены следующие элементы, значения которых можно улучшить с помощью *треугольного оператора*:

– во второй строке — элементы d_{21}, d_{23}, d_{24} , так как $d_{21} > d_{25} + d_{51}$, $d_{23} > d_{25} + d_{53}$ и $d_{24} > d_{25} + d_{54}$;

– в третьей строке — элемент d_{31} , так как $d_{31} > d_{35} + d_{51}$;

– в четвертой строке — элементы d_{41}, d_{43} , так как $d_{41} > d_{45} + d_{51}$ и $d_{43} > d_{45} + d_{53}$.

На пятом шаге вычислений в цикле формируем значения матриц D_5 и S_5 на основе матриц D_4 и S_4 в следующем порядке:

1) заменим значение $d_{21} = 100$, $d_{23} = 8$ и $d_{24} = 5$ суммами значений соответственно:

$$d_{25} + d_{51} = (-4) + 2 = -2, d_{25} + d_{53} = (-4) + 9 = 5, d_{25} + d_{54} = (-4) + 6 = 2$$

и установим значение элемента $s_{21} = s_{23} = s_{24} = 5$;

2) заменим значение $d_{31} = 95$ суммой значений $d_{35} + d_{51} = (-9) + 2 = -7$ и установим значение элементов $s_{31} = 5$;

3) заменим значения $d_{41} = 98$, $d_{43} = 6$ суммами значений, соответственно, $d_{45} + d_{51} = (-6) + 2 = -4$, $d_{45} + d_{53} = (-6) + 9 = 3$ и установим значения элементов $s_{41} = 5$, $s_{43} = 5$.

В итоге матрицы D_5 и S_5 примут вид, приведенный в табл. 13 и 14.

Таблица 13

Матрица D_5

	1	2	3	4	5
1	0	2	7	4	-2
2	-2	0	5	2	-4
3	-7	-5	0	-3	-9
4	-4	-2	3	0	-6
5	2	4	9	6	0

Таблица 14

Матрица S_5

	1	2	3	4	5
1	0	4	3	3	4
2	5	0	5	5	5
3	5	4	0	4	4
4	5	2	5	0	2
5	1	4	1	3	0

Фрагмент программы применения треугольного оператора, составленной в кодах MATLAB. Итерации с применением треугольного оператора:

```
while k <= n
for I = 1:n
for J = 1:n
if J ~ I && D(I, J) > D(I, k) + D(k, J)
D(I, J) = D(I, k) + D(k, J);
S(I, J) = k;
end
end
end
end
```

На пятой итерации работа алгоритма завершается.

Результаты (Results)

Конечные матрицы D_5 и S_5 (см. табл. 13 и 14) содержат всю необходимую информацию для определения кратчайших путей между любыми двумя узлами. Например, на графе кратчайшее расстояние между узлами 1 и 5 равно -2.

Для получения последовательности прохождения узлов на выбранных маршрутах следует иметь в виду, что сегмент маршрута (i, j) должен состоять из ребра (i, j) только тогда, когда $s_{ij} = j$. В иных случаях узлы i и j связаны, по крайней мере, через один промежуточный узел. Покажем это на примере.

Найдем последовательность узлов для кратчайшего пути из первой в пятую вершину, т. е. маршрута $1 \rightarrow 5$ с расстоянием $d_{15} = -2$ (см. табл. 13). Из табл. 14 видно, что $s_{1,5} = 4$ ($s_{1,5} \neq 5$). Следовательно, узлы 1 и 5 не связываются одним ребром. Находим один из промежуточных узлов. Из данных табл. 14 следует, что второй узел может быть первым промежуточным узлом, так как для этого узла $s_{2,5} = 5$. Таким образом, кратчайший маршрут между узлами 1 и 5 можно представить последовательностью

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 5.$$

Проверим, будет ли этот маршрут окончательным. Узлы 1 и 2 не связаны одним ребром, так как $s_{1,2} \neq 2$. Следовательно, маршрут $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ не будет окончательным. Далее находим второй

из промежуточных узлов. Как видно из табл. 14, вторым промежуточным узлом может служить четвертый узел, так как для него $s_{42} = 2$. Таким образом, следующий кратчайший маршрут между узлами 1 и 5 будет иметь вид

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5.$$

Проверим, будет ли и этот маршрут окончательным. Узлы 1 и 4 также не связаны одним ребром, так как $s_{14} \neq 4$. Следовательно, маршрут $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ не будет окончательным. Далее находим третий промежуточный узел. Как видно из табл. 14, третьим промежуточным узлом может оказаться третий узел, так как для него $s_{34} = 4$. Таким образом, последующий кратчайший маршрут между узлами 1 и 5 будет иметь вид

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5.$$

Выполним проверку. Узлы 1 и 3 связаны одним ребром, так как $s_{13} = 3$. Следовательно, кратчайший путь с длиной $d_{15} = -2$, соответствующий маршруту

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5,$$

будет единственным и окончательным (рис. 3).

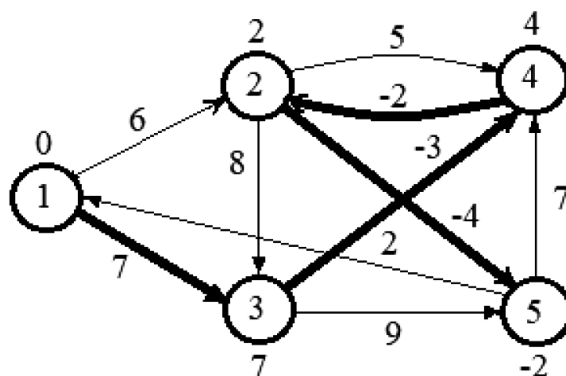


Рис. 3. Реконструированный кратчайший маршрут между узлами 1 и 5

Обсуждение (Discussion)

Из пошагового выполнения вычислений по представленному алгоритму следует, что для корректной оценки расстояний кратчайших путей в графе с отрицательными весами ребер требуется всего n итераций. При наличии в графе циклов с отрицательным весом алгоритм Флойда – Уоршелла применять некорректно. В этом случае безошибочно сработает предложенный алгоритм, поскольку после обработки графа в диагонали матрицы кратчайших путей возникнут отрицательные числа. Появление отрицательных чисел свидетельствует о том, что кратчайшее расстояние от вершины в данном цикле до нее самой меньше нуля. Это означает, что было совершено прохождение по отрицательному циклу.

Выводы (Summary)

1. Полученные результаты оптимальной маршрутизации по алгоритму на рассмотренном примере сетевого графа (см. рис. 3) полностью совпадают с результатами поиска кратчайшего маршрута, полученными в [3] на том же примере с использованием модифицированного алгоритма Беллмана – Форда.

2. На основе алгоритма Флойда – Уоршелла создана универсальная компьютерная модель, предназначенная для оценки и формирования кратчайших маршрутов между выбранной парой транзитных узлов в транспортных и телекоммуникационных сетях и, тем самым, способная обеспечить такой выбор маршрутов движения судов, наземного и воздушного транспорта, а также любых других подвижных объектов, отличающихся эффективностью и экономичностью.

3. Предложена рекурсивная процедура для выбора последовательности ребер, служащих для формирования кратчайшего пути. Вычисления выполнены с использованием инструментов OptimizationToolbox компьютерной среды MATLAB.

4. Корректность работы модели и предложенного алгоритма подтверждена на конкретном примере автоматизации расчета кратчайших расстояний между любыми парами вершин на графе транспортной сети со сложной конфигурацией.

5. Достоинства предложенных решений состоят в простоте и устойчивости вычислительного процесса при программной реализации алгоритмов средствами вычислительной среды MATLAB.

6. Областью применения алгоритма является оптимизация транспортных, телекоммуникационных и сетей, базирующихся на механизмах цифровой экономики в статических и динамических режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dijkstra E.W.* A note on two problems in connexion with graphs / E.W. Dijkstra // *Numerische mathematik*. — 1959. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.

2. *Bellman R.* On a Routing Problem / R. Bellman // *Quarterly of Applied Mathematics*. — 1958. — Vol. 16. — № 1. — С. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.

3. *Чертков А. А.* Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

4. *Warshall S.* A theorem on Boolean matrices / S. Warshall // *Journal of the ACM*. — 1962. — No 1. — Pp. 11–12.

5. *Floyd R.W.* Algorithm 97: Shortest Path / R.W. Floyd // *Communications of the ACM*. — 1962. — Vol. 5. — Is. 6. — Pp. 345. DOI: 10.1145/367766.368168.

6. *Abraham I.* Hub-Based Labeling Algorithm for Shortest Paths on Road Networks / I. Abraham, D. Delling, A.V. Goldberg, R.F. Werneck // *International Symposium on Experimental Algorithms*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — Pp. 230–241. DOI: 10.1007/978-3-642-20662-7_20.

7. *Kröger M.* Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two-and three-dimensional polymeric systems // *Computer physics communications*. — 2005. — Vol. 168. — Is. 3. — Pp. 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.

8. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.

9. *Fonseca C. M.* Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization / C.M. Fonseca, P.J. Fleming // *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference* (S. Forrest, ed.). — San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993. — Pp. 416–423.

10. *Castillo O.* Multiple Objective Genetic Algorithms for Path-planning Optimization in Autonomous Mobile Robots / O. Castillo, L. Trujillo, P. Melin // *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. — 2007. — Vol. 11. — Is. 3. — Pp. 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.

11. *Чертков А. А.* Итерационный алгоритм выбора оптимальной стратегии группового взаимодействия подвижных объектов / А. А. Чертков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 4 (32). — С. 207–215.

12. *Сахаров В. В.* Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Д. С. Тормашев // *Морской Вестник*. — 2014. — № 4. — С. 119–122.

13. *Dedkov V. A.* The problem of control for multirobot systems / V. A. Dedkov, M. N. Kirsanov // *Инновационные информационные технологии*. — 2013. — Т. 2. — № 2. — С. 206–213.

14. *Kirsanov A.* Path planning for the autonomous underwater vehicle / A. Kirsanov, S. Anavatti, T. Ray // *International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. — Springer, Cham, 2013. — Pp. 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.

REFERENCES

1. Dijkstra, Edsger W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische mathematik* 1.1 (1959): 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
2. Bellman, Richard. "On a Routing Problem." *Quarterly of Applied Mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
3. Chertkov, Alexander A. "Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified Bellman-Ford Algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
4. Warshall, Stephen. "A theorem on Boolean matrices." *Journal of the ACM* 1 (1962): 11–12.
5. Floyd, Robert W. "Algorithm 97: shortest path." *Communications of the ACM* 5.6 (1962): 345. DOI: 10.1145/367766.368168.
6. Abraham, Ittai, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. "A Hub-Based Labeling Algorithm for Shortest Paths on Road Networks." *International Symposium on Experimental Algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 230–241. DOI: 10.1007/978-3-642-20662-7_20.
7. Kröger, Martin. "Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two-and three-dimensional polymeric systems." *Computer physics communications* 168.3 (2005): 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.
8. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
9. Fonseca, Carlos M., and Peter J. Fleming. "Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization." *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference (S. Forrest, ed.)*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993. 416–423.
10. Castillo, Oscar, Leonardo Trujillo, and Patricia Melin. "Multiple objective genetic algorithms for path-planning optimization in autonomous mobile robots." *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications* 11.3 (2007): 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.
11. Chertkov, A. A. "An iterative algorithm for choosing the optimal strategy of group interaction for moving objects." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 207–215.
12. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, and D. S. Tormašev. "Optimal planning group communication Algorithm of robots." *Morskoj Vestnik* 4 (2014): 119–122.
13. Dedkov, V. A., and M. N. Kirsanov. "The problem of control for multirobot systems." *Innovative information technology* 2.2 (2013): 206–213.
14. Kirsanov, Andrey, Sreenatha G. Anavatti, and Tapabrata Ray. "Path planning for the autonomous underwater vehicle." *International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. Springer, Cham, 2013: 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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, associate 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_electricautomatic@gumrf.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 3 февраля 2019 г.
Received: February 3, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253

APPLICATION THE SIMULATION MODELING METHODS FOR PLANNING A CONTAINER TERMINAL INTERNAL OPERATIONS

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Kirichenko¹, A. D. Semenov²

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

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

Today the computer simulation becomes an object of many academic studies focused on the transport problems. In particular, the simulation models intensively expand the toolkit of the technological design of sea ports and cargo terminals. These models become more and more complicated and advanced, reflecting more and more adequately technical, economical and operational features of the relevant objects. At the same time, the resulting complexity of the models makes it uneasy to implement them in practice, since the port specialists fail to see the practical efficiency behind the complicated software façade. The difficulty of learning how to use new models makes the advantage of their utilization doubtful. However, the main advantage of the simulation is the possibility to study many different variants. It is not possible to conduct the experiment of this kind for the real operating terminal, since it will cause the losses connected to the reorganization of operations, delays, queues, idletimes. An illustrative example of using an imitation model for the analysis of operations at the container terminal is offered in the paper. One of the most resource-consuming operations of the land container terminal is the rail train handling. The criterion for the selection of a handling operation variant is the minimization of cargo handling equipment costs ensuring the train handling within a given time interval. The simulation results are the probability distributions of the stochastic values – demands for the cargo handling equipment at the different cargo-handling systems, enabling to make a choice for the optimal train handling procedure.

Keywords: container terminal, rear cargo front, train handling, simulation, operation analysis, pre-stacking, dry port, handling equipment, cargo handling capacity.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Application the simulation modeling methods for planning a container terminal internal operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

УДК 656.615

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЫЛОВЫХ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Кузнецов¹, А. В. Кириченко¹, А. Д. Семенов²

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

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

Рассмотрено решение транспортных задач, реализуемых с помощью использования методов имитационного моделирования, в частности инструментария технологического проектирования морских портов и терминалов. Проанализированы наиболее сложные модели, которые с максимальной точностью отражают технические, экономические и операционные свойства избранных объектов. Отмечается, что сложность моделей мешает их внедрению в практику, поскольку специалисты перестают видеть практическую эффективность от применения таких сложных инструментов, а трудоемкость в обучении работе с новыми моделями выгоду от их использования делают неочевидной. Подчеркивается, что основным преимуществом моделирования, в том числе имитационного, является возможность анали-

за различных вариантов, а также, что проведение подобных экспериментов невозможно на действующем терминале, поскольку это потребует высоких затрат, связанных с реорганизацией работ и возможным образованием очередей. В статье предлагается наглядный пример использования имитационной модели для анализа операций на контейнерном терминале. Одной из наиболее трудоемких операций для наземного контейнерного терминала является обработка железнодорожного подвижного состава. В работе с помощью специализированной имитационной модели анализируются возможные варианты обработки поезда. Критерием выбора одного из вариантов является обеспечение наименьших затрат перегрузочного оборудования, гарантирующих обработку поезда за заданный промежуток времени без влияния на остальные операции. Результатами моделирования являются вероятностные распределения потребности в подъемно-транспортном оборудовании при различных схемах организации работ, на основании которых может быть выбрана оптимальная схема обработки поезда.

Ключевые слова: контейнерный терминал, тыловой грузовой фронт, обработка поезда, имитационное моделирование, анализ операций, престакинг, сухой порт, перегрузочное оборудование, пропускная способность.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

Введение (Introduction)

Морские порты и грузовые терминалы являются по-своему уникальными инфраструктурными объектами, решающими задачу организации взаимодействия магистральных видов транспорта — морского и наземных. Таким образом, проблемным вопросом было и остается определение научно обоснованных методов планирования работы взаимодействующих грузовых фронтов — морского и тыловых (автомобильного, железнодорожного). Особую актуальность вопрос приобрел с развитием еще более сложных инфраструктурных систем — «сухих портов», когда к уже традиционной схеме взаимодействия добавилось дополнительное наземное транспортное звено, привнесшее в морской порт (в большей степени это касается контейнерных терминалов) дополнительные грузовые фронты. В связи с этим необходимо отметить, что какая-либо оптимизация работы морского порта в целом невозможна без оптимизации технологических процессов его тыловых грузовых фронтов, относящихся к наземным видам транспорта.

Важнейшей характеристикой контейнерного терминала является его пропускная способность, которая может измеряться различными способами: количеством контейнеров, которые терминал может перегрузить в год; количеством железнодорожных составов или автомобильных транспортных средств, которые терминал может обработать за сутки и т. д. [1]–[3]. Пропускная способность во многом определяется составом подъемно-транспортного оборудования, используемого на терминале. Чаще всего на современных контейнерных терминалах в качестве основного складировующего оборудования используют ричтакеры (RS), автоконтейнеровозы (SC), складские перегружатели на пневмоколесном (RTG) или рельсовом (RMG) ходу.

Каждый вид и тип оборудования имеет свои технические и экономические характеристики, обуславливающие выбор того или иного оборудования конкретным проектировщиком или оператором терминала, однако единой методики для обоснования этого выбора не существует. Во многом он носит субъективный характер [4]–[6]. Добавляет сложности и то обстоятельство, что значительное влияние на производительность и экономические характеристики транспортной схемы терминала оказывают выбранная технология работы и управленческие решения, такие как структура организации штабеля и всей контейнерной площадки, идеология планирования оперативной деятельности, а также организация процесса обработки различных грузопотоков. Традиционные расчетно-аналитические методики, в течение многих десятилетий использовавшиеся для решения задач проектирования, планирования и управления операциями контейнерных терминалов, не учитывают указанные факторы [7]–[9]. В то же время рост объемов складирования приводит к известному феномену «комбинаторного взрыва» при попытках решения задач планирования

традиционными математическими методами: часть задач не поддается строгой формализации, необходимой для алгоритмизации и последующего создания компьютерных средств решения; практически все они носят многокритериальный характер, исключающий известные методы оптимизации.

Анализ оперативных решений и выбор наилучших из них является, пожалуй, наиболее сложной частной задачей подобного рода, поскольку использование традиционных расчетно-аналитических методов зачастую не позволяет оценить, какое влияние на производительность и экономические характеристики транспортной схемы терминала окажет тот или иной вариант организации работ. Натурные эксперименты, связанные с практической реализацией различных вариантов, сопряжены с затратами и потерями, неприемлемыми на действующем терминале [10].

Вместе с тем современные методы имитационного моделирования во многих случаях позволяют провести необходимые эксперименты на достаточно адекватной компьютерной модели или «цифровом двойнике» терминала. Преимуществом имитационного моделирования является возможность достаточно эффективного сравнительного анализа большого числа вариантов и параметров с целью выбора оптимального. При этом технологии и стратегии управления терминалом органично включаются в имитационные модели [11]–[13], однако сложность создания моделей и порог освоения программного продукта, построенного на этой основе, все больше увеличивают разрыв между академическими исследованиями и инструментами практической деятельности. Очевидной становится необходимость формирования нового, промежуточного, уровня представлений: наука должна «спуститься с небес» и немного упростить способ и технологию исследований, а практика — сделать шаг навстречу для понимания новых концепций и связанных с ними возможностей. Создание все более сложных инновационных моделей является важной научной задачей. Вместе с тем не менее важная задача состоит в том, чтобы убедить проектировщиков и операторов терминала пользоваться ими.

В данной статье не описывается структура, архитектура и интерфейс средств имитационного моделирования. В ней на примере конкретной и актуальной для многих терминалов задачи — совершенствования процедуры обработки контейнерных поездов на тыловом грузовом фронте морского порта (контейнерного терминала) — описывается процедура решения, основанная на применении компьютерного инструмента: *имитационного моделирования*.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Проанализируем наиболее приоритетную операцию — обработку железнодорожного подвижного состава на тыловом грузовом фронте. Данная операция требует высокой производительности, что вызвано жесткими условиями соглашения с железнодорожной станцией. В свою очередь, с операционной точки зрения обработка поезда является наиболее трудоемкой технологической операцией, что связано с выборкой из штабеля контейнеров, составляющих вывозимую через тыловой грузовой фронт железнодорожную партию.

При обработке поезда немаловажную роль играет устройство штабеля. На рис. 1 показан общий вид контейнерного склада при моделировании его произвольного заполнения, не достигающего максимально допустимого объема складирования.

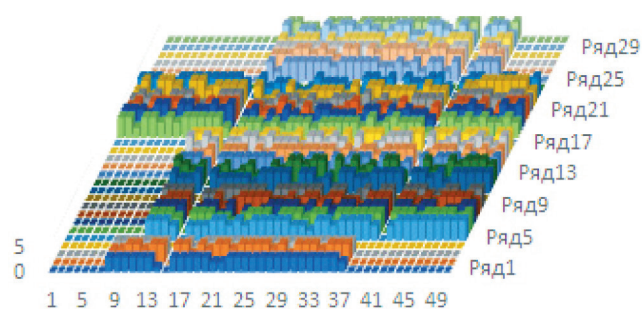


Рис. 1. Общий вид контейнерного склада

Во время обработки железнодорожного подвижного состава доминирующим процессом на терминале служит выборка из штабелей контейнерного склада заданного количества контейнеров, составляющих грузовую партию для погрузки контейнерного поезда. В общем виде процедура выборки и погрузки контейнеров на поезд показана на рис. 2, где дугами показаны перемещения между начальным положением контейнера в штабеле и конечным положением на железнодорожной платформе («производительные движения»). Выборка из штабеля в общем случае требует дополнительных перемещений контейнеров, блокирующих доступ к целевому контейнеру («непроизводительные движения»), которые на рис. 2 не показаны.

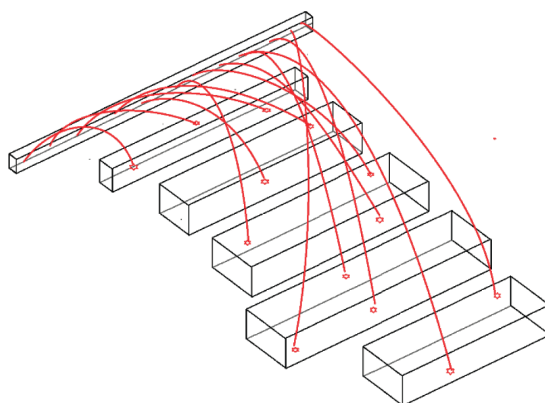


Рис. 2. Обобщенная процедура погрузки контейнерного поезда

Отношение числа производительных движений к общему их числу, т. е. сумме производительных и непроизводительных движений, называется *селективностью контейнеров*. Селективность, равная единице, характеризует прямой доступ к каждому контейнеру, а стремление селективности к нулю характеризует повышение трудоемкости выборки за счет «рытья» штабеля. Очевидно, что низкая селективность связана со снижением эффективной производительности, определяемой количеством производительных движений в час. При этом время погрузки железнодорожного состава определяется именно эффективной производительностью технологического оборудования. Чем короче допустимый интервал обработки железнодорожного подвижного состава, тем выше должна быть интенсивность погрузочных операций, которая в простейшем случае может быть обеспечена за счет использования большого количества технологического оборудования.

Другим вариантом постановки задачи является оценка минимальной длительности интервала обработки состава при фиксированной численности технологического оборудования. Предполагается, что общая производительность терминала и его пропускная способность могут быть значительно повышены за счет административных, организационных и технологических мероприятий.

Сугубо *административной мерой*, способной сократить интервал обработки железнодорожного подвижного состава на тыловом грузовом фронте, является прекращение всех иных операций, не связанных с этой обработкой и использующих то же технологическое оборудование. Задачей в этом случае является необходимость оценить, насколько при этом сократится интервал обработки за счет высвободившегося ресурса и какое влияние на другие операции окажет отвлечение технологического оборудования на приоритетные операции в течение этого интервала.

Административно-организационной мерой является «престакинг», т. е. формирование в свободный промежуток между обработкой на тыловом грузовом фронте железнодорожных подач предварительного штабеля контейнеров, составляющих вывозимую железнодорожную партию (рис. 3). Престакинг может выполняться на терминале наряду с иными технологическими операциями или даже иметь по сравнению с ними более низкий приоритет и осуществляться в свободное (например, ночное) время.

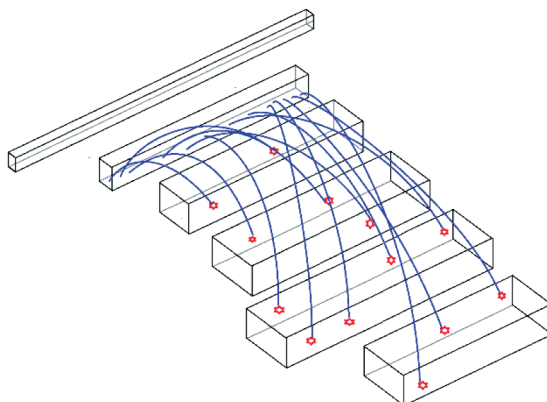


Рис. 3. Формирование предварительного штабеля

По прибытии подвижного состава на терминал сформированный штабель грузится на железнодорожные платформы (рис. 4).

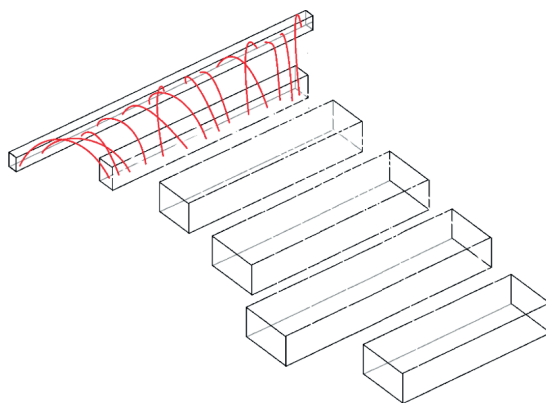


Рис. 4. Погрузка состава из предварительно сформированного штабеля

Очевидно, что в такой двухфазной процедуре общее количество движений увеличивается, поскольку формирование предварительного штабеля требует такого же количества движений, что и прямая погрузка, но во втором случае дополнительно возникает необходимость перегрузки сформированного штабеля на железнодорожные платформы (рис. 5).

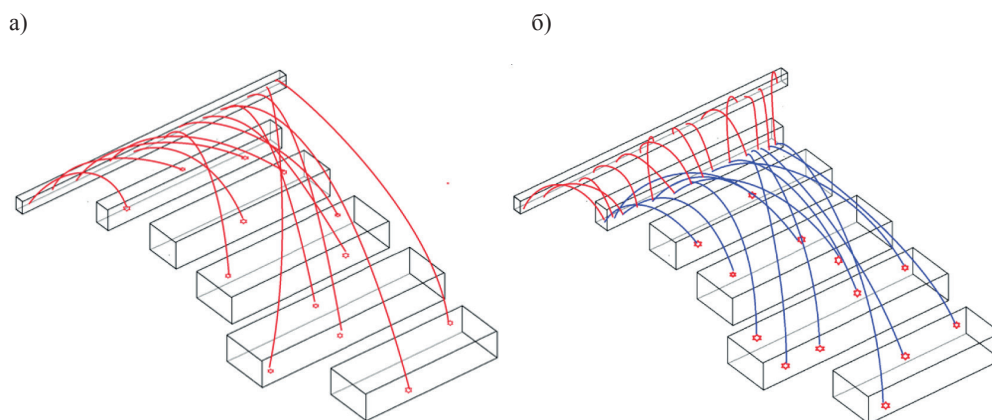


Рис. 5. Сравнение однофазной (а) и двухфазной (б) погрузки

С другой стороны, выполняемые во время погрузки состава движения являются короткими по расстоянию и не требуют перемещения блокирующих доступ контейнеров («рытья»),

что обеспечивает более высокую эффективную производительность. Увеличение количества операций в основном оказывает влияние на операции ричстакеров, которые участвуют как в формировании предварительного штабеля, так и в последующей погрузке железнодорожного подвижного состава. Все остальное оборудование, наоборот, получает более равномерную загрузку на протяжении суток за счет устранения жесткого интервала обработки железнодорожных подач. Задачей в рассматриваемом случае является количественная оценка новых требований и возможностей.

Наконец, возможной *организационно-технологической мерой* является вариант престакинга за счет выделения для предварительного штабеля нескольких секций склада, формируемых складировочной машиной с высокой ярусностью штабелирования. В этом случае отпадает необходимость формирования какого-либо предварительного штабеля в непосредственной близости от тылового грузового фронта. Ричстакеры в этом случае могут обслуживать исключительно операции погрузки контейнеров на железнодорожные платформы, которые будут подаваться в рабочую зону терминальными тягачами (рис. 6).

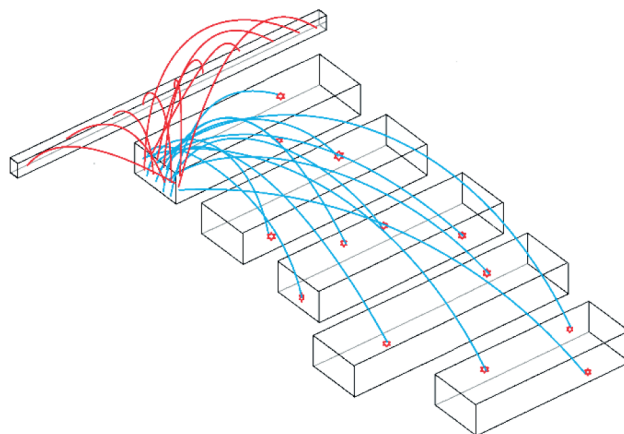


Рис. 6. Формирование предварительного штабеля как секции основных линий

Такое решение позволяет увеличить общую площадь основания штабелей в наземных слотах, использовать для работы во всех линиях исключительно высокопроизводительные складские перегружатели, освободить ричстакеры для обработки железнодорожных составов и выполнения вспомогательных операций. Задачей в данном случае является оценка количественно получаемых в результате перехода на такую схему преимуществ.

Очевидно, что оптимальный вариант из предлагаемых решений должен быть выбран на основе рационального сравнения, которое предполагает выполнение на первом этапе аналитических расчетов. На втором этапе аналитические расчеты должны быть подтверждены имитационным моделированием предлагаемых вариантов. При этом последние служат способом подтверждения адекватности полученных имитационных моделей, что позволяет использовать их в процессе дальнейших операционных исследований.

Результаты (Results)

Критерием оценки качества различных проектных решений служит требуемое количество оборудования, которое оценивается с помощью имитационной модели. В соответствии с ранее изложенным, к сравниваемым технологическим схемам организации процесса обработки относятся следующие:

— *традиционная схема* — погрузка железнодорожной подачи — осуществляется одновременно с другими операциями. При этом предполагается, что обработка железнодорожного подвижного состава выполняется в течение интервала, равного восьми часам;

— *схема с абсолютным приоритетом операции* — используется для обработки железнодорожной подачи за четыре часа. При этом предлагается приостановить все операции, кроме погрузки и выгрузки контейнерных платформ;

— *схема с престакингом* — в этом случае в промежуток между прибытием железнодорожных подач на паритетных условиях выполняется подготовка штабеля престакинга для погрузки железнодорожного подвижного состава и по его прибытию производится выгрузка / погрузка контейнеров в линию, расположенную вблизи железнодорожно-грузового фронта;

— *схема с престакингом и использованием RTG в качестве основной складировочной машины* (еще один вариант оптимизации времени обработки железнодорожных подач) — требует реорганизации всей транспортно-технологической схемы терминала. В качестве основной машины предлагается использовать RTG, а на вспомогательных операциях — RS вне контейнерной площадки: обработка подвижного состава, подача / уборка контейнеров со склада комплектации, взвешивание контейнеров и т. д.

На рис. 7 показаны графики распределения различного оборудования по часам суток согласно описанным вариантам организации работ. Каждая линия графика представляет собой один эксперимент. Широкой красной линией обозначена средняя потребность в оборудовании на каждый час.

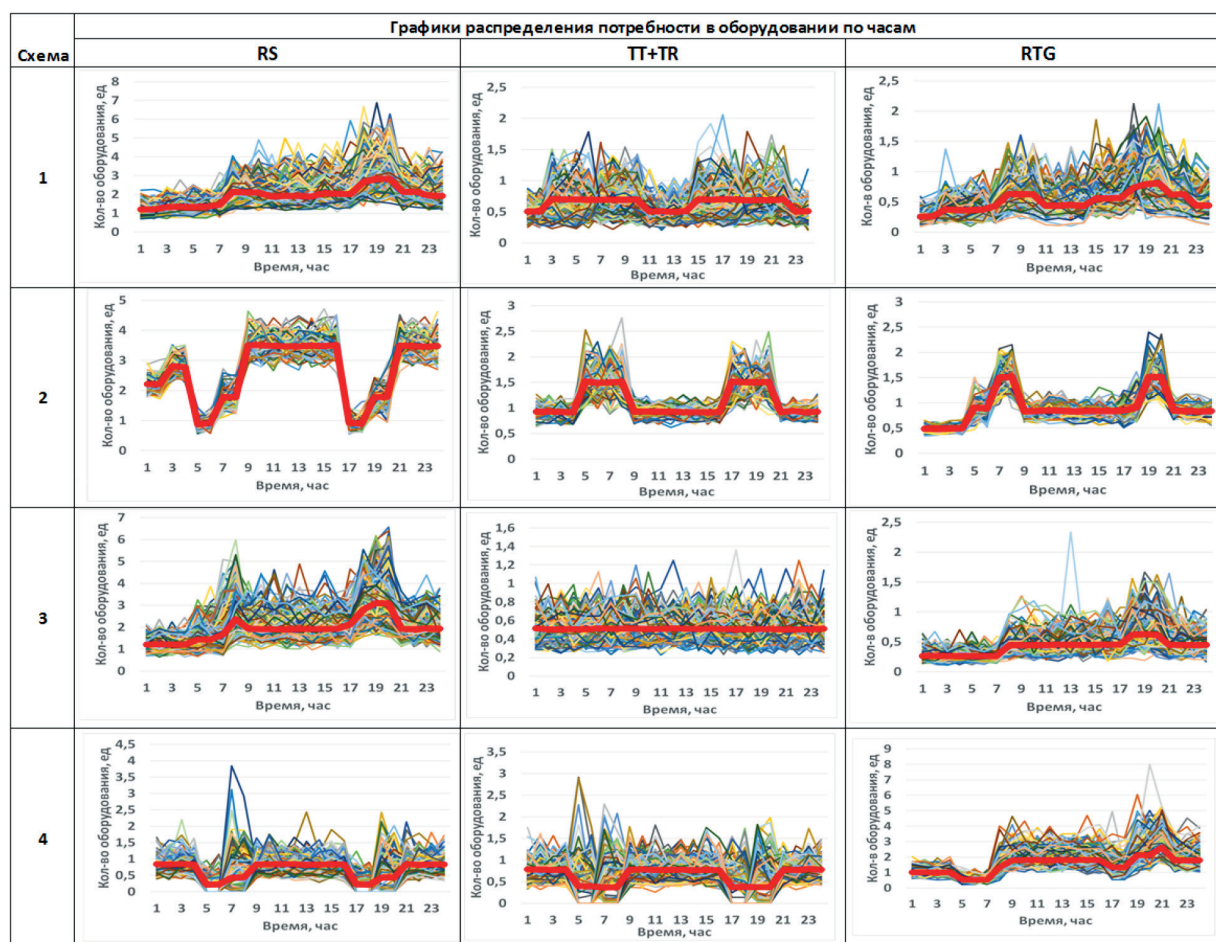


Рис. 7. Формирование предварительного штабеля как секции основных линий

На основании приведенных данных строятся вероятностные распределения потребности в оборудовании. На рис. 8 показаны графики функций плотности распределения случайной величины — потребности в каждом типе оборудования для различных схем организации работы терминала, а на рис. 9 — графики соответствующих интегральных функций распределения потребности в оборудовании.

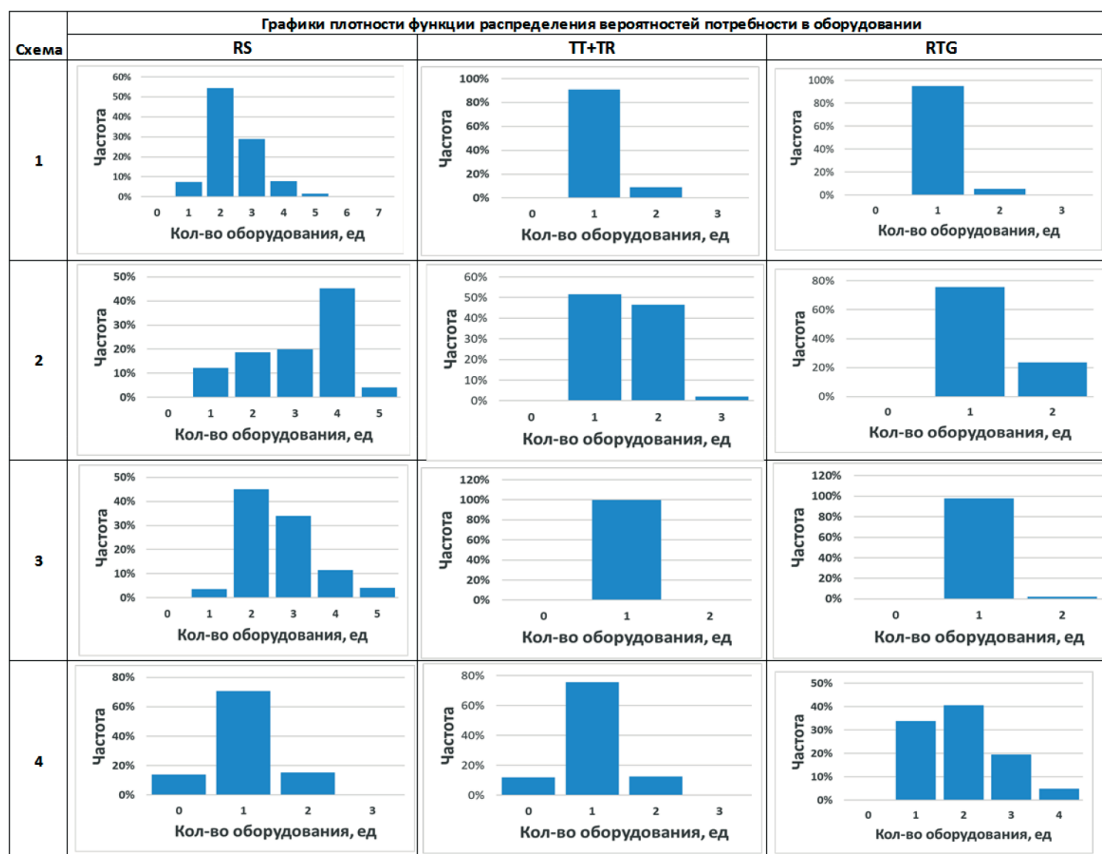


Рис. 8. Графики функций плотности распределения потребности в оборудовании

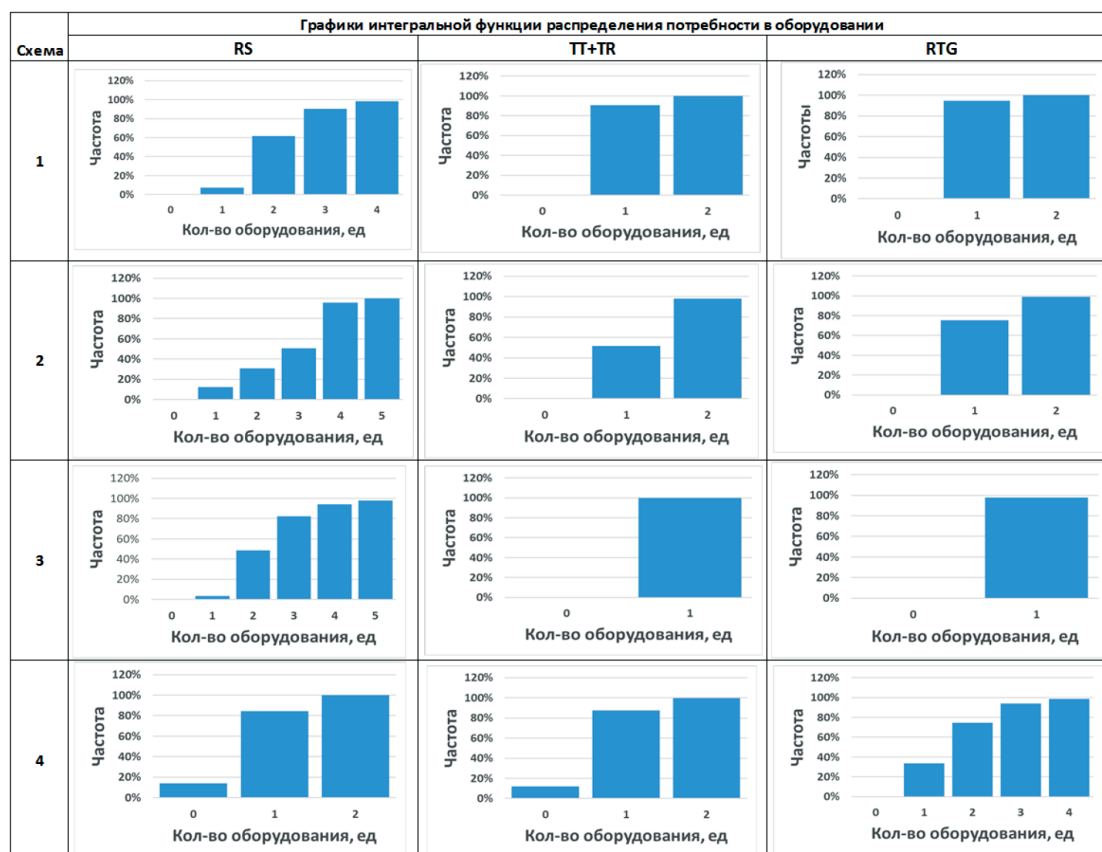


Рис. 9. Графики интегральных функций распределения потребности в оборудовании

Обсуждение (Discussion)

Представленные результаты моделирования позволяют проектировщикам или руководству компании принять решение о необходимом количестве оборудования. Данный выбор основан на стратегии компании и опыте лица, принимающего решение. В случае, если на терминале стремятся к экономии на издержках и считают приемлемым наличие постоянных очередей, то будет выбрана одна схема, если руководство компании хочет, чтобы любое транспортное средство обрабатывалось за минимальный период времени — другая. Такая вариативность, или возможность анализа различных вариантов, делает компьютерное моделирование важнейшим инструментом в принятии управленческих решений. Однако, как отмечалось ранее, внедрение имитационных моделей в оперативную работу компании связано с рядом трудностей, главными из которых являются сложность моделей и отсутствие понимания выгоды от их использования. Первая проблема связана с трудоемкостью обучения персонала, вторая — с отсутствием понимания возможностей и назначения предлагаемых имитационных моделей. Для преодоления этих трудностей необходимо постоянное взаимодействие компаний с академической наукой. Только в этом случае создаваемые имитационные модели будут отвечать требованиям практики, а принимаемые решения обоснованы с помощью современных методов. Внедрение создаваемых моделей в процесс обучения специалистов повысит практический интерес к развитию данных моделей, поскольку новые кадры будут способствовать внедрению имитационного моделирования в оперативную работу компании.

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В исследовании была рассмотрена проблема внедрения имитационного моделирования в оперативную работу компаний.
2. Основной трудностью при внедрении создаваемых моделей признается отсутствие понимания возможной выгоды от их применения.
3. Для того чтобы наглядно показать возможный эффект от применения имитационного моделирования в работе было предложено проанализировать различные варианты организации процедуры обработки железнодорожного подвижного состава на тыловом грузовом фронте морского контейнерного терминала с помощью специализированной имитационной модели.
4. Результаты моделирования позволяют принять решение о необходимом количестве оборудования.
5. Доказано, что для внедрения моделирования в оперативную работу компании необходимо тесное взаимодействие организации с академической наукой и внедрение создаваемых моделей в процесс обучения специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jacobsson S.* Differentiation of access management services at seaport terminals: Facilitating potential improvements for road hauliers / S. Jacobsson, P.O. Arnäs, G. Stefánsson // *Journal of Transport Geography*. — 2018. — Vol. 70. — Pp. 256–264. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.06.009.
2. *Taner M. E.* Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals / M. E. Taner, O. Kulak, M. U. Koyuncuoğlu // *Computers & Industrial Engineering*. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.
3. *Xie Y.* Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty / Y. Xie, D.P. Song // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2018. — Vol. 119. — Pp. 88–109. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.008.
4. *Upadhyay A.* Optimal loading of double-stack container trains / A. Upadhyay, W. Gu, N. Bolia // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2017. — Vol. 107. — Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2017.08.010.

5. 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.
6. Rouky N. Optimization of Containers Transfer in Le Havre Port: a New Algorithm for the Railway Transportation System / N. Rouky, P. Couzon, J. Boukachour, D. Boudebous, A.E.H. Alaoui // *IFAC-PapersOnLine*. — 2018. — Vol. 51. — Is. 11. — Pp. 1676–1681. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.215.
7. Chen H. Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network / H. Chen, K. Cullinane, N. Liu // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2017. — Vol. 97. — Pp. 282–301. DOI: 10.1016/j.tre.2016.10.008.
8. Chen H. Strategic investment in enhancing port-hinterland container transportation network resilience: A network game theory approach / H. Chen, J. S. L. Lam, N. Liu // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2018. — Vol. 111. — Pp. 83–112. DOI: 10.1016/j.trb.2018.03.004.
9. Davydov B. Prediction of the train traffic in a transport corridor / B. Davydov, K. Kablukova, A. Godyaev // *Procedia engineering*. — 2016. — Vol. 165. — Pp. 1430–1436. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.875.
10. Rashidi H. Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals / H. Rashidi, E. P. K. Tsang // *Applied Mathematical Modelling*. — 2013. — Vol. 37. — Is. 6. — Pp. 3601–3634. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.042.
11. Carteni A. Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach / A. Carteni, S. De Luca // *Simulation Modelling Practice and Theory*. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
12. Kuznetsov A.L. Simulation Model of Container Land Terminals / A.L. Kuznetsov, A.V. Kirichenko, J. J. Eglit // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
13. Kuznetsov A.L. Methodological Problems of Modern Transportation Logistics / A.L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2018. — Vol. 12. — No. 3. — Pp. 611–616. DOI: 10.12716/1001.12.03.21.

REFERENCES

1. Jacobsson, Stefan, Per Olof Arnäs, and Gunnar Stefansson. “Differentiation of access management services at seaport terminals: Facilitating potential improvements for road hauliers.” *Journal of Transport Geography* 70 (2018): 256–264. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.06.009.
2. Taner, Mustafa Egemen, Osman Kulak, and Mehmet Ulaş Koyuncuoğlu. “Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals.” *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014): 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.
3. Xie, Ying, and Dong-Ping Song. “Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 119 (2018): 88–109. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.008.
4. Upadhyay, Amit, Weihua Gu, and Nimesh Bolia. “Optimal loading of double-stack container trains.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 107 (2017): 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2017.08.010.
5. 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.
6. Rouky, Naoufal, Paulin Couzon, Jaouad Boukachour, Dalila Boudebous, and Ahmed El Hilali Alaoui. “Optimization of Containers Transfer in Le Havre Port: a New Algorithm for the Railway Transportation System.” *IFAC-PapersOnLine* 51.11 (2018): 1676–1681. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.215.
7. Chen, Hong, Kevin Cullinane, and Nan Liu. “Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 97 (2017): 282–301. DOI: 10.1016/j.tre.2016.10.008.
8. Chen, Hong, Jasmine Siu Lee Lam, and Nan Liu. “Strategic investment in enhancing port-hinterland container transportation network resilience: A network game theory approach.” *Transportation Research Part B: Methodological* 111 (2018): 83–112. DOI: 10.1016/j.trb.2018.03.004.
9. Davydov, Boris, Ksenia Kablukova, and Alexander Godyaev. “Prediction of the train traffic in a transport corridor.” *Procedia engineering* 165 (2016): 1430–1436. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.875.

10. Rashidi, Hassan, and Edward PK Tsang. "Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals." *Applied Mathematical Modelling* 37.6 (2013): 3601–3634. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.042.
11. Carteni, Armando, and Stefano De Luca. "Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach." *Simulation Modelling Practice and Theory* 21.1 (2012): 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
12. Kuznetsov, A.L., A.V. Kirichenko, and J.J. Eglit. "Simulation Model of Container Land Terminals." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
13. Kuznetsov, A.L., and A.V. Kirichenko. "Methodological Problems of Modern Transportation Logistics." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.3 (2018): 611–616. DOI: 10.12716/1001.12.03.21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —

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

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

Семенов Антон Денисович — диспетчер

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —

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

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

Semenov, Anton D. — Dispatcher

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

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.

Received: March 14, 2019.

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DAMAGE TO THE ELEMENTS OF THE CENTER PROP OF THE REVOLVING GEAR OF THE KRASNOYARSK SHIP'S ELEVATOR

M. L. Kuzmitskiy¹, N. M. Ksenofontov¹, I. N. Bazavluk²

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

² — The Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin»,
St. Petersburg, Russian Federation

Krasnoyarsk ship's elevator of the inclined type, inverted-V with a pivot bridge is designed to move ships through the dam crest of the Krasnoyarsk hydroelectric station. According to the regulatory documents, the revolving gear of ship's elevator is classified as a draw bridge of a two-arm revolute system.

The center prop of the revolving gear transmits the vertical forces from the weight of the ship's camera and the revolving gear itself and the horizontal loads on the base of the ship's elevator during maneuvering the ship's camera on the revolving gear, as well as during rotation of the system (ship's camera + revolving gear). The total weight of the system with a filled reception basin exceeds 10,000 tons of which a ship's camera is 8100 tons, a revolving gear is 2100 tons. This load is perceived by the center prop and the peripheral balance trucks. The given value of the vertical load is 1–2 orders of magnitude greater than this indicator for the considered analogues of the pivot bridges.

The design of the center prop should ensure immobility of the axis of rotation of the revolving gear, as well as possibility of its rotation in the horizontal plane. The central prop failure will lead to a prolonged cessation of navigation.

The aim of the paper is to ensure reliability and safe operation of the Krasnoyarsk ship's elevator by developing the scientifically based measures to optimize the working conditions and timely identify unacceptable defects in the circular revolving gear central prop elements.

To achieve this goal, the following tasks are required: determining the composition of the responsible elements of the central prop, the failures of which can lead to the failure of the central prop; the selection of critical destructive processes, the uncontrolled development of which can lead to unacceptable deviations of the responsible elements from the design state, taking into account the external and internal influence on them; the establishment of the maximum permissible deviations of the responsible elements from the design state taking into account the requirements of the regulatory documents for the similar elements in the various industries; developing the methods for checking the critical elements of the central prop in order to identify unacceptable deviations from the design state at the stages of their development ensuring their reliable and safe operation of the central prop during the established service life.

The central prop is considered as a non-mass mechanical system of long-term use, the elements of which change their design state under the influence of a set of objectively destructive aging processes. To clarify their development speeds and identify the critical ones that could lead to the elements failure, the analysis of the acceptance, design and operational documentation, including the results of planned observations and studies, is carried out, as well as an estimated calculation of the stress-strain state of the tapered rollers and the elements based on it.

The following results of the research are demonstrated: for the sectors of the pass of the central prop, the critical destructive aging process is the formation and development of fatigue cracks, initiated by a high level of stresses from applied loads and the development of technological defects; the values of the calculated stresses in fillet transitions of the tapered roller props predetermine a high probability of the development of fatigue cracks in these areas; the calculated level of the elastic deformations value of the power elements of the circular shoulder strap of the central prop indicates the possibility of losing the immobility of numerous bolted joints, which makes it possible to change the mutual position of the main elements and, as a result, the impact of additional loads in its critical elements.

Keywords: Krasnoyarsk ship's elevator, revolving gear, center prop, service life, aging treatment, roller pass, taper roller, technological defect, fatigue damage, engineering status.

For citation:

Kuzmitskiy, Mikhail L., Nikolai M. Ksenofontov, and Igor N. Bazavluk. "Analysis of the causes of damage to the elements of the center prop of the revolving gear of the Krasnoyarsk ship's elevator." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 254–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-254-265.

УДК 626.52/.54; 656.627.4

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОПОРЫ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА
КРАСНОЯРСКОГО СУДОПОДЪЕМНИКА**

М. А. Кузьмицкий¹, Н. М. Ксенофонтов¹, И. Н. Базавлук²

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

² — АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен Красноярский судоподъемник, предназначенный для перемещения судов через гребень плотины Красноярской ГЭС, в котором центральная опора поворотного устройства передает вертикальные усилия от веса судовозной камеры и самого поворотного устройства и горизонтальные нагрузки на основание судоподъемника во время маневрирования судовозной камеры на поворотном устройстве, а также при вращении системы (судовозная камера + поворотное устройство). Показано, что суммарный вес системы превышает при наполненном приемном бассейне 10 000 т. Частично эта нагрузка воспринимается периферийными балансирными тележками. Отмечается, что конструкция центральной опоры должна обеспечивать неподвижность оси вращения поворотного устройства, а также возможность его вращения в горизонтальной плоскости. Центральная опора рассматривается как немассовая механическая система долговременного пользования, элементы которой изменяют свое проектное состояние под воздействием совокупности объективно протекающих деструктивных процессов старения. Для уточнения их скоростей развития и выделения критичных из них проведен анализ сдаточной, проектной и эксплуатационной документации, а также выполнен оценочный расчет напряженно-деформированного состояния погона и конических роликов. Изложены следующие результаты проведенных исследований: для секторов погона центральной опоры критическим деструктивным процессом старения является образование и развитие усталостных трещин, инициируемых высоким уровнем напряжений от прикладываемых нагрузок и развитием технологических дефектов; значения расчетных напряжений в галтельных переходах конических роликовых опор определяют высокую вероятность развития усталостных трещин на этих участках; расчетный уровень величины упругой деформаций силовых элементов центральной опоры свидетельствует о возможности потери неподвижности многочисленных болтовых соединений, что обуславливает возможность изменения взаимного положения основных элементов и, как следствие, воздействия дополнительных нагрузок в ответственных ее элементах.

Ключевые слова: Красноярский судоподъемник, поворотное устройство, центральная опора, срок службы, старение, круговой погон, конический ролик, технологический дефект, усталостное повреждение, техническое состояние.

Для цитирования:

Кузьмицкий М. Л. Анализ причин повреждений элементов центральной опоры поворотного устройства Красноярского судоподъемника / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, И. Н. Базавлук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 254–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-254-265.

Введение (Introduction)

Красноярский судоподъемник принят в постоянную эксплуатацию в 1982 г. За период эксплуатации установлено изменение состояния многих элементов относительно проектного состояния, что обусловлено воздействием совокупности деструктивных процессов [1] – [4]. Поворотное устройство (ПУ) Красноярского судоподъемника предназначено для перевода судовозной камеры

(СК) на соответствующие судовозные пути. Центральная опора (ЦО) ПУ обеспечивает вертикальность оси его вращения и возможность поворота в горизонтальной плоскости [5]. При проведении сдаточных работ и в начальный период эксплуатации было установлено наличие технологических дефектов в секторах кругового погона ЦО [6]. Во время периодических наблюдений отмечено образование эксплуатационных повреждений типа трещин и их последующее развитие. Исходя из основных положений системного анализа [7], ЦО рассматривалась как механическая система, состоящая из совокупности элементов, между которыми существуют конструктивные, функциональные и силовые связи. В качестве воздействий внешней среды для такой системы следует рассматривать нагружение ее суммарной нагрузкой от веса ПУ и СК [8], а также от усилия, необходимого для перемещения СК по ПУ. Внешние воздействия приводят к реализации деструктивных процессов [1], вызывающих изменение начального (проектного) состояния элементов опоры и их связей.

Наличие количественной оценки скорости деструктивных процессов позволяет судить о возможности и сроках дальнейшей безопасной эксплуатации элементов. Недостаток такой информации, в некоторой мере, может быть компенсирован использованием разработанных для различных отраслей нормативных документов, регламентирующих допустимые отклонения подобных элементов. Однако уникальность Красноярского судоподъемника в целом и его центральной опоры в частности ограничивает возможность такого подхода. Нормы предельно-допустимых технологических дефектов для различных марок стали приведены в работе [9]. Однако эта информация не может быть использована для материалов, применяемых для изготовления элементов ЦО. В работе [10] приведены сведения о предельных размерах неразвивающихся трещин в стальных образцах в зависимости от уровня действующих напряжений, однако для материалов, используемых для изготовления элементов ЦО, такой информации нет. В источнике [10] также указывается на наличие зависимости параметров стабилизировавшихся повреждений от вида и режимов финишных операций по обработке поверхностей [11]. Таким образом, для достижения глобальной цели исследования обеспечение надежности и безопасности эксплуатации Красноярского судоподъемника необходимо решение следующих задач:

1. Определение состава ответственных элементов ЦО, потенциальные отказы которых могут привести к отказу ЦО.
2. Определение критических деструктивных процессов, неконтролируемое развитие которых приводит к недопустимым отклонениям ответственных элементов от проектного состояния.
3. Установление предельно-допустимых отклонений ответственных элементов ЦО от проектного состояния.
4. Разработка методики проверки ответственных деталей на предмет выявления недопустимых отклонений от проектного состояния.

В настоящей работе приведены результаты исследований первых трех задач. Разработка методики проверки ответственных элементов ЦО на предмет выявления недопустимых отклонений от проектного состояния может быть выполнена после уточнения уровня напряжений в опасных сечениях элементов, а также их обследования с использованием средств неразрушающего контроля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При анализе конструктивного оформления ЦО (рис. 1) было установлено, что она выполнена по оригинальной схеме, защищенной авторским свидетельством на изобретение [12]. Необходимость такого исполнения вызвана стремлением обеспечить ее высокую грузоподъемность, достаточную для маневрирования СК весом более 8000 т.

Эффективность эксплуатационного контроля технического состояния механической системы определяется показателями контролепригодности и ремонтпригодности. Анализ этих показателей для ЦО показал, что использование некоторых методов и средств контроля, необходимых для объективной оценки состояния элементов ЦО, в данном случае невозможен из-за ограниченной доступности и больших объемов требуемых подготовительных работ. Проведение отдельных

видов работ по осмотру и планово-предупредительному ремонту требует разработки специального плана организации работ.

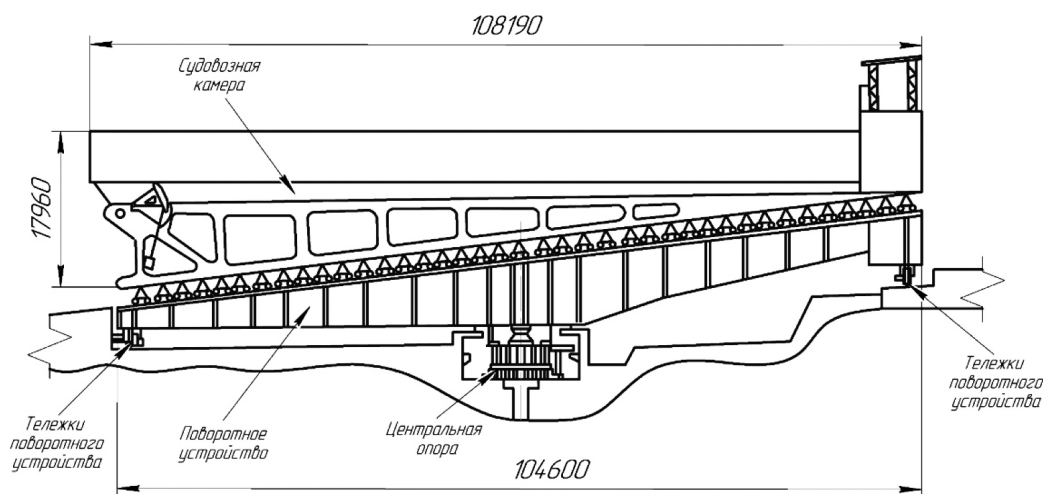


Рис. 1. Схема Красноярского судоподъемника

Взаимное расположение элементов ЦО представлено на рис. 2. Для обеспечения возможности вращения ПУ в ЦО смонтированы следующие элементы: сферический подшипник, включающий верхнюю плиту 1, нижнюю плиту 2, верхний вкладыш 3 с вогнутой поверхностью, цилиндрическое кольцо 4, нижний вкладыш 5 с выпуклостью вверх. Плита сферического подшипника 1 воспринимает нагрузку от балки ПУ и передает ее через вкладыши 3 и 5 на среднюю часть барабана 6, связанную болтовыми соединениями с боковыми частями 7 барабана 6. К нижней части составного барабана с помощью болтовых соединений крепятся элементы двутаврового профиля промежуточного кольца 8, к которому крепится круговой погон 9, состоящий из девяти секторов (рис. 3), закрепленных (болтовыми соединениями) на промежуточном кольце 8. Погон 9 перемещается по тридцати коническим роликам 10 (рис. 4), на цапфы которых напрессованы четырехрядные роликовые подшипники 11. Предусмотрена смазка конических роликов в масляной ванне в нижней части неподвижной станины 12 с использованием гидрозатворов 13. Поворот роликов контролируется по перемещению стрелки 14 относительно крышки 17, уплотняемой кольцом 16. Горизонтальные усилия в нижней части барабана воспринимаются радиально-упорным подшипником 15. Предусмотрена возможность осевого перемещения конических роликов регулировочным болтом 18.

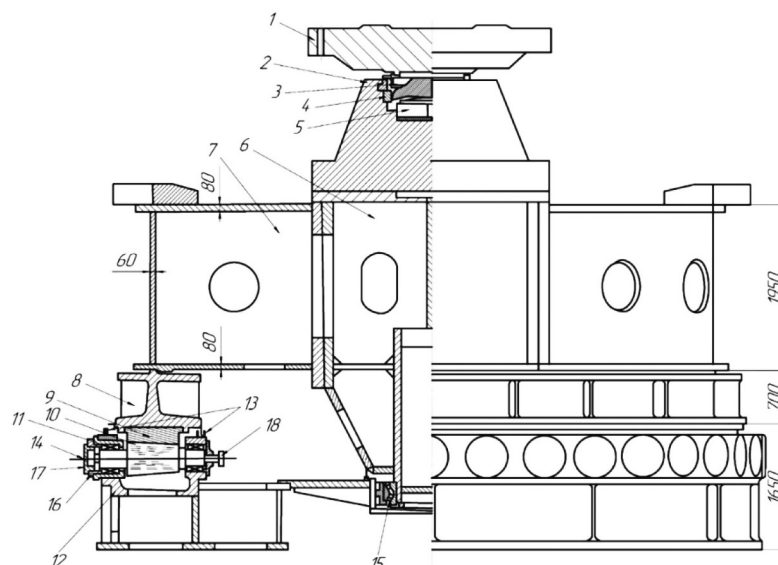


Рис. 2. Схема центральной опоры ПУ Красноярского судоподъемника

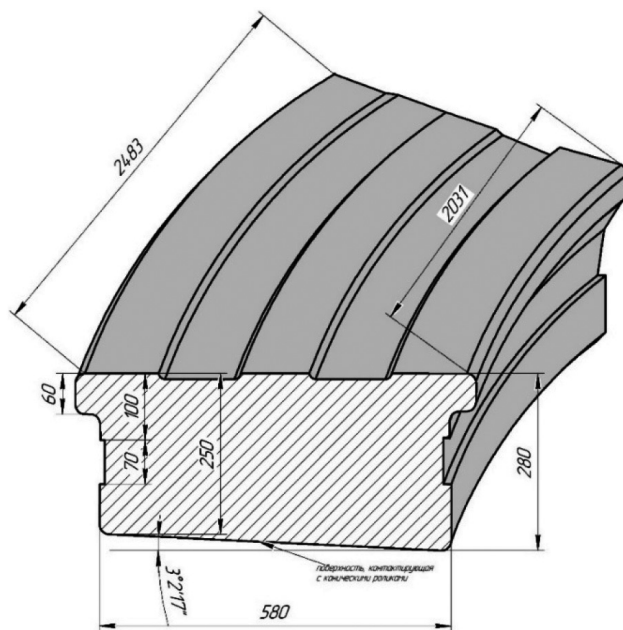


Рис. 3. Схема сектора кругового погона центральной опоры

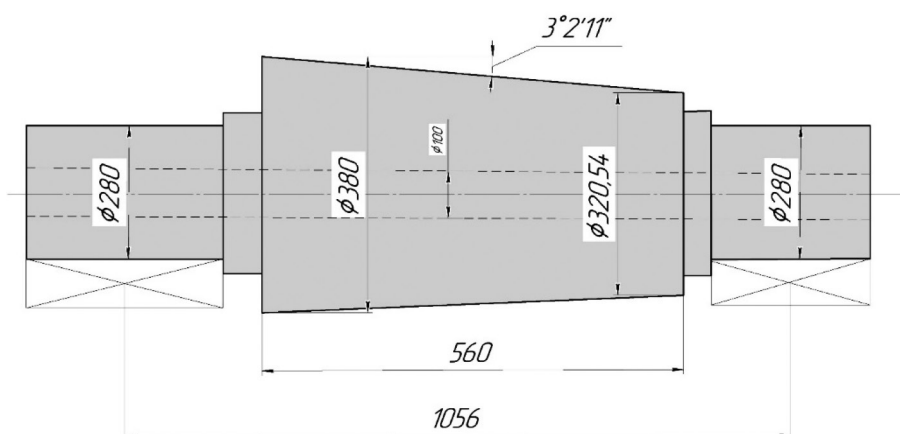


Рис. 4. Схема конического ролика центральной опоры

Для оценки характера силового взаимодействия укрупненных элементов ЦО, представленных на рис. 2, рассмотрим их функциональное назначение. Сферический подшипник воспринимает вертикальные и горизонтальные нагрузки. Угловые скорости вращения верхнего и нижнего вкладышей синхронизированы. Относительное перемещение поверхностей вкладышей может быть вызвано следующими причинами: упругими деформациями металлоконструкции балки ПУ под нагрузкой, а также смещением оси вращения ЦО относительно центра тяжести от веса суммарной внешней нагрузки. По показателю главных нормальных напряжений в точке наибольших сжимающих напряжений (центр площадки касания) расчетный запас прочности относительно предела текучести материала составляет 1,8 [8]. При осмотре контактных поверхностей вкладышей 3 и 5 (один раз в течение срока эксплуатации) следов повышенного износа и повреждений не установлено.

Из результатов анализа конструктивной схемы ЦО, проектного прочностного расчета и обследования состояния контактных поверхностей вкладышей, выполненного после периода наиболее интенсивной работы судоподъемника (1979–1996 гг.) следует, что протекание интенсивного процесса изнашивания, ограничивающего срок службы ЦО в рассматриваемом узле, маловероят-

но. Все вращающиеся элементы ЦО (три марки барабана, промежуточное кольцо и круговой погон) перемещаются относительно неподвижной станины на конических роликовых опорах.

Равно распределенная вертикальная нагрузка, передаваемая сферическим подшипником последовательно на барабан, промежуточное кольцо, а затем на погон вызывает изгибающие растягивающие напряжения на контактной поверхности секторов от изгибающего момента M_u^1 . Максимальные растягивающие напряжения $\sigma_{\max}^p$ соответствуют расположению фрагмента сектора погона Φ_n посередине, между ближайшими роликами опирания погона (рис. 5). При перемещении Φ_n в положение, соответствующее его нахождению над роликом, в нем, под воздействием изгибающего момента M_u^2 , формируются сжимающие напряжения $\sigma_{\max}^{сж}$. Таким образом, из представленной качественной модели изменения напряжений на контактной поверхности погона следует, что они имеют знакопеременный (пульсирующий) характер изменения. В этом случае нормирование допускаемых напряжений должно проводиться не по показателю текучести материала σ_T , а по показателю предела его выносливости σ_{-1} при переменных нагрузках.

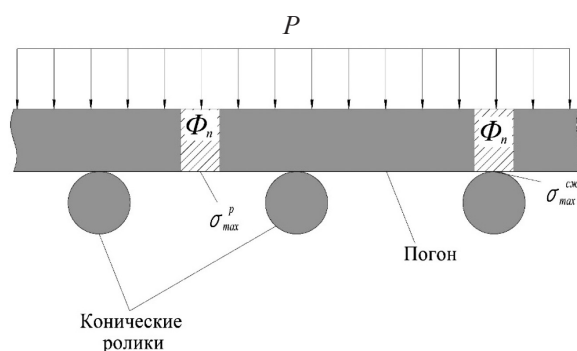


Рис. 5. Формирование напряжений в погоне от равномерно распределенной нагрузки P при расположении фрагмента погона между коническими роликами и над ними

В проектной документации на ЦО отсутствует прочностной расчет секторов погона. Учитывая высокую зависимость скорости развития усталостного процесса [10], [13]–[16] от уровня приложенных напряжений, выполнен оценочный расчет напряженно-деформированного состояния элементов погона с использованием метода конечных элементов [17] без учета податливости опор.

Результаты (Results)

Конечно-элементная модель (КЭ-модель) ролика с фрагментом погона показана на рис. 6, исходя из предположения приложения равномерной нагрузки на погон в вертикальном направлении. Ролик свободно оперт на подшипники, боковые границы фрагмента погона заделаны по условиям симметрии в плоскостях опирания погона на смежные ролики. Погон загружен равномерно-распределенным давлением сверху (со стороны передачи усилия с кольцевого ребра барабана).

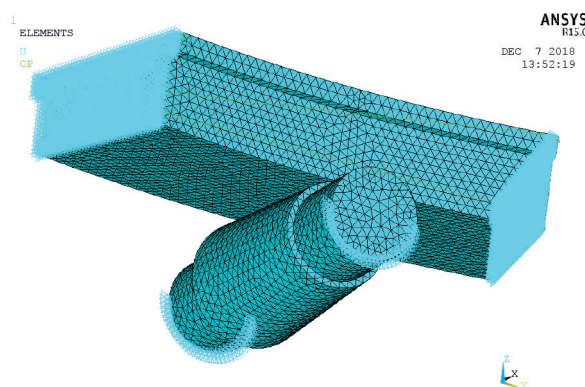


Рис. 6. Конечно-элементная модель ролика с фрагментом погона

Используемая КЭ-модель носит оценочный характер для приведенных величин напряжений и перемещений и показывает качественную картину изгиба ролика и погона. Давление на погон соответствует величине вертикального усилия на опору ПУ равное 6200 т-с, приведенной в проектной документации. В результате расчета установлено, что максимальное значение нормальных напряжений в секторе погона составило $\sigma_{\max}^n = 397$ МПа (рис. 7) при справочном, допускаемом для материала погона из стали 38ХНЗМФА, $\sigma_{-1} = 412$ МПа. Значение $\sigma_{\max}^n$ получено для случая равномерного опирания погона на роликовые опоры. Указанное допущение может быть нарушено, например, в моменты наезда СК на ПУ и съезда с него, а также при изменении положения оси сферического подшипника в случае упругой деформации балки ПУ. С учетом большого числа факторов, оказывающих влияние на величину $\sigma_{\max}^n$ на локальных участках деталей, в том числе технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений, а также дополнительных динамических нагрузок на участках стыков секторов, требование о необходимости введения коэффициента запаса $n_\sigma = 1,5$ [13] при расчете прочности и долговечности элементов, работающих в условиях малоциклового нагружения, представляется в данном случае достаточно обоснованным.

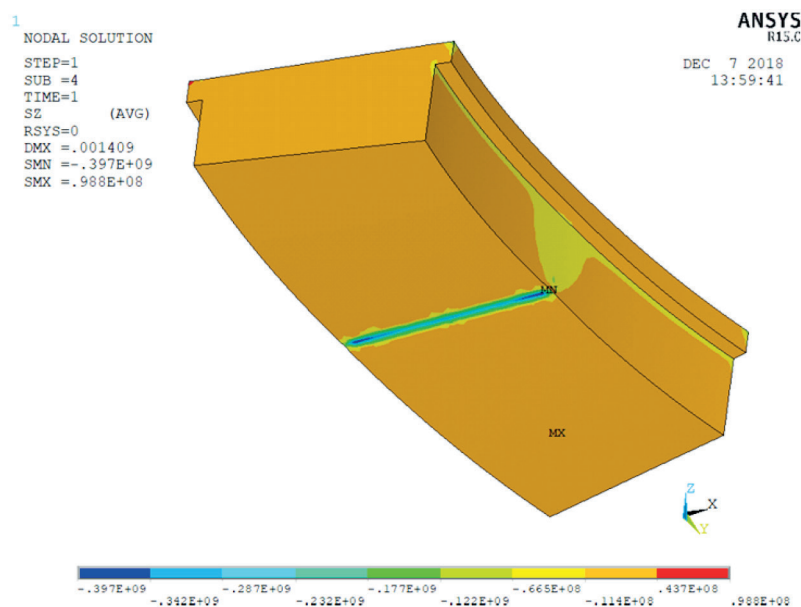


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений SZ в погоне, Па

Для обеспечения долговечности работы элемента в условиях циклического нагружения должно выполняться условие

$$[\sigma_{-1}] \geq \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma},$$

где $[\sigma_{-1}]$ — допустимый уровень циклических напряжений, МПа;

σ_{-1} — справочное значение предела выносливости материала, МПа;

n_σ — рекомендуемый коэффициент запаса по показателю σ_{-1} .

Для рассматриваемого случая значение $[\sigma_{-1}]$ составляет 274,7 МПа. Расчетные приложенные напряжения $\sigma_{\max}^n$ в 1,44 раза превышают $[\sigma_{-1}]$. Следует отметить, что полученные значения $\sigma_{\max}^n$ требуют проверки с учетом податливости опор вращающихся элементов ЦО и нижней неподвижной станины. Другим фактором, подтверждающим необходимость верификации $\sigma_{\max}^n$, является высокая зависимость его значения от степени неравномерности опирания на роликовые опоры вытекающая из проектного расчета роликовых опор.

Высокий уровень действующих напряжений в секторах погона подтверждается фактами развития повреждений типа трещин, выявленных при периодических наблюдениях. Данное об-

стоятельство свидетельствует о критической скорости процесса усталости материала секторов погона ЦО, что ограничивает долговечность элементов.

При переводе СК с нижних судовозных путей на верхние требуется разворот ПУ на угол $\angle_{\text{ПУ}} = 142^\circ 23' 07''$. Угол между осями роликовых опор составляет $\angle_p = 12^\circ$. За один полуцикл судопропуска число циклов $N_{\text{пц}}$ с учетом синусоидального характера изгибающего момента для вращающихся деталей, составит

$$N_{\text{пц}} = \frac{\angle_{\text{ПУ}}}{\angle_p} \approx 12 \text{ ед.}$$

Количество выполненных полуциклов судопропуска, по данным [18], составляет $\approx 9 \cdot 10^3$. Полное количество циклов изменения напряжений в элементе находится в диапазоне 10^3 – 10^4 , что, по мнению авторов работы [13], близко к условной границе мало- и многоциклового усталости для пластичных материалов и сплавов и определяет среднее число циклов для зоны перехода от упругопластического к упругому циклическому деформированию.

Конечно-элементная модель, использованная для расчета напряженно-деформированного состояния секторов погона, позволила получить расчетные значения напряжений от изгибающих нагрузок на контактной поверхности роликов: $\sigma_{\text{max}}^p = 304 \text{ МПа}$ (рис. 8) при условии равномерной на них нагрузки. По проектному прочностному расчету, при указанном допустимом значении в опасном сечении (галтель у опоры диаметром 280 мм (рис. 4)), напряжение от изгибающих нагрузок составляет 238 МПа с учетом концентрации напряжений 2,6. Предел выносливости материала ролика (сталь 5ХНВ) составляет $\approx 568 \text{ МПа}$. Допустимые значения $[\sigma_a]$, с учетом рекомендации [13], составляют $\frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma} = 378 \text{ МПа}$. Из трех случаев, приведенных в проектном расчете, напряжения в опасном сечении в двух из них превышают допустимые значения $[\sigma_a]$. Необходимо отметить, что уровень фактических напряжений в галтельном переходе от конической части ролика к диаметру цапфы, в значительной мере, зависит от его конструктивного и технологического исполнения (радиус галтели, наличие подрезов и др.) [19]. В целом близость расчетных значений σ_a к $[\sigma_a]$ свидетельствует о высокой вероятности образования усталостных повреждений в рассматриваемых сечениях, что подтверждает необходимость их периодической проверки¹ с использованием методов и средств неразрушающего контроля.

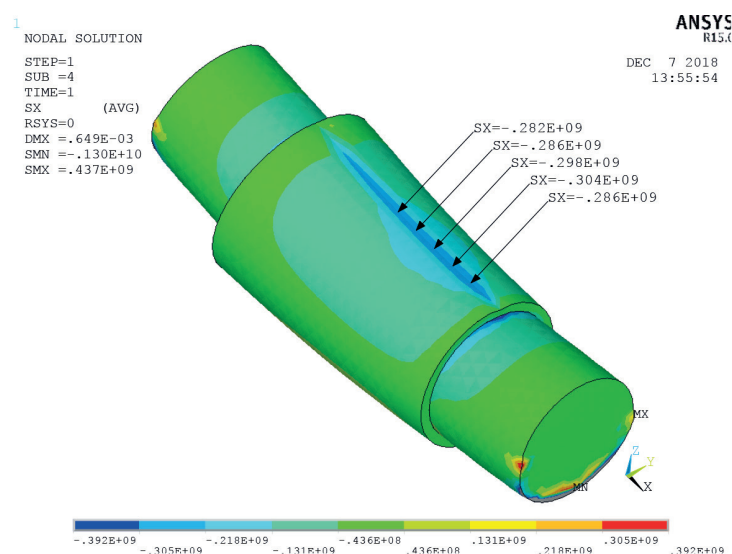


Рис. 8. Распределение напряжений в коническом ролике от изгиба, Па

¹ Инструкция по наблюдениям и исследованиям на Красноярском судоподъемнике. Ч. II: Механическая / Утв. 23.12.1988 г. 89 с.

Количество оборотов роликов, соответствующее количеству изменений нагрузки в опасном сечении N_p за один полцикл судопропуска (при отсутствии проскальзывания роликов), определяемое по формуле, составляет 8,2 оборота:

$$N_p = \frac{\pi D_n}{360^\circ \cdot d_p} \cdot \angle_{\text{пу}},$$

где D_n — средний диаметр погона, равный 6,6 м;

d_p — длина окружности ролика по среднему диаметру его конической части, равная 1 м.

Из анализа рассмотренных расчетных материалов следует, что упругие прогибы роликов и погона имеют достаточно большие значения (до 1 мм) — рис. 9. Это обстоятельство, с учетом циклического приложения нагрузки, должно учитываться при оценке состояния болтовых соединений, обеспечивающих неизменность взаимного положения основных элементов центральной опоры. С этих позиций требования нормативных документов^{1, 2, 3} о необходимости проверки болтовых соединений при оценке технического состояния изделий обоснованы.

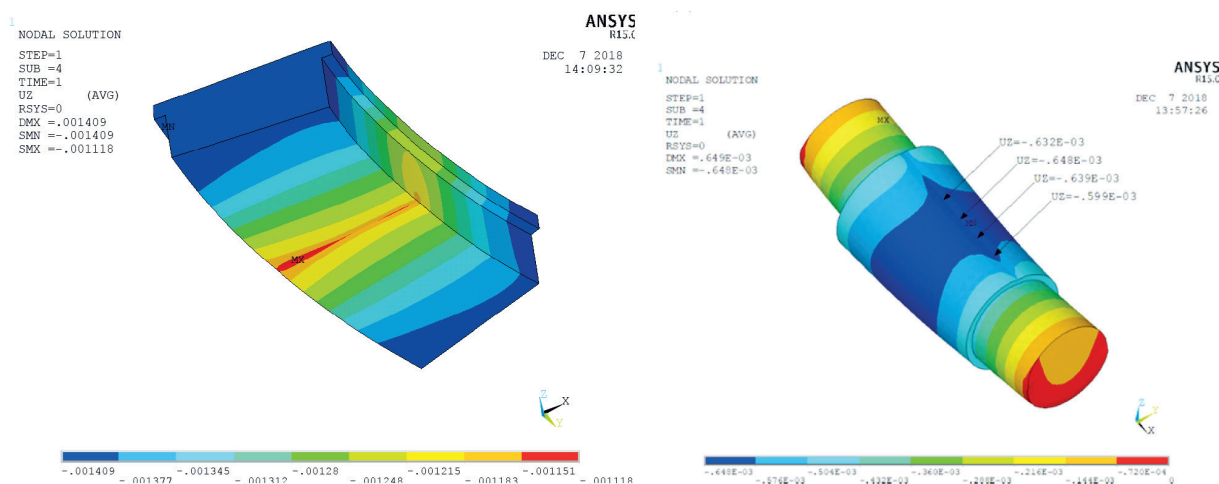


Рис. 9. Распределение перемещений погона:

a — в вертикальной плоскости; *б* — в коническом ролике от изгибающих нагрузок

Выводы (Summary)

1. На основе приведенных результатов исследований динамики деструктивных процессов, изменяющих состояние элементов центральной опоры поворотного устройства Красноярского судоподъемника следует, что критическим из них, ограничивающим надежность и долговечность центральной опоры, следует считать процесс усталостного повреждения секторов погона, обусловленный высоким уровнем действующих напряжений.

2. Интенсивность развития повреждений в опасных сечениях конических роликов может быть установлена после их обследования с использованием средств неразрушающего контроля, результаты которого служат основанием для оценки корректности рассмотренных вариантов расчёта.

3. Проверка состояния болтовых соединений, обеспечивающих проектные связи между основными элементами центральной опоры, должна проводиться в соответствии с требованиями нормативных документов для подобных элементов в других отраслях.

4. Для реализации мероприятий, направленных на уточнение значений предельно-допустимых отклонений элементов от проектного состояния и определения обоснованных сроков без-

¹ РД 10-112-2-97. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Ч. 2: Краны стреловые самоходные общего назначения. М.: ОАО «ВНИИСТРОЙДОРМАШ», 1997. 92 с.

² РД 10-112-3-97. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Ч. 3: Башенные, стреловые несамоходные и мачтовые краны, краны лесопогрузчики. М.: СКТБ БК, 1997. 97 с.

³ РД 197-98. Инструкция по оценке технического состояния болтовых и заклепочных соединений грузоподъемных машин. 30 с.

опасной эксплуатации центральной опоры, необходимо проведение расчетных исследований напряженно-деформированного состояния погона с учетом податливости опор основных элементов и степени неравномерности нагружения роликовых опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
2. Кузьмицкий М. Л. Результаты оценки напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкций судовозной камеры Красноярского судоподъемника с учетом динамических нагрузок при перемещении ее по судовозным путям / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонов, И. Н. Базавлук // Гидротехническое строительство. — 2018. — № 11. — С. 16–24.
3. Кузьмицкий М. Л. Анализ напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкций поворотного устройства Красноярского судоподъемника и исследование вероятных причин их повреждений / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонов, О. В. Сугак // Гидротехническое строительство. — 2018. — № 12. — С. 8–15.
4. Трение, изнашивание и смазка: справ. в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1. — 400 с.
5. Семанов Н. А. Судоводные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1972. — 352 с.
6. И-10540. Центральная опора поворотного устройства: инструкция по эксплуатации центральной опоры. — Л.: СКБ «Ленгидрость», 1973. — 19 с.
7. Исследования по общей теории систем: сб. переводов / под общ. ред. В. Н. Садовского, Э. Г. Юдина. — М.: Прогресс, 1969. — 519 с.
8. Р-15133. Поворотное устройство. Центральная опора: пояснительная записка и расчет. — 1977. — 44 с.
9. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справ. / под общ. ред. В. Д. Кальнера. — М.: Машиностроение, 1984. — 384 с.
10. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П. И. Кудрявцев. — М.: Машиностроение, 1982. — 173 с.
11. Кузнецов Н. Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справ. / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков. — М.: Машиностроение, 1993. — 304 с.
12. Пат. 205248 СССР, МПК В66С 23/84. Опорно-ходовое устройство / И. В. Арон, В. А. Антонова, Е. И. Залькиндсон, Б. М. Шур, Л. П. Иркина, Г. А. Бронковский, В. В. Вихирев, Г. А. Яблонский, Р. К. Фасулати; заяв. Ленинградская проектно-конструкторская контора «Гидростальпроект». — № 1039976; заявл. 27.11.1965; опубл. 01.01.1967, Бюл. №23. — 3 с.
13. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
14. Терентьев В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — М.: Наука, 2015. — 450 с.
15. Springer M. Fatigue life predictions of metal structures based on a low-cycle, multiaxial fatigue damage model / M. Springer, H. E. Pettermann // International Journal of Fatigue. — 2018. — Vol. 16. — Pp. 355–365. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.031.
16. Hassanipoura M. Effect of periodic underloads on fatigue crack growth in three steels used in hydraulic turbine runners / M. Hassanipoura, Y. Verremana, J. Lantaigneb, J.Q. Chena // International Journal of Fatigue. — 2016. — Vol. 85. — Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.11.027.
17. Кузьмицкий М. Л. Исследование влияния деформаций балки поворотного устройства на работоспособность элементов кругового погона центральной опоры Красноярского судоподъемника с определением предельно-допустимых отклонений опорных поверхностей, износов и повреждений его элементов: отчет о НИР / М. Л. Кузьмицкий. — СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2018. — 92 с.
18. Кузьмицкий М. Л. Исследование технического состояния несущих металлоконструкций Красноярского судоподъемника с определением напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных элементов и оценкой остаточного ресурса: отчет о НИР / М. Л. Кузьмицкий. — СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2017. — 207 с.

19. Когаев В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. — М.: Машиностроение, 1991. — 319 с.

REFERENCES

1. Bolotin, V. V. *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktsiy*. M.: Mashinostroyeniye, 1984.
2. Kuzmitskiy, M. L., N. M. Ksenofontov, and I. N. Bazavluk. "The results of the evaluation of the stress-strain state of the bearing structural section of the ship-carrying camera of the Krasnoyarsk ship's elevator, taking into account dynamic loads when moving it along ship-carrying trace." *Power Technology and Engineering* 11 (2018): 16–24.
3. Kuz'mitskiy, M. L., N. M. Ksenofontov, and O. V. Sugak. "Analiz napryazhenno-deformirovannogo sos-toyaniya nesushchikh metallokonstruktsiy povorotnogo ustroystva Krasnoyarskogo sudopod'yemnika i issledovaniye veroyatnykh prichin ikh povrezhdeniy." *Power Technology and Engineering* 12 (2018): 8–15.
4. Kragel'skii, I. V., and V. V. Alisin, eds. *Treniye, iznashivaniye i smazka: Spravochnik. Part 1*. M.: Mashinostroyeniye, 1978.
5. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnyye kanaly, shlyuzy i sudopod'yemniki*. M.: Transport, 1972.
6. *Instruction I-10540. Tsentral'naya opora povorotnogo ustroystva. Instruksiya po ekspluatatsii tsentral'noy opory*. L.: SKB «Lengidrost'», 1973.
7. Sadovskii, V. N., and E. G. Yudin, eds. *Issledovaniya po obshchey teorii sistem: Sbornik perevodov*. M.: Progress, 1969.
8. *R-15133 Povоротное устройство. Tsentral'naya opora. Poyasnitel'naya zapiska i raschet*. 1977.
9. Kal'ner, V. D. *Kontrol' kachestva termicheskoy obrabotki stal'nykh polufabrikatov i detaley: Spravochnik*. M.: Mashinostroyeniye, 1984.
10. Kudryavtsev, P. I. *Nerasprostranyayushchiyesya ustalostnyye treshchiny*. M.: Mashinostroyeniye, 1982.
11. Kuznetsov, N. D., V. I. Tseytlin, and V. I. Volkov. *Tekhnologicheskiye metody povysheniya nadezhnosti detaley mashin: Spravochnik*. M.: Mashinostroyeniye, 1993.
12. Aron, I. V., V. A. Antonova, Ye. I. Zal'kindson, B. M. Shur, L. P. Irkina, G. A. Bronovskiy, V. V. Vikhirev, G. A. Yablonskiy, and R. K. Fasulati. USSR 205248, IPC V 66 S 23/84. Oporno-khodovoye ustroystvo. USSR assignee. Publ. 1 January 1967.
13. Kogayev, V. P., N. A. Makhutov, and A. P. Gusenkov. *Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost'*. M.: Mashinostroyeniye, 1985.
14. Terent'yev, V. F., and S. A. Korableva. *Ustalost' metallov*. M.: Nauka, 2015.
15. Springer, M., and H. E. Pettermann. "Fatigue life predictions of metal structures based on a low-cycle, multiaxial fatigue damage model." *International Journal of Fatigue* 16 (2018): 355–365. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.031.
16. Hassanipoura, M., Y. Verremana, J. Lantigneb, and J. Q. Chena. "Effect of periodic underloads on fatigue crack growth in three steels used in hydraulic turbine runners." *International Journal of Fatigue* 85 (2016): 40–48. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.11.027.
17. Kuz'mitskiy, M. L. *Issledovaniye vliyaniya deformatsiy balki povorotnogo ustroystva na rabotosposobnost' elementov krugovogo pogona tsentral'noy opory Krasnoyarskogo sudopod'yemnika s opredeleniyem predel'no-dopustimyykh otkloneniy opornykh poverkhnostey, iznosov i povrezhdeniy yego elementov*. Scientific Report. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2018.
18. Kuz'mitskiy, M. L. *Issledovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh metallokonstruktsiy Krasnoyarskogo sudopod'yemnika s opredeleniyem napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya naiboleye nagruzhennykh elementov i otsenkey ostatochnogo resursa*. Scientific Report. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2017.
19. Kogayev, V. P., and Yu. N. Drozdov. *Prochnost' i iznosostoykost' detaley mashin*. M.: Mashinostroyeniye, 1991.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмицкий Михаил Леонидович —
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuzmitskiy, Mikhail L. —
Dr. of Technical Sciences,
Chief Researcher
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping

198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru,
KuzmitskiyML@gumrf.ru

Ксенофонтов Николай Михайлович —
научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: ksen_nm@mail.ru

Базавлук Игорь Николаевич —
конструктор 1-й категории
АО «ЦКБ МТ «РУБИН»
191119, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 90
e-mail: iru_256@mail.ru

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru,
KuzmitskiyML@gumrf.ru

Ksenofontov, Nikolai M. —
Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ksen_nm@mail.ru

Bazavluk, Igor N. —
1st Category Designer
The Central Design Bureau
for Marine Engineering «Rubin»
90, Marata Str., St. Petersburg, 191119,
Russian Federation
e-mail: iru_256@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.
Received: February 7, 2019.*

OPTIMIZATION OF NAVIGATIONAL ISOSURFACE SIMULATION BY THE METHODS OF BASIC FINITE SPLINES

I. V. Yuyukin

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

The optimized algorithm for navigational isosurface of any constructional complexity is proposed in the paper. Spline interpolation of navigational isoline is considered only as a particular case of decision for three-dimensional problem. The formalization of the modified mathematical apparatus for the practical synthesis of navigational isosurface based on the methods of basic finite splines is given. The advantage of the offered approach is demonstrated by the decision of the task for the generation of geoidal spline model as an argument, of the practical applicability of the developed method. The hybrid algorithm of approximation by B-splines in the combination with smooth analogues of Lagrangian splines is absolutely universal in independence from the specific factual presentation of the real navigational isosurface that allows us to solve the wide spectrum of applied navigation problems. The effective search for measurement errors of navigation parameters by the methods of computer visualization of the geometrically restored base of the digital data becomes possible when using the optimized model of spline approximation. The fictitiousness of any measurement will be unambiguously detected by the noise peak of blunder which occurs due to the breach of the smoothness of the approximated navigational isosurface. Based on the analysis of the imitation spline surface, the identified measurement error can be promptly eliminated from the data set with minimal time consumption without using special computer animation tools. The issue of calculative accuracy of the algorithm and compactness of navigational information storage has been investigated by the author's organized computing experiments.

Keywords: Basic spline, finiteness, B-spline, spline interpolation, spline approximation, analogues of Lagrangian splines, the hybrid algorithm of approximation, geoidal spline model.

For citation:

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.

УДК 656.61.052 656

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИЗОПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ БАЗИСНЫХ ФИНИТНЫХ СПЛАЙНОВ

И. В. Ююкин

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

Предлагается оптимизированный алгоритм моделирования навигационной изоповерхности любой конструктивной сложности. Сплайн-интерполяция навигационной изолинии рассматривается только как частный случай решения пространственной задачи. Приводится формализация модифицированного математического аппарата практического синтеза навигационной изоповерхности на основе методов базисных финитных сплайнов. Преимущество предлагаемого подхода демонстрируется решением задачи генерирования геоидной сплайновой модели в качестве доказательства практической применимости разработанного способа. Гибридный алгоритм аппроксимации B-сплайнами в комбинации с гладкими аналогами лагранжевых сплайнов является абсолютно универсальным в смысле независимости от конкретного фактического представления реальной навигационной изоповерхности, что позволяет решать широкий спектр прикладных задач судовождения. При использовании оптимизированной модели сплайн-аппроксимации становится возможным осуществление эффективного поиска ошибок измерений навигационных параметров методами компьютерной визуализации геометрически восстановленной базы цифровых данных. Фиктивность любого измерения будет однозначно обнаружена по шумовому пику промаха, возникающему за счёт нарушения гладкости аппроксимированной навигационной изоповерхности. На основе

анализа имитационной сплайновой поверхности найденную ошибку измерений оперативно можно исключить из массива данных с минимальными временными затратами без привлечения специальных средств компьютерной анимации. С помощью предложенных в статье вычислительных экспериментов исследован вопрос расчетной точности алгоритма и компактности хранения навигационной информации.

Ключевые слова: базисный сплайн, финитность, В-сплайн, сплайн-интерполяция, сплайн-аппроксимация, аналоги лагранжевых сплайнов, гибридная модель аппроксимации, сплайновая модель геоида.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов/ И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

Введение (Introduction)

Актуальность алгоритмизации навигационных задач методами сплайн-функций обусловлена необходимостью эффективной автоматизированной обработки навигационной информации за счет создания универсальных и качественных вычислительных модулей. При современном уровне развития навигационных интегрированных систем, когда достигнут прогресс в изготовлении надежных компьютерных микросхем, особую важность приобретает задача разработки перспективных алгоритмов.

Методы, основанные на сплайнах, занимают ведущее место как среди перспективных алгоритмов непосредственно вычислительной математики, так и в задачах автоматизированной обработки навигационной информации. Анализируя современное состояние теории базисных сплайн-функций по научным публикациям [1]–[3], необходимо отметить, что фактически только условно обозначено направление возможных решений, но не даются конкретные практические рекомендации прикладных реализаций. В работе [4] отмечается, что использование финитности является безусловным преимуществом сплайнового алгоритма. Параметрическое представление базисных сплайнов, использованное в исследованиях [5], [6], дает наглядное представление о математической формализации метода, но организует реальные сложности при компьютерной реализации алгоритма.

Фундаментальная разработка решений навигационных задач методами классической полиномиальной сплайн-интерполяции с позиций теории приближения функций впервые выполнена доктором технических наук, профессором А. М. Жухлиным [7]. Традиционные сплайны показали эффективность по быстродействию при интерполяции навигационных изолиний, но уступают базисным сплайнам по компактности хранения информации и по вычислительным особенностям при синтезе навигационной изоповерхности [8]. Ранее предлагаемый подход игнорировался по причине алгоритмической сложности математической формализации навигационной изоповерхности.

Общее направление научного исследования можно определить как создание прогрессивного математического и программного судового обеспечения на единой методологической основе методов сплайн-функций. Целью подхода является достижение быстродействия вычислительных реализаций при наличии возможности получения результата в масштабе реального времени и обеспечение высокой алгоритмической точности навигационных расчетов при условии компактности хранения навигационной информации. Для достижения указанной цели сформулированы следующие задачи:

1. Создание алгоритма сплайнового восстановления навигационной изолинии как частного случая двумерной аппроксимации.
2. Оптимальное решение проблемы моделирования навигационной изоповерхности любой степени сложности методами базисных финитных сплайнов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Теоретической основой алгоритмизации навигационных задач послужила апробация методов математического аппарата сплайн-функций. Применимость сплайнов при решении

рассматриваемой проблемы можно объяснить следующими причинами. Во-первых, обязательным условием сплайн-интерполяции является необходимость использования информации дискретных результатов измерений. Проведение подобных измерений практически выполнимо при использовании современной аппаратуры либо необходимые данные имеются в навигационных пособиях в табулированном виде. Во-вторых, алгоритмы, построенные с помощью сплайнов, эффективно реализуются в программном обеспечении бортового компьютера. Оперирование с кусочными многозвенниками является эффективным с точки зрения проведения вычислений [9]. Расчет сплайн-функций или значений ее производных сопряжен только с умножением и сложением, что обуславливает высокую результирующую точность. Кроме того, сплайн является гладкой функцией в смысле успешной дифференцируемости. Положительным аспектом применения сплайнов являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость расчетных сплайновых процедур.

Сплайны представляют собой универсальное математическое средство восстановления изолиний по дискретным измерениям навигационных параметров по причине независимости от конкретного вида навигационной функции. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции по номеру сеточного интервала. Поэтому сплайновые аппроксимации являются высокоскоростным средством решения разнообразных навигационных задач.

В случае точных измерений навигационных параметров решается задача интерполяции, т. е. построения такой навигационной функции, которая в соответствующих точках строго принимает значения навигационных параметров. Если погрешности измерений значительные, то решается задача аппроксимации, состоящая в отыскании навигационной функции, имеющей плавный характер и проходящей в некоторой окрестности измеренных данных.

В предлагаемой статье рассматриваются нетрадиционные для судовождения базисные финитные сплайны (сокращенно — B -сплайны). При моделируемой совокупности линейно независимых финитных функций $B_i(x)$ предлагается к реализации следующая алгоритмическая комбинация:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{n+1} c_i B_i(x), \quad (1)$$

где c_i — скалярные коэффициенты, подлежащие математическому определению.

Принципиальная идея кусочной аппроксимации заключается в том, что весь интервал возможных значений аргумента навигационной функции разбивается на частичные сеточные отрезки и на каждом из них фрагмент навигационной изолинии приближенно заменяется сплайном.

Опрометчиво думать, что базисный сплайн физически тождественен приближаемой функциональной математической зависимости. В современной научной литературе наблюдается ошибочное представление по этому поводу. Цитата американского профессора Карл де Бора однозначно проясняет запутанную ситуацию при акцентировании внимания на факт, что B -сплайн является только базисной искусственной функцией, а не самим фактическим фрагментом кривой [10]. Реальная параметрическая кривая синтезируется путем умножения последовательности $B_i(x)$ на специальным образом подобранные скалярные коэффициенты c_i в каждой узловой точке. Таким образом, базисная функция математически является вторичной по отношению к оригинальной функциональной зависимости. Подмена понятий скрывает технологическую сущность процесса сплайн-аппроксимации.

Отличие базисного сплайна заключается в финитности его конструкции. Каждый B -сплайн строится на нескольких сеточных сегментах. Количество сеточных отрезков, являющихся носителем B -сплайна, определяется его степенью. Для получения выигрышной аппроксимации чаще всего используются кусочные полиномы третьей степени. Реализуемый кубический сплайн имеет класс «гладкости» C^2 и минимальный компактный носитель. Рассмотрим представление кубического B -сплайна в одномерном случае на пятикратном узловом полигоне (рис. 1).

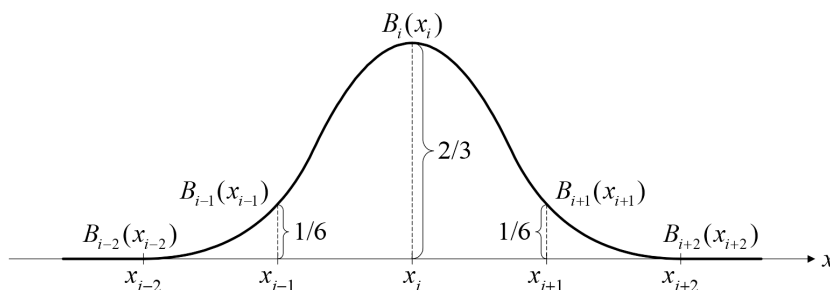


Рис. 1. Базисная функция кубического В-сплайна

Финитность математической конструкции означает, что нормализованные функции В-сплайна практически имеют ненулевые значения только на сеточных интервалах, которые составляют его носитель без учета граничных условий. Свойство нормализованности однозначно удовлетворяет соотношению

$$\sum_{i=1}^k B_i(x_i) = 1, \quad (2)$$

где k — степень сплайна.

Узловые значения $B_i(x_i)$ базисного кубического сплайна на пятиузловом сеточном интервале принимают следующие числовые значения (рис. 1):

$$B_i(x_i) = \frac{2}{3}; \quad B_{i-1}(x_{i-1}) = B_{i+1}(x_{i+1}) = \frac{1}{6}; \quad B_{i-2}(x_{i-2}) = B_{i+2}(x_{i+2}) = 0.$$

Последовательность узловых В-сплайновых значений состоит из положительных функций, в сумме равных единице, что следует из понятия нормализованности соотношения (2):

$$\frac{2}{3} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + 0 + 0 = 1.$$

Узловые значения нормализованных функций В-сплайна вычисляются эффективным способом при применении устойчивых адаптированных автором рекуррентных формул [8]. Так как функции $B_i(x_i)$ финитны, в каждом узле x_i от нуля отличны только активные функции с номерами $i - 1$, i , $i + 1$ (рис. 1). Следовательно, условия интерполяции навигационной изолинии в одномерном случае приобретают вид

$$c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Предлагается оригинальный способ вычисления приближаемой кубическими В-сплайнами навигационной функции для произвольного аргумента. Для этого необходимо использовать только коэффициенты четырех узловых В-сплайнов (рис. 2).

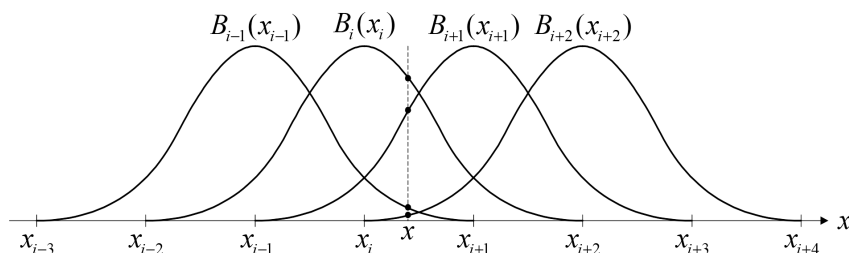


Рис. 2. Вычисление значения В-сплайна для произвольного аргумента навигационной функции

В силу финитности функций $B_j(x)$, $j = i - 1, \dots, i + 2$ в развернутом виде кубический В-сплайн (1) можно представить следующим образом:

$$S(x) = c_{i-1}B_{i-1}(x) + c_i B_i(x) + c_{i+1}B_{i+1}(x) + c_{i+2}B_{i+2}(x) \quad (4)$$

Предлагаемым способом для любой произвольной точки $x \in [x_i, x_{i+1}]$ вычисляется значение B -сплайна при использовании только четырех базисных функций в одномерном случае.

На основе разработанного алгоритма составлен программный паскаль-модуль. По результатам проверки на тестовых экспериментах уравнение круга равных высот рассчитывается авторским методом с точностью 10^{-5} – 10^{-6} угл. мин [8]. С целью синтеза навигационной изоповерхности на расширенной прямоугольной сетке организуется две системы B -сплайнов: $B_{i,k}(\varphi)$ и $B_{j,m}(\lambda)$. Поставленная задача сводится к вычислению значения двумерного базисного сплайна в произвольной точке (φ_*, λ_*) , принадлежащей прямоугольному фрагменту $\Omega_{i,j}$. Для этого необходимо знать значения четырех базисных функций по каждой координате φ и λ . Каркасная сплайновая поверхность, в отличие от кривой, должна каждый раз приближаться к четырем угловым точкам характеристического патча $\Omega_{i,j}$ или в случае интерполяции строго проходить через данные четыре точки.

Таким образом, первоначально выясняются номера узловых базисных функций, носители которых покрывают сплайновый лоскут $\Omega_{i,j}$. Это будут функции $B_{i-1,\dots,i+2,k}(\varphi)$ $B_{j-1,\dots,j+2,m}(\lambda)$. В конечном итоге, требуется вычислить значения 16 узловых базисных функций.

Если взять всевозможные произведения $B_{i,k}(\varphi)$ и $B_{j,m}(\lambda)$, то двумерный B -сплайн класса гладкости $C^{k-1,m-1}$ может быть сформирован как однозначное представление в виде

$$S(\varphi, \lambda) = \sum_{i=k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j}, \quad (5)$$

где k, m — степени B -сплайна по координатным осям φ и λ соответственно;

g, h — максимальное количество узлов на сеточных интервалах φ и λ ;

$B_{i,k}(\varphi)$, $B_{j,m}(\lambda)$ — узловые функции базисного сплайна;

$C_{i,j}$ — матрица подлежащих математическому определению скалярных коэффициентов.

Такой сплайн как минимум один раз непрерывно дифференцируем по каждой из переменных, т. е. соседние клетки сплайна гладко *склеены* между собой до непрерывности производной, на единицу меньшей, чем степень сплайна.

Результаты (Results)

Массиву дискретных измерений навигационных параметров в пространстве соответствует определенная поверхность положения, интерпретируемая как изоповерхность. Таким образом, изоповерхность рассматривается как геометрическое представление скалярного навигационного поля результатов измерений. Навигационные изолинии графически являются контурными линиями уровня навигационной изоповерхности при рассмотрении одного конкретного проекционного сечения. При этом процедуру восстановления контура исследуемой навигационной изоповерхности можно абстрактно представить как результат траекторного движения одной сплайновой навигационной изолинии параллельно самой себе в трехмерном пространстве [11].

Важным результатом является разработка эффективного высокоточного B -сплайнового алгоритма математического синтеза навигационной изоповерхности. Особая значимость применяемого подхода в судовождении возникает в случае сложной математической формализации изоповерхности и невозможности обеспечения необходимой дискретности измерений числового поля навигационных параметров. Практический синтез структуры навигационной изоповерхности обеспечивается аппроксимацией реального объемного профиля каркасной сплайновой моделью в автономной программной графической среде без привлечения посторонних фирменных средств компьютерной визуализации.

В рамках алгоритма допустимы вариации сплайнов второй, третьей и четвертой степени. Для практического применения оптимальными являются бикубические сплайны при условии приближения изоповерхностей, не характеризующихся значительными изменениями градиентов. В случае восстановления изоповерхности сложной волнообразной структуры предоставляется

алгоритмическая возможность независимого выбора по каждой координате степени сплайна, что может позволить получить близкую к реальному профилю линейчатую генерируемую поверхность. Благодаря базисной финитной структуре B -сплайна объем хранимой информации сокращается практически в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции. При дополнении к (5) ортогональных условий получаем оптимизированную гибридную модель двумерной B -сплайновой аппроксимации и интерполяции сплайновыми полиномами Лагранжа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} = F_{q,r} F \quad q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} = 0 \quad q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, h; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{j,m}(\lambda_r) L_{i,q}(\varphi_q) C_{i,j} = 0 \quad q=1, \dots, g; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{p} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} L_{i,q}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} = 0 \quad q=1, \dots, g; r=1, \dots, h, \end{array} \right. \quad (6)$$

где p — сглаживающий весовой коэффициент;

z_1, z_2 — максимальное число дискретных измерений навигационных параметров по координатным осям φ и λ соответственно;

$L_{i,q}, L_{j,r}$ — гладкие аналоги лагранжевых сплайнов.

Набор из сплайновых полиномов Лагранжа, по мнению автора статьи, организует тактическую альтернативу B -сплайну в рамках одной модифицированной математической системы (6). Вообще гибридный алгоритм позволяет использовать в практических расчетах преимущества каждого метода в зависимости от конкретной практической ситуации [12].

Введение ортогональных условий дополнительно к (5) обеспечивает диагональность матрицы скалярных сплайновых коэффициентов, что существенно облегчает задачу решения алгебраической системы уравнений (6).

Множители $L_{i,q}$ и $L_{j,r}$ являются локальными интерполяционными полиномами Лагранжа [13], сконструированными на аналогичных узловых носителях B -сплайнов.

В результате решения парадигмы (6) в блочно-диагональной матричной форме методом наименьших квадратов определяются неизвестные скалярные коэффициенты двумерного B -сплайна. Техника оперирования с блочными матрицами производится по тем же правилам матричного исчисления, как и в случае, когда вместо блоков задействуются традиционные матрицы.

Настоящее исследование имеет прикладной характер с доведением до вычислительной реализации решения рассматриваемых задач. Разработанные автором статьи компьютерные графические средства позволяют синтезировать электронные перспективы моделируемых навигационных изоповерхностей. Задание в интерактивном режиме весового коэффициента [14] дают возможность компенсировать погрешности измерений навигационных параметров и восстанавливать реальный объемный профиль.

Программный модуль обеспечивает надежные устойчивые вычисления при равномерной и неравномерной сетке независимо от регуляризации и хаотичности выполненных измерений. Исследован вопрос расчетной точности программной процедуры. Алгоритмическая точность по данным специально проведенного вычислительного эксперимента составляет порядок 10^{-8} [8]. Программный модуль двумерной B -сплайновой аппроксимации адекватно реализует алгоритмические возможности. Разработанный пакет прикладных программ является многофункциональным в смысле возможности расчета и визуализации на компьютерном дисплее электронной перспективы навигационной изоповерхности любой конструктивной сложности.

Обсуждение (Discussion)

Максимальная точность глобальной навигации непосредственно связана со сплайновым моделированием реальной формы Земли. Топографическая поверхность Земли образует фигуру неправильной и сложной грушевидной формы. Формализовать такую поверхность при помощи классических аналитических зависимостей считалось до проведения настоящего исследования невозможным. При использовании оригинального метода на основе базисных сплайнов практической реальностью становится восстановление навигационной изолинии или изоповерхности любой степени сложности. Предварительно синтезируемой изоповерхности следует делать геометрическую оценку сложности аппроксимируемого объекта с целью выбора оптимального способа решения. Для этого автором статьи разработана специальная эффективная методика качественно-го исследования навигационной изоповерхности.

Необходимость оперирования исходными данными прямых измерений гравитационного поля и трудности геодезических вычислительных процедур делают актуальным поиск нового перспективного *B*-сплайнового метода решения задачи моделирования урвенной поверхности океана [15], [16]. При очевидной сложности проблемы необходим поиск новых путей синтеза геоидной модели Земли в приемлемом для использования в морской навигации виде. Максимальное повышение точности спутниковых обсерваций при условии предельных требований к точному восстановлению геоида может быть эффективно обеспечено применением *метода базисных сплайнов*.

На основе разработанного алгоритма выполнен компьютерный эксперимент моделирования электронного профиля геоида. Геометрическая интерпретация вычислительных реализаций алгоритма сплайн-аппроксимации апробируется построением на дисплее компьютера фрагментов электронных перспектив геоида в различных ракурсах с целью демонстрации работоспособности предлагаемого математического аппарата.

Авторский алгоритм может быть использован на микропроцессорном уровне в перспективных спутниковых приемоиндикаторах или в электронных векторных картографических системах с целью использования в практике судовождения преимуществ, следующих из его применения. Возможен вариант хранения программных модулей в памяти бортовых вычислительных средств, что обеспечивает преимущества в оперативной возможности корректировки массива данных по мере обновления информации. При таком подходе достигается высокая точность пульсирующих вычислений геоидной поправки вследствие возможности использования уточнённых измерений контрольных станций спутникового слежения. Способ хранения информации в судовом компьютере исключает проблему модернизации приемоиндикатора при необходимости обновления измерительной информации.

Заключение (Conclusion)

Впервые успешно выполнены быстродействующие вычисления как любых изолиний, так и навигационных изоповерхностей методами *B*-сплайнов на основе разработанной автором статьи вычислительной процедуры. Полученные преимущества в быстродействии, универсальности и устойчивости вычислений программной реализации разработанных *B*-сплайновых алгоритмов позволят повысить компактность хранения и скорость обработки навигационной информации при включении разработанных прикладных модулей составной частью в программное обеспечение бортового компьютера. Универсальность составленных программ обеспечивает вычислительную реализацию широкого класса навигационных задач. Разработанный пакет прикладных программ является многофункциональным по возможности расчета и визуализации на компьютерном дисплее электронных проекций любой навигационной изоповерхности при использовании авторской программной оболочки.

Важным результатом является практическая реализация задачи использования сложных изолиний с проблематичной формализацией ввиду математического излома этих изолиний с учетом скалярного поля поправок. Потенциальная возможность использования в целях судовождения

сетки искаженных изолиний устраняет необходимость многочисленного пересчёта варьирующих корректирующих поправок для учета судоводителем систематической погрешности.

Самостоятельный интерес представляет дополнительная возможность использования разработанного алгоритма для поиска ошибок измерений в скалярном поле навигационных параметров при наличии значительного массива данных эксперимента методом компьютерной визуализации сплайновой изоповерхности. Предлагаемый новый подход может значительно упростить анализ апостериорной точности измерительной базы данных и обеспечить адекватное использование навигационных параметров. Поскольку прерогативой предлагаемого метода является формальный поиск ошибок, в рамках рассматриваемого подхода нет необходимости задействовать специальные методы компьютерной анимации. Фиктивность однозначно будет обнаружена по шумовому пику промаха, возникающему вследствие нарушения гладкости восстановленной сплайновой изоповерхности. Данная ошибка оперативно может быть исключена из файла данных измерений с минимальными временными затратами.

Впервые решена задача оптимизации восстановления скалярного поля навигационных параметров с использованием нетрадиционных для судовождения базисных финитных сплайнов.

Альтернативный вариант решения задачи определения места судна на сплайновой модели геоида может дать при практическом применении максимальную точность навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *De Boor Carl.* A Practical Guide to Splines / Carl de Boor. — Revised Edition. — New York: Springer-Verlag, 2001. — 355 p.
2. *De Boor Carl.* Box Splines / Carl de Boor, K. Holling, S. Riemenschneider. — New York: Springer-Verlag, 2014. — 222 p.
3. *Holling K.* Approximation and Modeling with B-Splines / K. Holling, J. Holling. — SIAM, 2015. — 214 p.
4. *Holling K.* Finite Element Methods with B-Splines / K. Holling. — SIAM, 2012. — 156 p.
5. *Prautzsch H.* B-spline and B-Spline Techniques / H. Prautzsch, W. Boehm, M. Paluszny. — New York: Springer-Verlag Science & Business Media, 2013. — 304 p.
6. *Wang H.* Construction of B-spline surface from cubic B-spline asymptotic quadrilateral / H. Wang, C. Zhu, C. Li // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. — 2017. — Vol. 11. — № 4. — Pp. 1–12. DOI: 10.1299/jamdsm.2017 jamdsm0044.
7. *Жухлин А. М.* Обработка навигационной информации в системах обеспечения безопасности плавания с позиций теории приближения функций: дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Жухлин. — Л., 1984. — 325 с.
8. *Ююкин И. В.* Алгоритмизация навигационных задач на основе методов кусочных аппроксимаций: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Ююкин. — Л., 1991. — 119 с.
9. *Волков Ю. С.* Сплайны как инструмент геометрического моделирования (к 80-летию со дня рождения Ю. С. Завьялова) / Ю. С. Волков, В. Л. Мирошниченко, С. И. Фадеев // Сибирские электронные математические известия. — 2011. — Т. 8. — С. А11–А16.
10. *De Boor Carl.* B(asic)-Spline Basics / Carl de Boor // Fundamental Developments of Computer-Aided Geometric Modeling. — New York: Academic Press, 1993. — Pp. 27–49.
11. *Yang H.* Construction of B-spline surface with B-spline curves as boundary geodesic quadrilateral / H. Yang, G. Wang // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2015. — Vol. 290. — Pp. 104–113. DOI: 10.1016/j.cam.2015.05.004.
12. *Gatilov S. Y.* Vectorizing NURBS surface evaluation with basic functions in power basis / S. Y. Gatilov // Computer-Aided Design. — 2016. — Vol. 73. — Pp. 26–35. DOI: 10.1016/j.cad.2015.10.006.
13. *Kano H.* B-Spline Trajectory Planning with Curvature Constraint / H. Kano, H. Fujioka // 2018 Annual American Control Conference (ACC). — IEEE, 2018. — Pp. 1963–1968. DOI: 10.23919/ACC.2018.8431703.
14. *Kvasov B.* Weighted cubic and biharmonic splines / B. Kvasov, T. W. Kim // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2017. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 26–44. DOI: 10.1134/S0965542517010109.
15. *Гомонов А. Д.* Построение зональных карт уровня поверхности океана по спутниковым данным на основе B-сплайн-интерполяции / А. Д. Гомонов // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2010. — Т. 13. — № 4-2. — С. 1087–1091.

16. Гомонов А. Д. Математическое моделирование уровенной поверхности океана по спутниковым данным на основе двумерной B-сплайн аппроксимации: дис. ... канд. техн. наук / А. Д. Гомонов. — СПб., 2011. — 18 с.

REFERENCES

1. De Boor, Carl. *A Practical Guide to Splines (Revised Edition)*. New York: Springer-Verlag, 2001.
2. De Boor, Carl, K. Holling, and S. Riemenschneider. *Box Splines*. New York: Springer-Verlag, 2014.
3. Holling, K., and J. Holling. *Approximation and Modeling with B-Splines*. SIAM, 2015.
4. Holling, K. *Finite Element Methods with B-Splines*. SIAM, 2012.
5. Prautzsch, H., W. Boehm, and M. Paluszny. *Bezier and B-Spline Techniques*. New York: Springer-Verlag Science & Business Media, 2013.
6. Wang, Hui, Chun-Gang Zhu, and Cai-Yun Li. "Construction of B-spline surface from cubic B-spline asymptotic quadrilateral." *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 11.4 (2017): 1-12. DOI: 10.1299/jamdsm.2017 jamdsm0044.
7. Zhukhlin, A. M. *Obrabotka navigatsionnoi informatsii v sistemakh obespecheniya bez-opasnosti plavaniya s pozitsii teorii priblizheniya funktsii*. Dr. Diss. L., 1984.
8. Yuyukin, I. V. *Algoritmizatsiya navigatsionnykh zadach na osnove metodov kusochnykh approksimatsii*. PhD Diss. L., 1991.
9. Volkov, Yuriy Stepanovich, Valerii Leonidovich Miroshnichenko, and Stanislav Ivanovich Fadeev. "Splines as a geometric modeling tool (to the 80 anniversary of the birth of Yu. S. Zav'yalov)." *Siberian Electronic Mathematical Reports* 8 (2011): A11-A16.
10. De Boor, Carl. "B(asic)-Spline Basics." *Fundamental Developments of Computer-Aided Geometric Modeling*. New York: Academic Press, 1993. 27-49.
11. Yang, Huogen, and Guozhao Wang. "Construction of B-spline surface with B-spline curves as boundary geodesic quadrilateral." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 290 (2015): 104-113. DOI: 10.1016/j.cam.2015.05.004.
12. Gatilov, Stepan Yu. "Vectorizing NURBS surface evaluation with basis functions in power basis." *Computer-Aided Design* 73 (2016): 26-35. DOI: 10.1016/j.cad.2015.10.006
13. Kano, Hiroyuki, and Hiroyuki Fujioka. "B-Spline Trajectory Planning with Curvature Constraint." *2018 Annual American Control Conference (ACC)*. IEEE, 2018. 1963-1968. DOI: 10.23919/ACC.2018.8431703
14. Kvasov, Boris, and Tae-Wan Kim. "Weighted cubic and biharmonic splines." *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 57.1 (2017): 26-44. DOI: 10.1134/S0965542517010109
15. Gomono, A. D. "Constructing regional maps of oceanic currents basing B-spline interpolation of seasurface level anomalies using satellite data." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 13.4-2(2010): 1087-1091.
16. Gomono, A. D. *Matematicheskoe modelirovanie urovennoy poverhnosti oceana po sputnikovym dannym na osnove dvumernoy B-spline approksimatsii*. Abstract of PhD diss. SPb, 2011.

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

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

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.
Received: February 7, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-275-283

A STUDY OF CARGO TURNOVER OF THE RIVER FLEET ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE

P. V. Degteva

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

Inland waterway transport on the Northern Sea Route performs important social tasks, and also plays a certain role in the structure of the cargo turnover of the Arctic seas. The place of the river fleet in the structure of the Northern Sea Route is considered in the paper. A list of the river shipping companies whose vessels operate on inland waterways in the Arctic is given. The topicality of the issue of using the river fleet vessels in the structure of sea traffic flows is substantiated. The use of river vessels in the Arctic seas causes a large number of publications. The literature covers economic, legal, organization and technical aspects. At the same time, a special attention was paid to the safety of river-marine vessels in the seas. The basins of inland waterways that are directly related to the exploitation of the river fleet vessels on the tracks of the Northern Sea Route are considered. The results of statistical processing of the main performance indicators of river vessels on the Northern Sea Route for 2013 and 2017 are presented. A tendency to increase the use of inland water transport in the areas of the Northern Sea Route has been revealed. An existing potential reserve of possible cargo transportation using river-marine vessels of river shipping companies in order to increase the total share of sea cargo transportation has been revealed. The volumes of cargo transportation of river shipping companies operating on inland waterways at the approaches to the Northern Sea Route are compared. The information on the river shipping companies in the Arctic zone is presented. Directions for the further research related to the prospects for using the river vessels on the Northern Sea Route are outlined.

Keywords: Northern Sea Route, river shipping companies, river vessels, cargo capacity.

For citation:

Degteva, Polina V. "A study of cargo turnover of the river fleet along the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 275–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-275-283.

УДК 528.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУЗООБОРОТА РЕЧНОГО ФЛОТА НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

П. В. Дегтева

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

Рассмотрен состав речного флота в структуре Северного морского пути, ввиду того, что он выполняет важные социальные задачи, а также играет определенную роль в структуре грузооборота арктических морей. Приведен перечень речных пароходств, суда которых работают на внутренних водных путях в акватории Арктики. Рассмотрены бассейны внутренних водных путей, имеющих непосредственное отношение к эксплуатации судов речного флота на трассах Северного морского пути. Приведены результаты статистической обработки количества заявлений на плавание речных судов в зоне Северного морского пути за 2013 и 2017 гг., их количественное распределение по валовой вместимости и данные по объему перевезенных грузов крупных речных пароходств занимающихся организацией перевозок по трассе Северного морского пути. Выявлена тенденция увеличения использования внутреннего водного транспорта в районах Северного морского пути и установлено наличие имеющегося потенциального резерва возможных грузоперевозок с помощью смешанного «река – море» класса судов речных пароходств в целях увеличения общей доли морских грузовых транспортировок. Сопоставлены объемы грузоперевозок речных пароходств, работающих на внутренних водных путях при подходах к Северному морскому пути. Представлены сведения о речных пароходствах в Арктической зоне. Намечены направления дальнейших исследований, связанных с перспективами использования речных судов на Северном морском пути.

Ключевые слова: Северный морской путь, речные пароходства, речные суда, грузоместимость.

Для цитирования:

Дегтева П. В. Исследование грузооборота речного флота на территории Северного морского пути / П. В. Дегтева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 275–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-275-283.

Введение (Introduction)

На трассах Северного морского пути (далее — СМП) эксплуатируется морской и речной транспорт. Суда осуществляют перевозки нефтепродуктов, генеральных, народнохозяйственных и прочих грузов в порты СМП, обслуживают население Крайнего Севера, Дальнего Востока и Сибири. Автор [1] отмечает, что в настоящий момент основными направлениями развития судостроительства по СМП являются: освоение транспортных подходов к нефтегазовым месторождениям Арктического Западного сектора, каботажные перевозки, грузоперевозки в рамках Норильского промышленного узла, осуществление Северного завоза, обеспечение строительными материалами строящихся портов, в особенности порта Сабетта в Обской губе, и транзитные перевозки между северо-западными и дальневосточными портами России и странами Северной Европы. По данным [2], доля участия водного транспорта в полном объеме грузоперевозок на территории Российской Федерации уступает некоторым Европейским странам: Германии, Франции, Нидерландам. Так, например, на долю внутреннего водного транспорта в Германии приходится 11 %, во Франции 10 %, в Нидерландах 34 %, а в Российской Федерации только 1,5 % от общего объема перевозок грузов и грузооборота всех видов транспорта. Несмотря на сезонность работы, речной транспорт имеет ряд значительных преимуществ перед другими видами транспорта. В первую очередь, это экономичность при перевозке массовых грузов и возможность снабжения провизией тех регионов Российской Федерации, где единственным транспортом является водный. В результате износа и ухудшения инфраструктуры речного транспорта Российской Федерации, ежегодно осуществлять речным транспортом весь потенциальный объем перевозок невозможно. В то же время на СМП увеличивается количество единиц речного флота. За последние пять лет использование речных судов в Арктике увеличилось на 13 %. Это в основном связано с добычей газа на шельфе Обской губы.

Развитие СМП и увеличение его грузооборота до 80 млн т к 2024 г. является одним из пунктов указа Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»¹, что необходимо для модернизации и расширения магистральной инфраструктуры за счет развития транспортных коридоров «Запад–Восток» и «Север–Юг». По данным Федерального агентства морского и речного транспорта, объем перевозимых грузов по Северному морскому пути в 2017 г. составил 10,7 млн т. Перевозки грузов морскими судами (без учета транзитных судов) составили 9,8 млн т, 0,9 млн т — речными [3].

Проблемам и перспективам развития речного транспорта посвящено значительное количество публикаций. Внутренние водные пути (далее — ВВП) занимают важное место в системе транспорта и грузооборота в арктических районах. В трудах Ю. А. Щербина [4], С. А. Агаркова и Л. В. Геращенко [5], В. А. Александрова [6] отражены возможности судостроения и реализации грузоперевозок внутренним водным транспортом с учетом стратегии развития до 2030 г. Проблемы, состояние и перспективы развития ВВП для территории Дальнего Востока и Якутии затронуты в работах О. И. Дворко [7] и Е. А. Заостровских [8]. Следует отметить, что в научной литературе практически отсутствуют работы, посвященные исследованию потоков судов смешанного *река – море* плавания и их маршрутизации в районе СМП. Актуальность работы определяется необходимостью определения роли и значения судов смешанного *река – море* плавания в условиях развивающегося СМП.

¹ Указ Президента от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 15.01.2019).

В целях обеспечения мореплавания судоходство по СМП регулируется «Правилами плавания в акватории СМП»¹ и Правилами морского регистра судоходства [9], в которых предусмотрены технические требования к грузовым судам. В арктических районах разрешена эксплуатация транспортных средств в соответствии с критериями ледовых усилений, приведенных в «Правилах плавания в акватории СМП». Для осуществления организации плавания судов в акватории СМП в 2013 г. распоряжением правительства Российской Федерации создана Администрация Северного морского пути, основными видами деятельности которой являются прием и рассмотрение заявлений на разрешения плавания судов в акватории СМП, мониторинг гидрометеорологической, ледовой и навигационной обстановки, предоставление информационных услуг в области организации плавания судов, формирование требований к обеспечению безопасности плавания, навигационно-гидрографическому и гидрометеорологическому обеспечению и осуществлению ледокольной проводки судов в акватории СМП.

Целями настоящей работы являются:

- сравнение объемов грузоперевозок речных пароходств, работающих на внутренних водных путях при подходах к СМП;
- оценка перспектив увеличения общего объема грузовых перевозок на СМП с помощью речных судов.

Методы и источники информации (Methods and Materials)

Акватория СМП. Акватория СМП определена статьей Федерального закона² как водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации с внутренними морскими водами и территориальными морями и примыкающей исключительной экономической зоной Российской Федерации. С востока оно ограничено линией разграничения морских пространств с США и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада — меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота, Югорский Шар. Общая протяженность СМП составляет 5600 км.

СМП включает морские пути и ВВП Сибири. Основной объем перевозимых грузов связан с такими энергосырьевыми товарами как нефть, сжиженный природный газ, уголь, металл. На трассе СМП находятся порты Мурманск, Сабетта, Игарка, Хатанга, Амдерма, Дудинка, Диксон, Тикси, Певек, Беринговский, Провидения и др. Все они обслуживаются с помощью трасс СМП, обеспечивая ввоз топлива, оборудования, продовольствия, вывоз леса, природных ископаемых и т. д.

Северный завоз. Эти перевозки осуществляются в целях снабжения топливом и продовольствием российских регионов, не имеющих круглогодичного автомобильного или железнодорожного сообщения с остальной территорией страны. Большая часть грузов доставляется речным путем, так как реки связывают отдаленные населенные пункты Крайнего Севера Сибири, Дальнего Востока и Европейской части России с СМП. Также предпочтение отдается речному транспорту ради экономии топлива [10]. Каждый год в северные регионы доставляется порядка 1,5 млн т нефтепродуктов, 3–4 млн т угля и более 500 тыс т продовольствия [11].

Основные речные пароходства, работающие на северных реках. Согласно данным годовых отчетов пароходств, ведущими пароходствами в эксплуатации речных судов на трассах СМП являются АО «Обь-Иртышское пароходство», ОАО «Ленское объединенное речное пароходство», ООО «Иртышское пароходство», ПАО «Северное речное пароходство» и АО «Енисейское речное пароходство».

¹ Приказ Минтранса России от 17 января 2013 года № 7 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/documents/8/2914?type=> (дата обращения: 15.01.2019).

² Федеральный закон от 28.07.2012 г. № 132-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/35786> (дата обращения: 15.01.2019).

Обь-Иртышское пароходство (ОИРП) осуществляет свою деятельность на таких реках, как Обь, Иртыш, Обская, Тазовская, Байдарацкая губа, бассейны Карского, Баренцева и Каспийского морей, а также на двадцати малых реках Тюменской, Омской, Новосибирской, Томской областей, Ханты-Мансийского, Ямало-Ненецкого автономных округов.

ОИРП специализируется на перевозке нерудностроительных материалов, тарно-штучных, негабаритных, тяжеловесных грузов, нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов по внутренним речным и морским путям, также доставляет грузы в районы Крайнего Севера. Флот ОИРПа состоит из 226 единиц: буксиров-толкачей, несамоходных барж, судов типа *река – море*. В регионах, где ведется основная работа пароходства, в течение многих лет не ведутся дноуглубительные работы, от чего боковые и малые реки находятся в своем естественном состоянии, зависимом от природных гидрологических условий. Из-за отсутствия дноуглубления, габариты судовых ходов на Оби и Иртыше стали ниже гарантированных. На некоторых участках, таких как Тюмень – Тобольск, почти отсутствует навигационная обстановка — береговые знаки убраны, бакены и вехи не выставлены.

Ленское объединенное речное пароходство (ЛОРП) выполняет грузоперевозки на реках Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма на участке СМП от Хатангского залива до Певека.

ОАО «ЛОРП» перевозит нефтепродукты, генеральные и другие грузы в Республику Саха (Якутия), Иркутскую область, Красноярский Край и Чукотский автономный округ в бассейне реки Лены и ее притоков: Витима, Олёкмы, Алдана и Вилюя, а также в устьевые порты Хатанги, Нижнеянска, Зеленого Мыса и Певека. В Ленском бассейне из порта Осетрово преобладающее число (более 70 %) нефтепродуктов доставляется в Республику Саха (Якутия) и распределяется до портов Ленск, Жатай, Пеледуй, Олекменск, п. Витим используется для вывоза сырой нефти с Талаканского месторождения, а п. Козыл-Сыр (река Вилюй) для вывоза газоконденсатного топлива.

Суда смешанного *река – море* плавания работают на трассе СМП от порта Хатанга до порта Певек с заходом в реки Анабар, Оленёк, Яну, Индигирку и Колыму.

ЛОРП осуществляет «северный завоз» в Арктические районы Якутии, на север Красноярского края и Чукотку по восьми маршрутам от Хатанги до Певека, составляющие в сумме более 5,6 тыс. км морского пути через моря Северного Ледовитого океана.

Флот ЛОРПа располагает 378 единицами: судами *река–море* класса (в основном сухогрузами класса «Сибирский» и танкерами серии «Ленанефть»), буксирами, а также пассажирскими, несамоходными и служебными судами.

Средний возраст судов ЛОРПа составляет 35 лет. Транспортное предприятие недостаточно оснащено дноуглубительной техникой. В Республике Саха почти не ведется судостроение (для примера в советское время функционировало три судовой верфи, два судоремонтных завода и три ремонтно-эксплуатационных баз флота, где ежегодно строилось до 25 судов). Согласно данным, полученным из средств массовой информации, на данный момент пароходством запланирован проект создания новой судовой верфи на 2019–2021 гг., что позволит обновить устаревший флот компании. Новая судовой верфь должна произойти на базе реконструкции имеющейся Жатайской базы технической эксплуатации флота.

Иртышское пароходство в основном ведет работы в Енисейском и Гыданском заливах, юго-западной части Карского моря, в устьевых портах Енисея, Дудинки, Игарки, на островах Белый, Велькицкого, Диксон, Сабетта.

Компания транспортирует грузы открытого хранения (песок, уголь, лес) и крытого хранения (продовольствие, цемент и т. д.), доставляет народнохозяйственные грузы в районы Карского севера, осуществляет перевозки пассажиров.

Флот Иртышского пароходства включает нефтеналивные баржи, пассажирские суда, транспортные самоходные сухогрузные суда, буксиры-толкачи, сухогрузные баржи и др.

Путейцами Иртышского пароходства выполнен огромный объем работ по дноуглублению и подчистке подходов к пунктам выгрузки, которые требуют постоянного обновления.

Енисейское речное пароходство (ЕРП) географически охватывает водные акватории от Абакана до Диксона и осуществляет перевозки грузов трассами СМП по западной части моря Лаптевых. Компания имеет развитую филиальную структуру. Как дочерние акционерные общества ЕРП существуют порты на Енисее (Красноярский речной порт, Лесосибирский порт).

Флот насчитывает около 650 единиц, сухогрузы типа ГТ, нефтеналивные суда типа НТ, ТН и ТНМ. Средний возраст судов составляет 25 лет. В режиме обеспечения навигации активно работает Богучанская гидроэлектростанция (ГЭС). Уровень Богучанского водохранилища в течение 2018 г. увеличился на 0,6 км². На ЕРП приходится 90 % «северного завоза».

Результаты (Results)

АСМП осуществляет прием заявлений на разрешения плавания в арктических водах как морских судов, так и судов типа *река – море*. Все организации, ведущие работы на акватории СМП, обязаны получить разрешения с указанием срока их действия. Суда типа *река – море* работают преимущественно в морях: Карское, Лаптевых, Чукотское, проливах: Югорский Шар, Малыгина, Карские ворота и Новоземельских, заливах: Байдарацкая и Обская губы, Гыданский, Енисейский, Олененский, Каменный мыс и др. По результатам математической обработки всех одобренных заявлений, опубликованных на официальном сайте АСМП, можно увидеть количественное распределение эксплуатируемых речных судов в период 2013–2018 гг. (рис. 1). С момента основания АСМП количество речных судов на СМП увеличилось на 70 %.

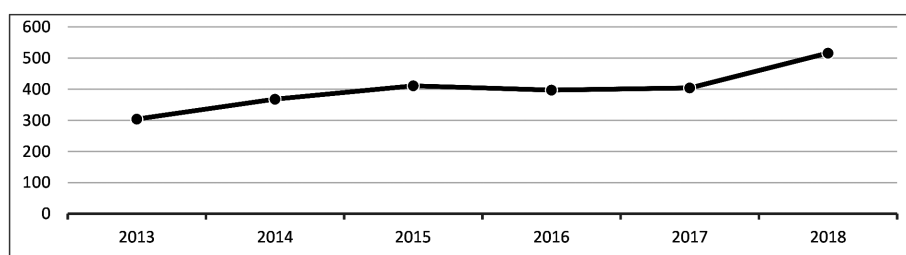


Рис. 1. Количественное распределение одобренных заявлений на плавание речных судов в зоне Северного морского пути

На рис. 2 видно, что количество эксплуатируемых речных судов на СМП значительно увеличилось в таких крупных пароходствах, как АО «Обь-Иртышское пароходство», ОАО «Ленское объединенное речное пароходство» и ПАО «Северное речное пароходство». ООО «Иртышское пароходство», ООО «Севернефтегазфлот», АО «Енисейское речное пароходство», ООО «СК «Экотек»» не имели резких изменений числа речных судов в зоне СМП за данный период. Остальные пароходства: ООО «Волго-Балтик логистик», ООО «Валкур», ООО «Картеш», ООО «Приобье» и другие, эксплуатировали незначительное число судов, что в 2017 г. составило 30 % от общего количества. Всего в период 2013–2017 гг. количество единиц речного флота на маршрутах СМП увеличилось на 33 %.

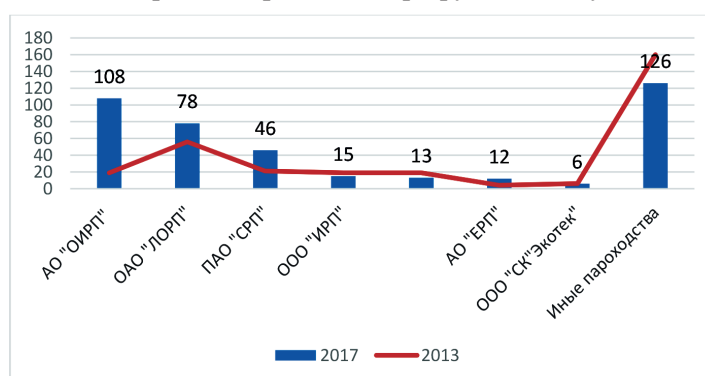


Рис. 2. Количественное распределение судов речных пароходств на трассах СМП в 2013 и 2017 гг.

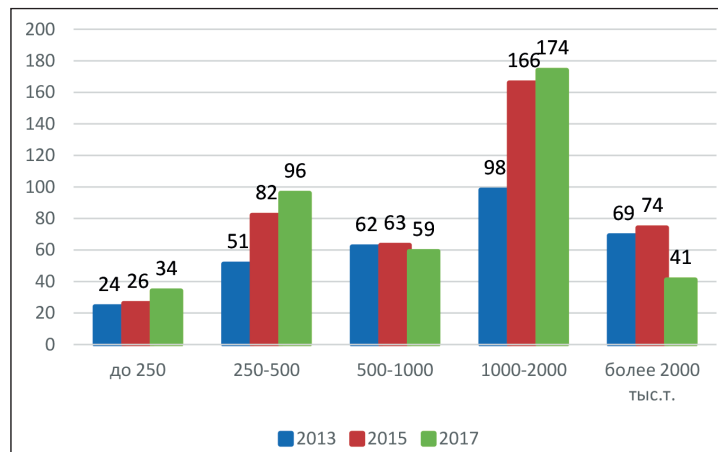


Рис. 3. Распределение количества речных судов по валовой вместимости

Сравнительный анализ грузовместимости речных судов всех пароходств показал, что наиболее часто на трассах СМП использовались суда с валовой вместимостью 1000–2000 т. Ввиду неполной загрузки крупнотоннажных судов, количество их использования к 2017 г. сократилось на 40 %. Использование малотоннажного флота имеет тенденцию к росту (рис. 3).

Обсуждение (Discussion)

За последние годы наблюдается возрастание количества единиц речного флота, используемого на СМП Обь-Иртышским и Ленским объединенным речными пароходствами (рис. 4). С 2013 по 2017 гг. ОИРП и ЛОРП эксплуатировали каждый год чуть более 70 и 100 единиц речного флота, соответственно, валовой вместимостью преимущественно от 300 до 1200 тыс. т.

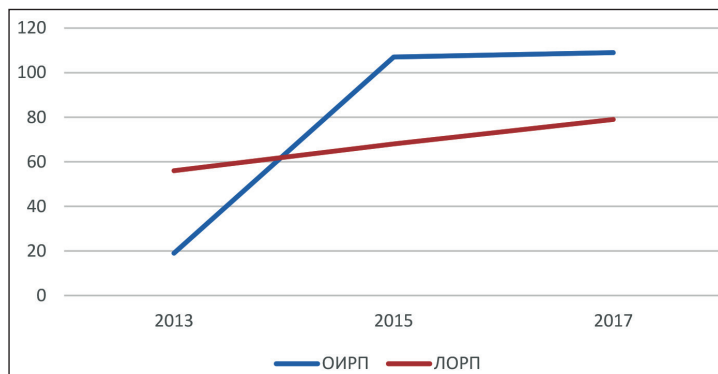


Рис. 4. Количество эксплуатируемых судов Обь-Иртышское пароходство и Ленское объединенное речное пароходство на СМП

Анализ официальных данных годовых отчетов по результатам работ ОИРП и ЛОРП, наглядно показал объем перевезенных грузов предприятиями на протяжении пяти лет. Следует отметить, что эффективность использования речного флота в течение этого времени преимущественно возрастала (см. таблицу и рис. 5).

Объем перевезенных грузов Обь-Иртышским пароходством и Ленским объединенным речным пароходством

Объем перевезенных грузов	Годы				
	2013	2014	2015	2016	2017
ОИРП, млн т	0,84	1,04	1,01	1,28	1,22
ЛОРП, млн т	1,19	1,27	1,30	1,21	1,33

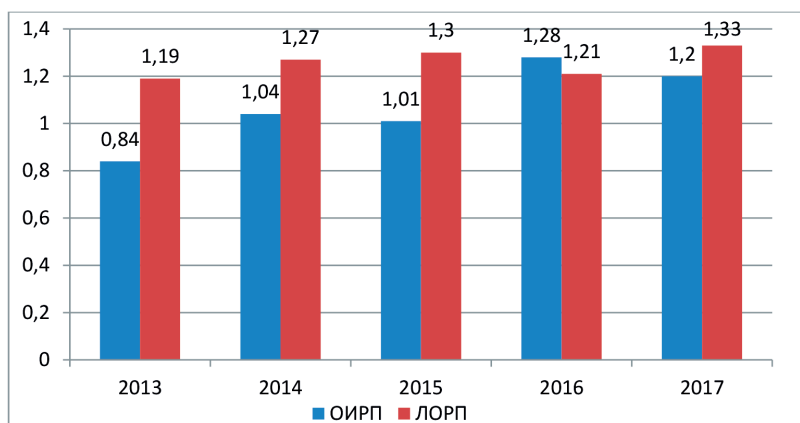


Рис. 5. Объем перевезенных грузов Обь-Иртышским пароходством и Ленским объединенным речное пароходством

По количеству судов ОИРПа и ЛОРПа в период плавания в зоне СМП и общему количеству единиц флота можно сделать вывод об имеющемся потенциальном резерве для повышения объема грузоперевозок в Арктике (рис. 6).

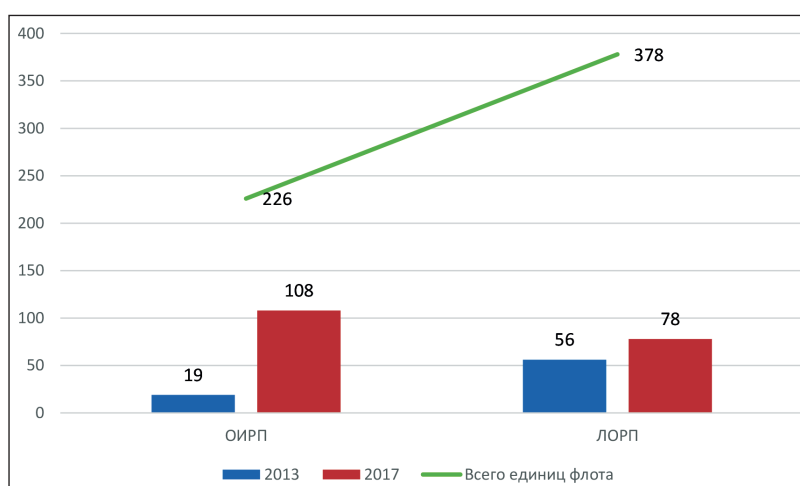


Рис. 6. Количество судов и общее количество единиц флота Обь-Иртышского пароходства и Ленского объединенного речного пароходства в период плавания в зоне СМП в течение 2013 и 2017 гг.

На основании полученных результатов можно определить, что в 2019 г. сохранится тенденция к увеличению доли судов смешанного *река – море* плавания в Арктике. В ходе исследования были обнаружены такие проблемы, как низкая гидрографическая и гидрологическая изученность районов ВВП на подходах к СМП, неразвитая система ограждения средствами навигационного оборудования и отсутствие теории транспортных потоков для таких судов в арктических районах.

Выводы (Summary)

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. В течение последних пяти лет наблюдается увеличение количества заявлений о разрешении плавания в Арктической зоне, поступающих в Администрацию Северного морского пути от организаций внутреннего водного транспорта.
2. Имеется резерв увеличения доли объема грузоперевозок на речных судах в общем объеме морских грузоперевозок СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов Г. П. Судоходство в Арктике и государственная программа развития судостроения в РФ на 2015–2030 гг. / Г. П. Евдокимов, Н. А. Высоцкая // Морской сборник. — 2014. — Т. 2006. — № 5. — С. 54–59.
2. Белая книга по эффективному и устойчивому внутреннему водному транспорту в Европе. — Нью-Йорк. Женева: ЕЭК ООН, Комитет по внутреннему транспорту, 2011. — 76 с.
3. Гранберг А. Г. Проблемы Северного морского пути / А. Г. Гранберг, В. И. Пересыпкин. — М.: Наука, 2006. — 581 с.
4. Щербанин Ю. А. Перевозка грузов по внутренним водным путям России: стратегия развития до 2030 года (новые возможности для нефтегазового сектора) / Ю. А. Щербанин // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. — 2016. — Т. 14. — С. 291–301.
5. Агаркова С. А. Модернизация морского образования: военно-морской и региональный аспекты / С. А. Агаркова, Л. В. Геращенко // Национальные интересы России и экономика морских коммуникаций в Арктике: Материалы V Всероссийской морской научно-практической конференции. — МГТУ, 2014. — С. 7–11.
6. Александров В. Л. О реализации программы строительства кораблей и судов на 2013–2030 гг. / В. Л. Александров // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 7–8.
7. Дворко О. И. О проблемах развития водного транспорта в арктических районах Якутии / О. И. Дворко // Наука и техника в Якутии. — 2007. — № 2 (13). — С. 11–14.
8. Заостровских Е. А. Состояние и перспективы развития внутреннего водного транспорта дальнего востока России / Е. А. Заостровских // Регионалистика. — 2017. — Т. 4. — № 3. — С. 35–47.
9. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судостроения, 2018. — Ч. 1: Классификация. — 69 с.
10. Шамахов В. А. Критические факторы окружающей среды в стратегии развития Арктической зоны / В. А. Шамахов, А. П. Исаев, В. В. Яновский // Управленческое консультирование. — 2018. — № 3 (111). — С. 28–40. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-3-28-40.
11. Лаврентьев А. В. Опыт реформирования морского транспорта на Дальнем Востоке России: некоторые аспекты социально-экономической безопасности / А. В. Лаврентьев, Л. М. Медведева // Ойкумена. Регионоведческие исследования. — 2014. — № 2 (29). — С. 30–41.

PERFERENCES

1. Evdokimov, G. P., and N. A. Vysotskaya. “Sudokhodstvo v Arktike i gosudarstvennaya programma razvitiya sudo-stroeniya v RF na 2015-2030 gg.” *Morskoi sbornik* 2006.5 (2014): 54–59.
2. *Belaya kniga po effektivnomu i ustoichivomu vnutrennemu vodnomu transportu v Evrope*. N’yu-Iork. Zheneva: EEK OON, Komitet po vnutrennemu transportu, 2011.
3. Granberg, A. G., and V. I. Peresypkin. *Problemy Severnogo morskogo puti*. M.: Nauka, 2006.
4. Shcherbanin, Y. A. “Cargo Transportation on the Russia’s Internal Waterways: Development Strategy up to 2030 (New Possibilities for Oil and Gas Sector).” *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaistvennogo prognozirovaniya RAN* 14 (2016): 291–301.
5. Agarkova, S. A., and L. V. Gerashchenko. “Modernizatsiya morskogo obrazovaniya: voenno-morskoi i regional’nyi aspekty.” *Natsional’nye interesy Rossii i ekonomika morskikh kommunikatsii v Arktike: Materialy V Vserossiiskoi morskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Murmanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. 7–11.
6. Aleksandrov, V. L. “O realizatsii programmy stroitel’sstva korablei i sudov na 2013-2030 gg.” *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 7–8.
7. Dvorko, O. I. “O problemakh razvitiya vodnogo transporta v arkticheskikh raionakh Yakutii.” *Nauka i tekhnika v Yakutii* 2(13) (2007): 11–14.
8. Zaostrovskikh, Elena Anatolyevna. “The State and Prospects of Development of Inland Waterway Transport of the Russian Far East.” *Regionalistika* 4.3 (2017): 35–47.
9. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast’ 1. Klassifikatsiya*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.

10. Shamakhov, V. A., A. P. Isaev, V. V. Yanovskiy. "Critical Environmental Factors in the Arctic Development Strategy." *Administrative Consulting* 3(111) (2018): 28–40. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-3-28-40.

11. Lavrentev, A. V., and L. M. Medvedeva. "The experience of reforming maritime transport in the Far East of Russia: some aspects of socio-economic security." *Ojkumena. Regional Researches* 2(29) (2014): 30–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дегтева Полина Валерьевна — аспирант
Научный руководитель:
Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: lin.dave@yandex.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Degteva, Polina V. — Postgraduate
Supervisor:
Tezikov, Aleksandr L —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: lin.dave@yandex.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.

Received: January 29, 2019.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-284-295

SUBSEA SURVEY TECHNOLOGY OF ABANDONED EXPLORATORY WELLS ON THE EXAMPLE OF THE DOLGINSKY OIL FIELD

G. I. Khurmatova¹, I. V. Zudin^{2,3}, N. V. Shabalin¹

¹ — Limited Liability Company «Lomonosov Moscow State University Marine Research Center», Moscow, Russian Federation

² — Limited Liability Company « Gazprom Neft Shelf », St. Petersburg, Russian Federation

³ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Development of hydrocarbon deposits on the Arctic coasts and offshore territory is an important and relevant direction of the Oil & Gas industry. A large number of exploratory wells of various types have been drilled in the Russian waters. Some of them were subsequently eliminated or canned. In this regard, one of the most urgent tasks is to study the state of canned or abandoned wells, aimed at ensuring industrial safety, the protection of the subsoil and the environment. In accordance with the requirements of license obligations and regulatory documents of the Russian Federation, it is necessary to monitor the state of liquidated and canned exploratory wells in order to obtain the information on the presence or absence of hydrocarbon leaks from the wells, intercolumn manifestations, griffins, extraneous man-made objects, as well as to assess the background level of the environment state in the area of the wells orifices. The methodology and the main results of the survey of the orifices of liquidated exploratory wells at the Dolginsky oil field located on the continental shelf of the Barents Sea to ensure the industrial safety, protection of the subsoil and the environment of studied region are discussed in the paper. The methodology of the work, which includes navigation and hydrographic support of the work (sonar and magnetometric survey of the seabed), and the main technical parameters of the ship's instrumentation complex are described. The complex of underwater technical works including a visual inspection of the seabed using a remotely operated underwater vehicle, geoecological testing of environmental components, as well as hydrometeorological studies (determination of hydrochemical indicators of the sea water state, indicators of contamination and physico-chemical parameters of bottom sediments, qualitative and quantitative characteristics of hydrobionts, hydrological observations) is also considered. It is noted that the use of the technologies of underwater survey of abandoned exploratory wells at the example of the Dolginsky oil field allows us to effectively solve the tasks in order to prevent and minimize the consequences of possible natural and man-made disasters.

Keywords: wells survey, underwater survey, GVI survey, abandoned and canned wells, geo-ecology, subsea positioning, side scan sonar, magnetometric survey, remotely operated underwater vehicle.

For citation:

Khurmatova, Gulnara I., Ivan V. Zudin, and Nikolay V. Shabalin. "Subsea survey technology of abandoned exploratory wells on the example of the Dolginsky oil field." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 284–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-284-295.

УДК 626.021

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДВОДНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ УСТЬЕВ РАЗВЕДОЧНЫХ ЛИКВИДИРОВАННЫХ СКВАЖИН НА ПРИМЕРЕ ДОЛГИНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Г. И. Хурматова¹, И. В. Зудин^{2,3}, Н. В. Шабалин¹

¹ — ООО «Центр морских исследований МГУ имени М. В. Ломоносова», Москва, Российская Федерация

² — ООО «Газпром-нефть шельф», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Освоение месторождений углеводородного сырья на арктических побережьях и континентальном шельфе является важным и актуальным направлением нефтегазовой отрасли. На акватории России пробурено большое количество разведочных скважин разного типа. Часть разведочных скважин впоследствии была ликвидирована или консервирована. В связи с этим одной из наиболее актуальных задач являются исследования состояния законсервированных или ликвидированных скважин, направленные на обеспечение промышленной безопасности объекта, охраны недр и окружающей среды. В соответствии с требованиями лицензионных обязательств и нормативных документов Российской Федерации необходимо вести контроль за состоянием ликвидированных и законсервированных устьев разведочных скважин с целью получения информации о наличии или отсутствии: утечек углеводородов из устьев скважин, межколонных проявлений, грифонов, посторонних техногенных предметов, а также производить оценку фоновому уровню состояния окружающей среды в районе расположения устьев скважин. В статье рассматривается методика и основные результаты комплекса работ по обследованию устьев ликвидированных разведочных скважин на Долгинском нефтяном месторождении, расположенном на континентальном шельфе Баренцева моря, с целью обеспечения промышленной безопасности объекта, охраны недр и окружающей среды исследуемого региона. Описывается методика проведения работ, включающая в себя навигационно-гидрографическое обеспечение работ (гидролокационная и магнитометрическая съемка морского дна) и основные технические параметры судового приборного комплекса. Рассмотрен также комплекс подводно-технических работ, включающий визуальный осмотр дна с помощью телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, экологическое опробование компонентов природной среды, а также гидрометеорологические исследования (определение гидрохимических показателей состояния морских вод, показателей загрязненности и физико-химических параметров донных отложений, качественных и количественных характеристик гидробионтов, гидрологические наблюдения). Отмечается, что использование данных технологий подводного обследования ликвидированных устьев разведочных скважин на примере Долгинского нефтяного месторождения позволяет эффективно решать поставленные задачи с целью предупреждения и минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф.

Ключевые слова: обследование устьев скважин, подводное обследование, ликвидированные и законсервированные скважины, геоэкология, подводная навигация, гидролокационная и магнитометрическая съемка, телеуправляемый подводный аппарат.

Для цитирования:

Хурматова Г. И. Технология подводного обследования устьев разведочных ликвидированных скважин на примере Долгинского нефтяного месторождения / Г. И. Хурматова, И. В. Зудин, Н. В. Шабалин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 284–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-284-295.

Введение (Introduction)

Арктический шельф представляет собой уникальную кладовую природных ресурсов. Для разведки нефтегазовых месторождений и оценки запасов бурятся специальные разведочные скважины. Бурение разведочных скважин, как правило, выполняется с самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ), полупогружных буровых установок (ППБУ), а также буровых судов (БС). После выполнения поставленных задач данные скважины консервируют либо ликвидируют. Недропользователь, в соответствии с требованиями лицензионных обязательств и нормативных документов РФ, обязан вести контроль за состоянием ликвидированных и законсервированных разведочных скважин. Обследования должны выполняться не реже одного раза в год (для скважин, законсервированных в процессе бурения, после окончания бурения и в процессе эксплуатации, если в них установлены цементные мосты) и одного раза в два года (для скважин, ликвидированных после окончания бурения)^{1,2}.

Результаты подводного обследования скважин содержат информацию о наличии или отсутствии утечек углеводородов в районе устьев скважин, а также наличии или отсутствии посторонних

¹ Приказ Ростехнадзора от 12.03.2013 № 101 (ред. от 12.01.2015) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности”». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146173/ (дата обращения: 01.02.2019).

² Приказ Ростехнадзора от 18.03.2014 № 105 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности морских объектов нефтегазового комплекса”» (зарегистр. в Минюсте России 17.09.2014 № 34077). Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169076/ (дата обращения: 01.02.2019).

техногенных предметов, представляющих опасность для судоходства. Для получения данной информации, как правило, выполняется визуальное обследование скважин, видео- и акустическая фиксация рельефа участков дна акватории в месте расположения разведочных скважин. Указанные работы могут выполняться как с использованием водолазной службы, так и с помощью необитаемых подводных аппаратов (НПА) [1], которые активно применяются при обустройстве морских нефтегазовых месторождений [2]. Следует отметить, что поскольку на глубинах свыше 30 м использование водолазных специалистов перестает быть коммерчески и технически обоснованным [3], возникает задача о правильности выбора НПА исходя из условий окружающей среды и поставленных задач. Существует классификация подводных аппаратов, приведенная в Международном стандарте IMCA R 018 [4], а также русском нормативном документе ГОСТ Р 56960–2016. Необитаемые аппараты, в первую очередь, подразделяются на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), которые посредством кабель-троса получают электропитание и сигналы управления, и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), функционирующие самостоятельно и способные перемещаться, погружаться и всплывать самостоятельно по заданной программе или по командам телеметрии [5]. Обследование устьев скважин следует выполнять с помощью ТНПА осмотрового класса, способного при необходимости нести целевую полезную нагрузку. Дополнительно аппарат может быть оснащен осмотровым модулем, модулем очистки подводных объектов, средствами отбора проб донных осадков, придонной воды и газов [6].

Важной частью комплекса выполняемых работ при подводном обследовании является оценка изменения состояния окружающей среды (уровня загрязнения воды и донных отложений в районе устья разведочной скважины) по отношению к исходному состоянию водного объекта до начала хозяйственной деятельности. Исследование природных процессов в экосистемах осуществляется методами мониторинга. Технология мониторинга определяет качество получаемых им данных, а также их экологическую значимость [7], [8]. Для этого выполняются следующие виды работ:

- инженерно-экологические работы: отбор проб воды, грунта и газа (в случае обнаружения утечек на участке расположения скважины), а также их специализированный лабораторный анализ;
- инженерно-гидрометеорологические работы: измерение температуры и солености вод, скорости и направления течений, прозрачности морской воды и т. д.

В случае отсутствия точной информации о местоположении скважин необходимо выполнить их поиск и последующую планово-высотную привязку. Это связано с тем, что многие скважины были пробурены несколько десятилетий тому назад, при этом общий уровень геодезического обеспечения в то время не позволял определять координаты этих объектов с необходимой точностью. Также известны случаи, когда определение координат скважин ранее выполнялось с применением различного оборудования и методик, в результате чего появлялась неоднозначность в координатах местоположения скважины. Таким образом, вопрос поиска и определения координат ранее заглушенных скважин приобретает особое значение [9]. При поиске скважин могут быть применены следующие технологии:

- батиметрическая съемка с применением многолучевого эхолота (МЛЭ);
- гидролокационная съемка с применением гидролокатора бокового обзора (ГБО);
- магнитометрическая съемка.

При консервации скважин, как правило, остается устьевое оборудование, выступающее над морским дном, в то время как при их ликвидации скважины полностью срезаются на уровне дна или ниже. В случае наличия на поверхности дна следов скважины наиболее эффективными методами определения ее положения будут являться батиметрическая съемка с применением МЛЭ и гидролокационная съемка с применением ГБО, при этом батиметрическая съемка обеспечивает наиболее точное определение планово-высотных координат скважин. В случае, если устье скважины занесено грунтом и на поверхности дна отсутствуют какие-либо следы ее наличия, положение скважины определяется при помощи магнитометрической съемки. Магнитометрическая съемка широко применяется при поиске каких-либо металлических объектов на морском дне, в частности при поиске взрывоопасных предметов, оставшихся со времен Великой Отечественной войны [10].

В данной работе рассмотрена методика и результаты обследования устьев разведочных скважин на Долгинском нефтяном месторождении, выполненных ООО «Центр морских исследований МГУ имени М. В. Ломоносова», (ЦМИ МГУ) в августе 2018 г. для нужд ООО «Газпром нефть шельф». Долгинское нефтяное месторождение расположено в юго-восточной части континентального шельфа Баренцева моря, в 120 км к югу от архипелага Новая Земля и в 110 км к северу от материка. Месторождение было открыто в 1999 г., глубина моря в этом районе составляет 35–55 м. В настоящее время на месторождении пробурено четыре разведочных скважины, три из которых находятся в северной части месторождения и одна в южной. Схема расположения разведочных скважин Долгинского нефтяного месторождения представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расположения разведочных скважин Долгинского нефтяного месторождения

Целью работы являлся сбор и оценка информации о состоянии ликвидированных устьев разведочных скважин:

- наличие или отсутствие утечек углеводородов в районе устьев разведочных скважин;
- наличие или отсутствие посторонних предметов на морском дне в районе устьев разведочных скважин;
- оценка состояния уровня загрязнения воды и донных отложений, отобранных в районе устьев разведочных скважин;
- уточнение местоположения устьев разведочных скважин.

Для получения соответствующей информации были выполнены следующие работы:

- локализация устьев ликвидированных скважин геофизическими методами (магнитометрическая и гидролокационная съемка);
- подводное визуальное обследование скважин;
- инженерно-экологические работы;
- инженерно-гидрометеорологические работы¹.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Навигационно-гидрографическое обеспечение работ. Одной из основных задач навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) проводимых работ являлись обнаружение и идентификация скважин в районах указанных координат.

¹ Технический отчет по проекту «Выполнение геотехнических работ на Долгинском нефтяном месторождении». М.: ООО «ЦМИ МГУ», 2018.

Как показывает опыт предыдущих работ, эффективное обнаружение законсервированных и во многих случаях погребенных под слоем осадков устьев скважин возможно по следующим классификационным признакам:

- наличие на дне очевидно выраженных следов проведения бурения буровых и консервационных работ (возвышение приустьевого оборудования над дном моря, следы установки защитного бетонного каркаса на устье и др.);
- локальное изменение морского дна в районе выхода скважины в виде углубления (кратера) или небольшого холма, образовавшегося при заносе устья скважины осадками;
- локальное нарушение структуры поддонного слоя осадков, образовавшееся в процессе проведения бурения;
- газопроявление, образовавшееся в результате некачественного проведения ликвидационных работ;
- локальная магнитная аномалия за счет оставшихся в скважине металлических конструкций;
- возможные изменения в химическом составе проб воды и донных осадков;
- наличие в районе расположения устья скважины конструкций и техногенных объектов.

Для обнаружения и идентификации скважин на Долгинском нефтяном месторождении в местах расположения устьев скважин, принятых по материалам предыдущих обследований, проводились обследования морского дна дистанционными методами, включающими:

- гидролокационную съемку дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора (ИГБО) модели Н4i3 (частота 300 кГц);
- магнитометрическую съемку морским магнитометром SEAPOS-1 (рис. 2).

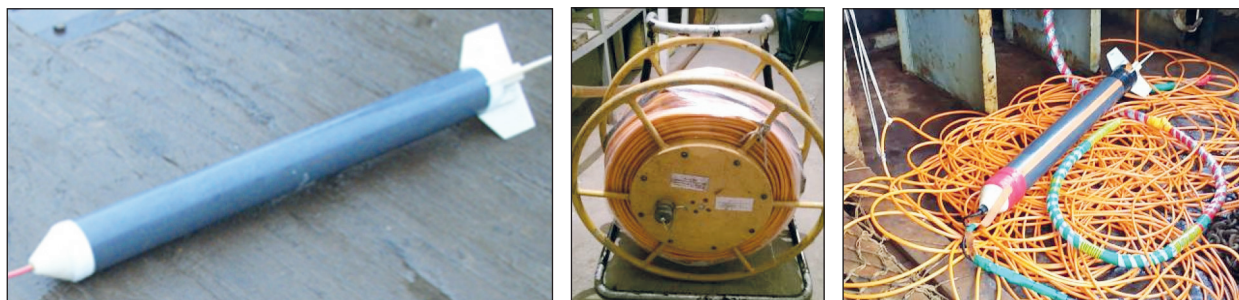


Рис. 2. Морской магнитометр SEAPOS-1

Гидролокационная съемка выполнялась с борта исследовательского судна. Интерферометрический гидролокатор бокового обзора был закреплен на штанге, расположенной по правому борту исследовательского судна, длина штанги составила 6 м, прибор был заглублен на 2,5 м от уровня моря. Параметры регистрации, выбранные для ИГБО Н4i3, приведены в таблице. (Работы проводились при скорости судна 3–5 уз).

Параметры регистрации гидролокатором бокового обзора

Параметр	Значение
Рабочая частота, кГц	300
Наклонная дальность, м	120
Формат записи данных	.HSX

Магнитометрическая съемка выполнялась подводным буксируемым магнитометром. Крепление буксирного конца кабеля осуществлялось в корме по центру. В результате выполнения опытно методических работ был выработан скоростной режим и высота буксирования подводного аппарата надо дном при оптимальном удалении от кормы судна, составляющем не менее трех длин корпуса судна, вычислено отстояние буксируемого аппарата от точки подвеса. При длине вытравленного троса, равной 135 м, отстояние составило 128 м. Пересчет координат буксируемой гондолы магнитометра производился программным пакетом QINSy 8.1.

Подводно-технические работы. По результатам гидролокационной и магнитометрической съемки были определены места предположительного расположения устьев скважин, в которых был выполнен визуальный осмотр при помощи ТНПА RB Mirage Mini фирмы «ROVBUILDER». Высокоточное позиционирование судна и ТНПА осуществлялось в режиме реального времени в электронной гидрографической информационной системе QINSy 8.1 при помощи спутникового навигационного комплекса GNSS C-NAV 3050, гироскопа Meridian SGBrown и гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой (ГАНС УКБ) Tritech Micron MicroNav.

В период проведения работ приемником C-NAV 3050 осуществлялся прием спутниковых дифференциальных поправок через геостационарные спутники Inmarsat, обеспечивающие дециметровую точность позиционирования судна. Гидроакустические навигационные системы, предназначенные для позиционирования объектов в водной толще, разделяют следующим образом: по принципу действия на системы с длинной базой (ГАНС ДБ) и по принципу действия системы с ультракороткой базой (ГАНС УКБ). Эти системы составляют основу навигационных комплексов подавляющего числа автономных и телеуправляемых аппаратов, созданных в различное время в различных странах [10].

Позиционирование ТНПА в данной работе выполнялось при помощи ГАНС УКБ «Tritech Micron MicroNav». Эта система состоит из приемоизлучающей антенны, расположенной на судне и маяка-ответчика, закрепленного на ТНПА. Маяк-ответчик — это преобразователь на судне, излучающий направленный акустический импульс, который достигая маяка, служит запускающим сигналом к излучению, маяк генерирует акустическую посылку, которую фиксирует судовая гидроакустическая антенна. Ввиду расширения диаграммы направленности и продолжительного распространения сигнала, данный способ предназначен для небольших наклонных дальностей [12]. Приемоизлучающая антенна при помощи акустических сигналов определяет пеленг и дистанцию до маяка-ответчика, после чего в программном обеспечении происходит расчет геодезических координат ТНПА относительно судна. Для повышения точности подводного позиционирования перед началом работ в районе расположения скважин выполнялись измерения скорости распространения звука в воде. Результатом данных измерений является график зависимости скорости звука от глубины, который учитывается в программном обеспечении ГАНС УКБ при расчете траектории акустического луча [13]. Наличие навигационных данных о координатах ТНПА на поверхности и в толще воды позволяет автоматизировать режимы движения аппарата к цели с известными географическими координатами [14], [15]. Использование данной технологии для подводного позиционирования объектов имеет широкое применение.

Процедура визуального обследования скважины заключалась в локализации и осмотре устья скважины, после чего выполнялось обследование прилегающей части дна на наличие посторонних объектов и газопроявлений в радиусе не менее 20 м от устья. Изображения с цифровых камер ТНПА приведены на рис. 3.

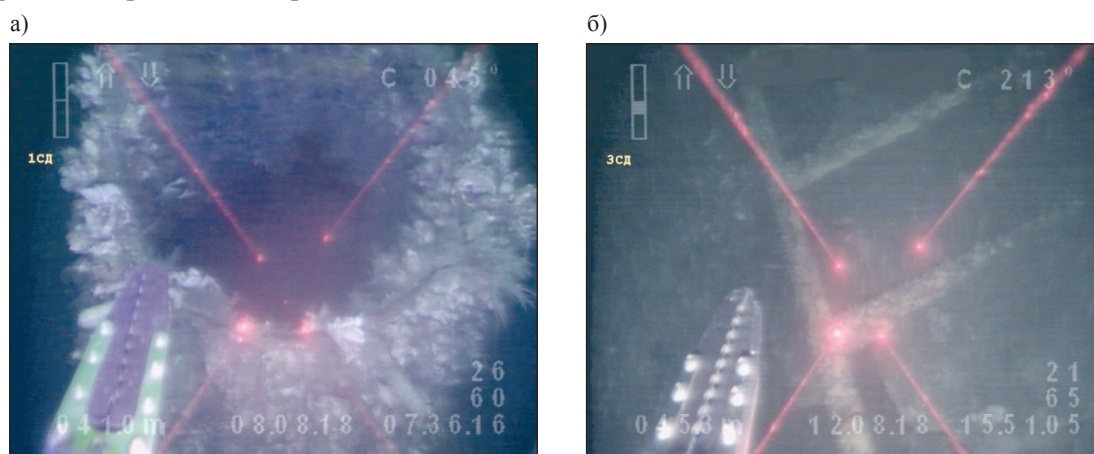


Рис. 3. Устьевое оборудование скважины (а) и металлическая конструкция в районе обследования устья скважины (б)

Пилотирование ТНПА осуществлялось по системе параллельных галсов, расстояние между которыми зависело от прямой видимости под водой и выбиралось таким образом, чтобы обеспечить полное визуальное покрытие площади обследования. Установленный на ТНПА гидролокатор кругового обзора способствовал поиску объектов на морском дне. Траектория движения ТНПА во время работ в режиме реального времени контролировалась в электронной гидрографической информационной системе QINSy, тем самым помогая оператору ориентировать ТНПА относительно судна и подводных целей.

Экологическое опробование компонентов природной среды и гидрометеорологические исследования. Для оценки изменения состояния окружающей среды в районе расположения разведочных скважин были выполнены следующие виды работ:

1. Определение гидрохимических показателей состояния морских вод с последующим анализом в судовой лаборатории и специализированной стационарной лаборатории. Пробы морской воды отбирались пластиковыми батометрами Нискина с двух горизонтов: поверхностного и придонного. Отбор, консервация и хранение проб воды осуществлялись в соответствии с документом¹, а также рекомендациями аккредитованной лаборатории.

2. Определение показателей загрязненности и физико-химических параметров донных отложений с последующим их анализом в специализированной стационарной лаборатории.

3. Пробы донных отложений на определение содержания загрязняющих веществ, радионуклидов и физико-химических характеристик отбирались на каждой станции мониторинга из поверхностного слоя осадков при помощи дночерпателя «Океан-0,1» производства ООО «Арктиктрал» в соответствии с требованиями документов (РД 52.10.803-2013, РД 52.10.775-2013, ГОСТ 17.1.5.01-80, ред. от 01.03.1981 и ISO 5667-12:2017).

4. Определение качественных и количественных характеристик макрозообентоса, фитопланктона и фотосинтетических пигментов, а также зоопланктона.

5. Отбор проб гидробионтов был выполнен дночерпателем, системой батометров и планктонных сетей. Пробы были зафиксированы и переданы для обработки в стационарную гидробиологическую лабораторию ООО «ЦМИ МГУ» для последующего анализа.

6. Гидрологические наблюдения, включающие измерение температуры и солености вод, скорости и направления течений, прозрачности морской воды.

7. Измерение температуры и солености вод в исследуемой акватории выполнялось при помощи зонда YSI CastAway-CTD. Исследование скорости и направления течений проводилось при помощи акустического доплеровского профилографа измерителя течений TRDI WHS 300. Для измерения прозрачности морской воды использовался диск Секки.

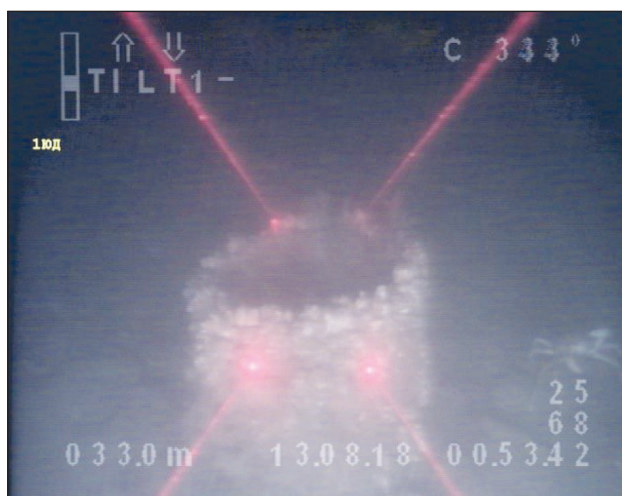
Результаты (Results)

На основе результатов выполненных работ можно сделать следующие выводы. Применение гидролокационной и магнитометрической съемки являются эффективными методами для локализации скважин. По данным магнитометрической съемки хорошо прослеживаются магнитные аномалии на всех участках, подтверждающие наличие ликвидированных скважин на данных территориях. По результатам гидролокационного обследования на сонограмме одной из скважин видна аномалия, являющаяся устьевым оборудованием скважины (см. рис. 4, б).

На сонограммах остальных скважин можно заметить следы бетонных конструкций, образовавшихся в ходе ликвидационных работ, которые отчетливо выделяются за счет наиболее интенсивного отражения акустического сигнала по сравнению с песчаным дном (рис. 5). По результатам гидролокационной съемки в районах скважин были обнаружены посторонние объекты, которые были обследованы с помощью ТНПА.

¹ ГОСТ 31861-2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2013. 32 с.

а)



б)



Рис. 4. Изображения металлической трубы, полученные с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (а) и интерферометрического гидролокатора бокового обзора (б)

В рамках проведения гидролокационного обследования были собраны сонограммы общей протяженностью 27593,5 м. Во время обработки данных были обнаружены и подавлены артефакты записи, связанные с отсутствием корректных координат в полевых сонограммах, с различной частотой дискретизации каналов левого и правого борта ИГБО под влиянием погодных условий.

Также была проведена оценка точности позиционирования приемно-излучаемой антенны и составлен каталог объектов ИГБО¹.

Подводное визуальное обследование ТНПА выполнялось в местах расположения устьев скважин, выявленных по результатам гидролокационной и магнитометрической съемок. Устьевое оборудование визуально было найдено и обследовано только на одной из скважин, в остальных местах были обнаружены бетонные плиты, под которыми находятся устья ликвидированных скважин. Магнитные аномалии, которые четко прослеживаются в данных местах, подтверждают эту информацию.

В результате проведенной гидромагнитной съемки на четырех полигонах и предварительной полевой обработки данных построены карты полного магнитного поля. Визуально по оценке максимумов значений полного магнитного поля на каждой площадке получены координаты крупных ферромагнитных объектов, приуроченных к устьям пробуренных ранее скважин. В процессе камеральной обработки магнитометрических и навигационных данных по-

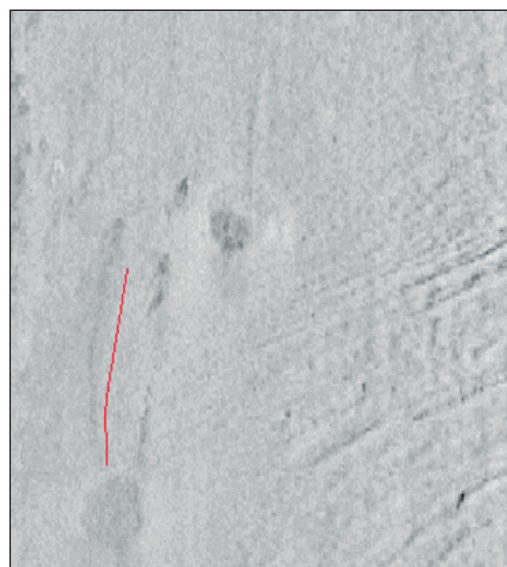


Рис. 5. Линейный техногенный объект и два изометричных объекта, выделенные по данным интерферометрического гидролокатора бокового обзора

строены карты аномального магнитного поля масштаба 1:1000, уточнены координаты обнаруженных ранее объектов. Карта изодинам полного магнитного поля на площадке одной из скважин приведена на рис. 6.

¹ Технический отчет по проекту «Выполнение геотехнических работ на Долгинском нефтяном месторождении». М.: ООО «ЦМИ МГУ», 2018.

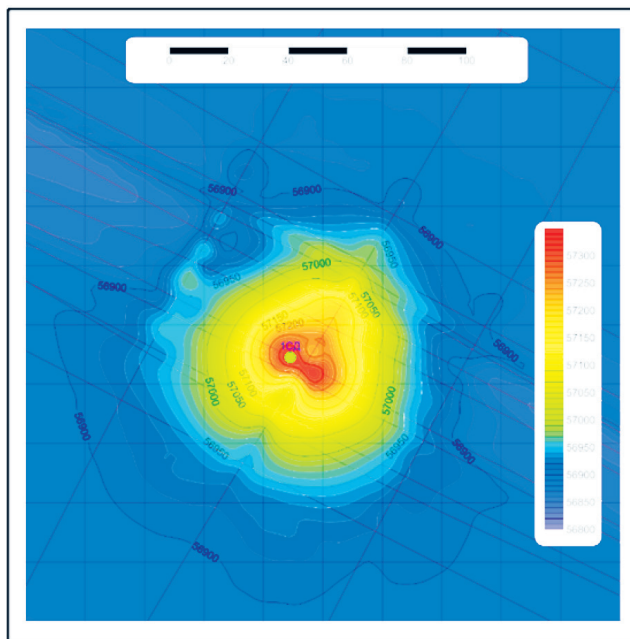


Рис. 6. Карта изодинам полного магнитного поля на площадке одной из скважин

Результаты выполненных инженерно-экологических работ показывают, что гидрохимическое состояние морских вод по всем изученным показателям в совокупности соответствует характерному для исследуемого района состоянию экосистемы в конце календарного лета. Исследования показали в целом низкий уровень загрязнения вод тяжелыми металлами. Определение показателей загрязненности и физико-химических параметров донных отложений соответствует типичному распределению литологических типов донных отложений в данной акватории. Концентрации всех основных исследованных загрязняющих веществ органического происхождения также не превысили международных нормативов. Содержание метана во всех пробах было ниже предела обнаружения. Результаты мониторинга показателей состояния фитопланктона, зоопланктона и зообентоса показали допустимую норму, характерную для исследуемой акватории. Отклонений относительно данных предыдущих исследований не обнаружено. Газопроявлений в районе устьев разведочных скважин не выявлено.

Заключение (Conclusion)

В статье описана методика и представлены основные результаты комплекса работ по обследованию устьев ликвидированных скважин. В связи с имеющимися ограничениями и трудностями выполнения данных работ, связанными с местоположением скважин и природно-климатическими условиями региона, использование данной технологии подводного обследования ликвидированных устьев разведочных скважин на примере Долгинского нефтяного месторождения позволяет решать поставленные задачи с целью предупреждения и минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф.

Благодаря результатам, полученным в ходе выполненных работ на Долгинском нефтяном месторождении, удалось в полной мере получить всю необходимую информацию для обеспечения рационального и экологически безопасного природопользования, так как чувствительная экосистема северных морей предписывает необходимость грамотного, комплексного и точного экологического сопровождения деятельности нефтегазового комплекса на шельфе.

Сочетание дистанционных площадных методов, точечных данных пробоотбора и видеосъемки дали возможность выполнить комплексный пространственный анализ морского дна в районе расположения устьев скважин. Используемые технологии, основанные на геофизических методах,

позволили эффективно и достоверно определить местоположение скважин, состояние близлежащей части акватории на предмет техногенного воздействия, а также состояние самих устьев скважин. Таким образом, практическая значимость результатов представленных исследований заключается в том, что они создают основу практически-ориентированного инструментария для оценки рисков при планировании деятельности нефтегазового комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paulin M.* The Evolution of Design Tools for Arctic Subsea Pipelines / M. Paulin, J. Caines // Arctic Technology Conference. — Offshore Technology Conference, 2016. DOI: 10.4043/27374-MS.
2. *Shukla A.* Application of robotics in offshore oil and gas industry — A review Part II / A. Shukla, H. Karki // Robotics and Autonomous Systems. — 2016. — Vol. 75. — Pp. 508–524. DOI:10.1016/j.robot.2015.09.013.
3. *Шматков А. Г.* Применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов при проведении инженерно-геологических изысканиях: стандартная практика и инновации / А. Г. Шматков, А. А. Шматков // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии: труды Международной геолого-геофизической конференции. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. — С. 777–779.
4. Capabilities and Uses of Sensor and Video-Equipped Waterborne Surveillance-ROVs for Subsea Detection and Tracking of Oil Spills. — IOGP-IPIECA Oil Spill Response Joint Industry Project Surveillance, Modelling & Visualization. Work Package 1: In Water Surveillance, 2016. — 89 p.
5. In-water surveillance of oil spills at sea. Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 550. — IPIECA-IOGP, 2016.
6. *Казанин А. Г.* Инновационные технологии при выполнении инженерно-геологических работ на арктическом шельфе России / А. Г. Казанин [и др.] // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 10. — С. 21–24.
7. *Гудимов А. В.* Современный экологический мониторинг и многоуровневая биоиндикация: новые методы исследования состояния морской среды / А. В. Гудимов, В. С. Свити́на, А. И. Бурдыгин, Е. П. Комарова // Загрязнение морской среды: экологический мониторинг, биоиндикация, нормирование: сб. ст. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 125-летию проф. В. А. Водяницкого. — Севастополь: Колорит, 2018. — С. 83–89.
8. *Агарков С. А.* Экологический мониторинг среды обитания регионального морского пространства Арктики / С. А. Агарков, С. Ю. Козьменко, А. Н. Савельев // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. — 2018. — № 6 (114). — С. 82–89.
9. *Дмитриевский Н. Н.* Применение высокоразрешающей гидроакустики для определения положения заглушенных подводных скважин / Н. Н. Дмитриевский [и др.] // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 7. — С. 109–115.
10. *Munschy M.* Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation / M. Munschy, D. Boulanger, P. Ulrich, M. Bouiflane // Journal of Applied Geophysics. — 2007. — Vol. 61. — Is. 3–4. — Pp. 168–183. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.
11. *Инзарцев А. В.* Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А. В. Инзарцев, Л. В. Киселёв, В. В. Костенко, Ю. В. Матвиенко, А. М. Павин, А. Ф. Щербатюк. — Владивосток: ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. — 368 с.
12. *Барашок П. И.* Современные способы обследования морского дна для обнаружения и устранения взрывоопасных объектов до строительства трубопровода / П. И. Барашок, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
13. *Sun D.* Sound velocity correction based on effective sound velocity for underwater acoustic positioning systems / D. Sun, H. Li, C. Zheng, X. Li // Applied Acoustics. — 2019. — Vol. 151. — Pp. 55–62. DOI:10.1016/j.apacoust.2019.02.027.
14. *Ваулин Ю. В.* Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата / Ю. В. Ваулин, В. В. Костенко, А. М. Павин // Подводные исследования и робототехника. — 2013. — № 2 (16). — С. 4–15.
15. *Борейко А. А.* Навигационное и алгоритмическое обеспечение комплекса АНПА-ТНПА при решении задач мониторинга донной поверхности / А. А. Борейко [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — № 3 (152). — С. 112–127.

REFERENCES

1. Paulin, Mike, and Jonathan Caines. "The Evolution of Design Tools for Arctic Subsea Pipelines." *Arctic Technology Conference*. Offshore Technology Conference, 2016. DOI: 10.4043/27374-MS.
2. Shukla, Amit, and Hamad Karki. "Application of robotics in offshore oil and gas industry—A review Part II." *Robotics and Autonomous Systems* 75 (2016): 508–524. DOI:10.1016/j.robot.2015.09.013.
3. Shmatkov, A. G., and A. A. Shmatkov. "Primenenie teleupravlyaemykh neobitaemykh podvodnykh apparatov pri provedenii inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh: standartnaya praktika i innovatsii." *GeoEvraziya 2018. Sovremennye metody izucheniya i osvoeniya nedr Evrazii: Trudy Mezhdunarodnoi geologo-geofizicheskoi konferentsii*. Tver': OOO «PoliPRESS», 2018. 777–779.
4. *Capabilities and Uses of Sensor and Video-Equipped Waterborne Surveillance-ROVs for Subsea Detection and Tracking of Oil Spills*. IOGP-IPIECA Oil Spill Response Joint Industry Project Surveillance, Modelling & Visualization. Work Package 1: In Water Surveillance, 2016.
5. *In-water surveillance of oil spills at sea. Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP)*. IOGP Report 550. IPIECA-IOGP, 2016.
6. Kazanin, A. G., G. S. Kazanin, G. I. Ivanov, M. V. Sarkisyan, and V. E. Morozov. "Innovative technologies in the implementation of engineering and geological work on the Arctic shelf of Russia." *Prospect and protection of mineral resources* 10 (2017): 21–24.
7. Gudimov, A. V., V. S. Svitina, A. I. Burdygin, and E. P. Komarova. "Current ecological monitoring and several biological levels of bioindicators: new methods of marine environment assessment." *Zagryaznenie morskoi sredy: ekologicheskii monitoring, bioindikatsiya, normirovanie: Sbornik statei Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 125-letiyu professora V.A. Vodyanitskogo*. Sevastopol': Kolorit, 2018. 83–89.
8. Agarkov, S. A., S. Yu. Kozmenko, and A. N. Savelyev. "Environmental monitoring of the arctic regional marine space environment." *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomicheskogo universiteta* 6(114) (2008): 82–89.
9. Dmitrevskiy, N. N., R. A. Ananov, A. A. Meluzov, N. V. Shabalin, and D. M. Remizova. "Application of the high resolution underwater acoustics for definition of position of the muffled underwater wells." *Advances in current natural sciences* 7 (2018): 109–115.
10. Munsch, Marc, Daniel Boulanger, Patrice Ulrich, and Mustapha Bouiflane. "Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation." *Journal of Applied Geophysics* 61.3-4 (2007): 168–183. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.
11. Inzartsev, A. V., L. V. Kiselev, V. V. Kostenko, Yu. V. Matvienko, A.M. Pavin, and A.F. Shcherbatyuk. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye*. Vladivostok: FGBUN In-t problem morskikh tekhnologii DVO RAN, 2018.
12. Barashok, Pavel Ivanovich, and Yuri Georgievich Firsov. "Modern methods of the seafloor investigations for the explosive objects detection before the pipeline construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralâ S.O. Makarova* 1(35) (2016): 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
13. Sun, Dajun, Haipeng Li, Cuie Zheng, and Xiang Li. "Sound velocity correction based on effective sound velocity for underwater acoustic positioning systems." *Applied Acoustics* 151 (2019): 55–62. DOI:10.1016/j.apacoust.2019.02.027.
14. Vaulin, Yu. V., V. V. Kostenko, and A. M. Pavin. "Features navigation and algorithmic support remote-controlled unmanned underwater vehicles." *Underwater Investigations and Robotics* 2(16) (2013): 4–15.
15. Boreiko, Aleksei Anatolyevich, Yuri Valentinovich Vaulin, Vladimir Vladimirovich Kostenko, Yuri Victorovich Matvienko, Denis Nikolaevich Mikhailov, and Alexandr Mikhailovich Pavin. "Navigation and algorithmic support AUV-ROV complex in solving problems monitoring bottom surface." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 3(152) (2014): 112–127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хурматова Гульнара Ильгизаровна —
специалист-эколог
ООО «Центр морских исследований МГУ
имени М. В. Ломоносова»
119234, Российская Федерация, Москва,
ул. Ленинские Горы, д. 1, стр.77
e-mail: khurmatova@marine-rc.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khurmatova, Gulnara I. —
Environmental Specialist
LLC «Lomonosov Moscow State University
Marine Research Center»
1-77, Leninskie Gory Str., Moscow, 119234,
Russian Federation
e-mail: khurmatova@marine-rc.ru

Зудин Иван Владимирович —

аспирант, ведущий инженер

Научный руководитель:

Фирсов Юрий Георгиевич —

кандидат технических наук

ООО «Газпром-нефть шельф»

197198, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

пер. Зоологический, д. 2-4, лит. Б

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: Zudin.hydro@gmail.com

Шабалин Николай Вячеславович —

исполнительный директор

ООО «Центр морских исследований МГУ

имени М. В. Ломоносова»

119234, Российская Федерация, Москва,

ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 77

e-mail: nikolai.shabalin@marine-rc.ru

Zudin, Ivan V. —

Postgraduate, Lead Engineer

Supervisor:

Firsov, Yurii G. —

PhD

LLC «Gazprom Neft Shelf»

2-4/B, Zoologicheskii Lane, St. Petersburg,

197198, Russian Federation

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: Zudin.hydro@gmail.com

Shabalin, Nikolay V. —

Executive Director

LLC «Lomonosov Moscow State University

Marine Research Center»

1-77, Leninskie Gory Str., Moscow, 119234,

Russian Federation

e-mail: nikolai.shabalin@marine-rc.ru

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

Received: February 6, 2019.

A PLANNING RATIONALE FOR CONDUCTING THE AREAL SURVEYS OF HIGH-LATITUDE ROUTES

E. O. Ol'khovik, A. B. Afonin, A. L. Tezikov

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

The hydrographic aspects of the development of high-latitude routes of the Northern Sea Route and the possibility of their use by large-tonnage vessels are discussed in the paper. The main data characterizing the volume of Arctic sea cargo transportation in 2018 are presented. The main trends of changes in the composition of the transport fleet, shipping regimes and the direction of transportation of hydrocarbons are noted. Attention is drawn to the great scientific and applied value of the operation experience in 2018 of large-tonnage vessels of the category of ice strengthening Arc7 in the Kara Sea in the year-round navigation mode. The list of the major scientific achievements includes the results of the study of the parameters of ships movement in the transition from the summer navigation period to the winter navigation period, the results of using the ship identification and geographic information systems for the study of marine traffic flows, as well as checking the feasibility of ice forecasts of different lead times in the Kara Sea. It is confirmed that in the Kara Sea the network of routes and the system of ensuring the navigation safety of large-tonnage vessels shipping are mainly formed. It is argued that in the near future the development of the Northern Sea Route will be associated with the formation of the marine transport infrastructure of the Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas, including a network of deep-sea routes in the Central and Eastern sector of the Arctic. The description of the main stages of hydrographic works in the Arctic Seas is given. The issue of features of hydrographic inspection of high-latitude routes and navigation on them of large-tonnage vessels is investigated. The formulas for calculating the vessel permissible deviation from the recommended route are given and studied. The confidence intervals of permissible deviations are established. The recommendations on the additional hydrographic survey of the separate sections of high-latitude routes are given. The directions of further research are determined.

Keywords: Northern Sea Route, high-latitude routes, survey bandwidth, lateral deviations, probability, confidence intervals, safety of navigation.

For citation:

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

УДК 528.47

ОБОСНОВАНИЕ ПЛАНА ПРОВЕДЕНИЯ ПЛОЩАДНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ МАРШРУТОВ

Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков

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

Статья посвящена исследованию гидрографических аспектов развития высокоширотных маршрутов акватории Северного морского пути и возможности их использования крупнотоннажными судами. Приведены основные данные, характеризующие объем морских арктических грузоперевозок в 2018 г. Отмечены основные тенденции изменения состава транспортного флота, режимов судоходства и направления транспортировки углеводородов. Обращено внимание на большое научное и прикладное значение опыта эксплуатации в 2018 г. крупнотоннажных судов категории ледового усиления Arc7 в Карском море в режиме круглогодичной навигации. В перечень основных научных достижений включены результаты исследования параметров движения судов при переходе от летнего навигационного периода к зимнему навигационному периоду, результаты использования судовых идентификационных и географических информационных систем для изучения морских транспортных потоков, а также проверка оправдываемо-

сти ледовых прогнозов разной заблаговременности в Карском море. Подтверждено, что в Карском море сеть маршрутов и система обеспечения навигационной безопасности плавания крупнотоннажных судов в основном сформированы. Утверждается, что в ближайшей перспективе развитие Северного морского пути будет связано с формированием морской транспортной инфраструктуры моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, включающей сеть глубоководных маршрутов в центральном и восточном секторе Арктики. Дано описание основных этапов проведения гидрографических работ в арктических морях. Исследован вопрос об особенностях гидрографического обследования высокоширотных маршрутов и плавания по ним крупнотоннажных судов. Приведены и исследованы формулы для расчета допустимого отклонения судна от рекомендованного маршрута. Установлены доверительные интервалы допустимых отклонений. Даны рекомендации по дополнительному гидрографическому обследованию отдельных участков высокоширотных трасс. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, высокоширотные трассы, ширина полосы обследования, боковые отклонения, вероятность, доверительные интервалы, безопасность мореплавания.

Для цитирования:

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

Введение (Introduction)

В 2018 г. общий объем грузоперевозок по трассам Северного морского пути (СМП) по сравнению с показателем 2017 г. увеличился в 1,84 раза и достиг 19,688 млн т [1]. Было перевезено 8,4 млн т сжиженного природного газа, 7,81 млн т нефти и нефтепродуктов и 0,8 млн т газового конденсата. Таким образом, в общем грузообороте доля перевозок углеводородов составила 86,3 %. Для вывоза углеводородов в 2018 г. использовалось 26 судов, которые за год выполнили около 200 рейсов. Основные перевозки грузов осуществлялись в Карском море. В режиме круглогодичной навигации там работало 16 крупнотоннажных танкеров и контейнеровозов с категорией ледового усиления Arc7.

В прошедшую навигацию не только был достигнут максимальный объем грузоперевозок в акватории СМП, но и введено в эксплуатацию максимальное количество новых крупнотоннажных судов высокого ледового класса Arc7. По этой причине для перспективных научных исследований 2018 г. может быть принят в качестве модельного или отсчетного периода.

В минувшем году были получены уникальные данные об изменении параметров движения основных типов транспортных судов в акватории Карского моря при переходе от одного навигационного периода к другому [2]–[4]. Была разработана методика использования морских идентификационных (АИС) и географических информационных систем (ГИС) для исследования параметров сложившихся морских транспортных потоков [5]–[7]. Выполнена проверка уровня гидрографической изученности рельефа дна на части участков маршрутов крупнотоннажных судов, связывающих порты Обской Губы и Енисейского залива с западной границей СМП [8]. Проверена эффективность ледовой и гидрометеорологической информации, а также оправдываемость ледовых прогнозов разной заблаговременности на Карское море при выборе маршрутов движения судов [9], [10]. Полученные в течение 2018 г. опыт и данные, безусловно, будут иметь большое научное и прикладное значение для развития СМП в целом.

Навигация 2018 г. подтвердила, что в Карском море сеть маршрутов и система обеспечения навигационной безопасности плавания крупнотоннажных судов в основном сформированы. Можно утверждать, что в Карском море созданы условия для увеличения интенсивности судоходства и роста объема морских грузоперевозок. Вместе с тем дальнейшее развитие СМП связано также с развитием морской транспортной инфраструктуры моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. По сравнению с Карским морем навигационные условия развития сети маршрутов крупнотоннажных судов в этих морях отличаются большей сложностью, что связано с более тяжелыми ледовыми условиями, малыми глубинами и недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна [11].

Сеть судоходных маршрутов крупнотоннажных судов в центральном и восточном секторе Арктики находится в стадии развития. Существующие маршруты используются эпизодически в летне-осенний период и практически не используются в остальное время года. В план развития сети судоходных маршрутов крупнотоннажных судов в акватории СМП включен проект основных и альтернативных высокоширотных маршрутов, предназначенных для плавания судов с осадкой до 15 м [12]. Маршруты вводятся в эксплуатацию по мере проведения на них площадной гидрографической съемки, гарантирующей отсутствие на них опасных глубин.

Работы по обоснованию высокоширотных трасс проводятся в два этапа. На первом этапе по результатам площадной съемки прокладывается маршрут шириной 2 км с минимальной глубиной 20 м. Объем работ оценивается в 192 тыс. км. На втором этапе площадь обследования дна должна быть расширена так, чтобы ширина маршрута могла быть увеличена до 20 км с минимальной глубиной 20 м. Объем работ на втором этапе оценивается в 1632 тыс. км.

До 2024 г. планируется полностью завершить первый этап формирования высокоширотных трасс и приступить к реализации плана расширения обследованной полосы маршрута до 20 км. В период 2019–2021 гг. намечено выполнение работ по обследованию рельефа дна в проливе Санникова и на подходах к нему [12]. Выбор ширины полосы обследования связан с компромиссным решением задач планирования и выполнения гидрографических работ в высоких широтах арктических морей с возможностью транспортных судов следовать строго по обследованным маршрутам. Выход за пределы обследованной полосы связан с возможной посадкой судна на неизвестную мель, что подтверждается результатами исследований, обобщенных в работах [13]–[16].

Исследованию вопроса о допустимом отклонении судна от обследованной полосы посвящена публикация [17]. Разработана методика оценки предельного отклонения судна от рекомендованного маршрута, основанная на данных морфометрических характеристик рельефа дна арктических морей. Результаты апробации предложенной методики описаны в диссертации [18]. Причины отклонений судов от рекомендованных курсов и их реальные численные значения при плавании по чистой воде и во льдах в работах [17], [18] не рассматривались. В работе [4] в процессе исследования количественных характеристик морских транспортных потоков в акватории СМП было отмечено резкое падение плотности потока транспортных судов в зимне-весенний навигационный период по сравнению с летне-осенним периодом, связанное со значительными боковыми отклонениями судов от рекомендованных курсов. При этом на качественном уровне была отмечена зависимость величины бокового отклонения от типа судов и толщины льда на маршруте.

Специальные исследования отклонений крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов при их самостоятельном плавании в акватории СМП до сих пор не проводились. Настоящая работа посвящена исследованию влияния степени гидрографической изученности маршрутов движения крупнотоннажных судов с большой осадкой на безопасность их плавания.

Цель исследования: разработка подходов к обоснованию плана проведения площадного обследования высокоширотных трасс акватории Северного морского пути.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рекомендованный маршрут B_0 разделен на i прямолинейных участков: $B_{0i} \in B_0$. На каждом из них в пределах полосы шириной B_{0i} , равной 2 км, выполнена площадная съемка, гарантирующая обнаружение глубин Z_i , значение которых превышает установленное предельное значение Z_{cr} . Точность и подробность съемки позволяет утверждать, что внутри полосы B_{0i} все глубины превышают Z_{cr} с вероятностью, равной единице:

$$p(Z \in B_{0i} | (Z_i - Z_{cr}) > 0) = 1. \quad (1)$$

В пределах каждого участка полосы определяется минимальная глубина, которая также превышает Z_{cr} :

$$Z_i^{\min} = \min\{Z_i\} > Z_{cr}. \quad (2)$$

За пределами полосы B_0 глубины $Z \notin B_0$, как правило, измерены с низкой подробностью, поэтому для них условие (1) должно быть заменено неравенством:

$$0 < p(Z \notin B_0 | (Z - Z_{cr}) > 0) \leq 1. \quad (3)$$

За пределами полосы B_0 могут находиться глубины, превышающие заданное критическое значение Z_{cr} , с вероятностью, соответствующей неравенству (3), а также глубины, значение которых оказывается меньше Z_{cr} . Вероятность последнего события определяется выражением

$$p(Z \notin B_0 | (Z - Z_{cr}) \leq 0) = 1 - p(Z \notin B_0 | (Z - Z_{cr}) > 0). \quad (4)$$

Можно предположить, что по мере удаления от обследованной полосы B_0 вероятность появления глубин Z со значением меньше Z_{cr} будет возрастать. Такое предположение относится к расстояниям, как в правую ΔB_R , так и в левую сторону ΔB_L от границ полосы B_0 .

Отклонения ΔB_R и ΔB_L определяются соотношениями:

$$\Delta B_R = (Z_R - Z_{cr}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma_R; \quad (5)$$

$$\Delta B_L = (Z_L - Z_{cr}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma_L; \quad (6)$$

где Z_R и Z_L — глубины, соответственно, на правой и левой границе обследованной полосы;

γ_R и γ_L — углы наклона дна между точками с глубинами Z_R , Z_L и Z_{cr} соответственно.

Для упрощения схемы вычислений уравнения (5) и (6) заменим одной формулой. При этом примем следующие допущения:

- вычисление отклонений производится отдельно для каждого участка i обследованной полосы;
- отклонения вправо и влево от полосы имеют равные значения;
- в качестве отсчетной глубины вместо измеренных глубин Z_R и Z_L принимается минимальная глубина $Z_i^{\min}$;
- вместо углов наклона γ_R и γ_L используется предельное максимальное значение угла наклона дна $\gamma_p^{\max}$, полученное экспериментальным путем и соответствующее принятому уровню обеспеченности p .

После проведенных преобразований формулы (5) и (6) при расчетах заменяются на одно выражение:

$$\Delta B_i^p = (Z_i^{\min} - Z_{cr}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma_p^{\max}. \quad (7)$$

Значения допустимых отклонений от обследованной полосы, рассчитанные по формуле (7), во всех случаях не превосходят оценки, выполненные по формулам (5) и (6), так как $Z_i^{\min} \leq Z_R$, $Z_i^{\min} \leq Z_L$, $\gamma_p^{\max} \geq \gamma_R$ и $\gamma_p^{\max} \geq \gamma_L$.

С учетом уравнения (7) общая ширина полосы B_i^p , в пределах которой глубины Z_i превышают значение Z_{cr} с вероятностью p определяется выражением

$$B_i^p = B_{0i} + 2(Z_i^{\min} - Z_{cr}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma_p^{\max}. \quad (8)$$

Оценка безопасности плавания судов по маршруту в полосе B_i^p , ширина которой рассчитана по формуле (8), зависит от соотношения фактической ширины полосы движения судов b_i на участке i и ширины полосы B_i^p :

- если $b_i \leq B_i^p$, то можно утверждать, что с вероятностью p на пути судна не встретятся глубины менее Z_{cr} ;
- если $b_i > B_i^p$, то вероятность встречи с глубинами Z_{cr} возрастает.

Оценка ширины полосы движения судов по рекомендованным маршрутам акватории Северного морского пути по чистой воде и в ледовых условиях выполнялась по данным фактического наблюдения траекторий движения судов в навигацию 2018 г. с использованием автоматизированных идентификационных и географических информационных систем [3], [4].

Оценка ширины полосы участков маршрутов B_i^p выполнялась с использованием данных, приведенных на сайте ФГУП «Гидрографическое предприятие» [12].

Оценка максимальных значений углов наклона дна $\gamma_p^{\max}$ на заданном уровне обеспеченности p производилась с использованием морских навигационных карт арктических морей.

Результаты (Results)

Схема судоходных маршрутов приведена на рисунке, где тонкими черными линиями отмечены традиционные прибрежные трассы, а черными утолщенными линиями — участки глубоководных маршрутов, планируемые к обследованию до 2024 г.

Цветными линиями отмечены участки высокоширотных маршрутов, на которых площадная съемка была выполнена до 2019 г. Цвета соответствуют разным значениям допустимых боковых отклонений:

- зеленый — отклонение более 20 км;
- желтый — отклонение от 10 до 20 км;
- красный — отклонение менее 10 км.

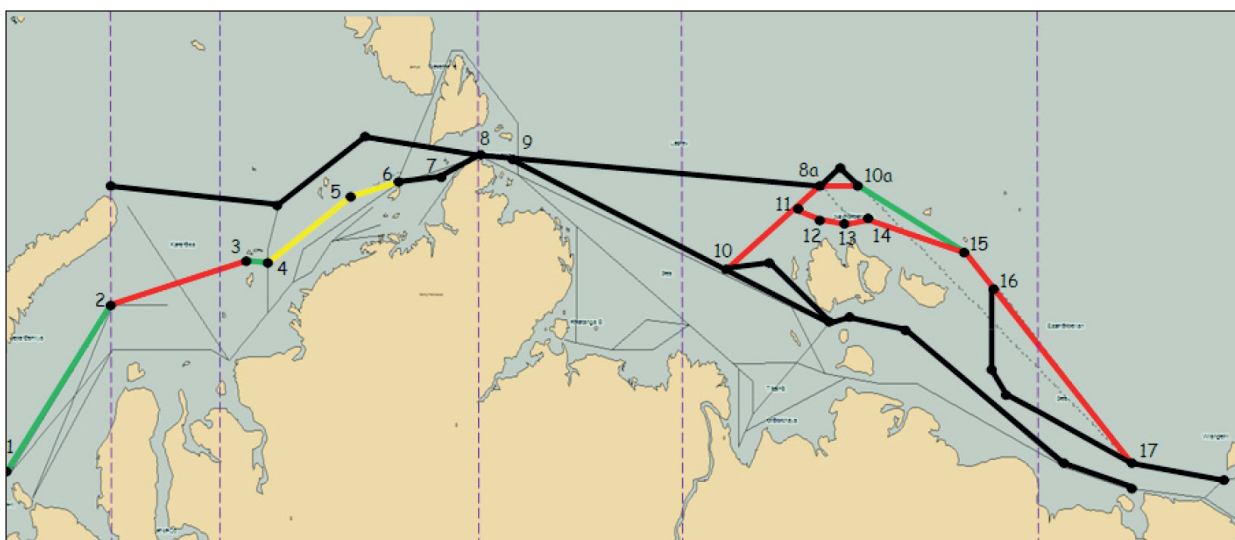


Схема судоходных маршрутов в акватории Северного морского пути

Участки обследованных маршрутов отличаются обнаруженными на них значениями минимальных глубин $Z_i^{\min}$, поэтому допустимые отклонения от их границ, вычисляемые по формуле (7), имеют разную величину при заданном уровне обеспеченности p .

Результаты вычисления допустимых отклонений от обследованных до 2019 г. высокоширотных маршрутов $\Delta B_i^{0,95}$ и ширина полос движения $B_i^{0,95}$ приведены в таблице. При расчетах принят уровень обеспеченности, $p = 0,95$. Вычисления выполнялись для предельной глубины, равной $Z_{cr} = 13$ м.

Результаты вычисления допустимых отклонений и ширины полос

Номер участка маршрута	Номера точек границ участков	Ширина обследованного участка B_{0i} , км	Минимальная глубина $Z_i^{\min}$, м	Допустимое отклонение $\Delta B_i^{0,95}$, км, при $Z_{cr} = 13,0$ м	Ширина полосы движения $B_i^{0,95}$, км
1	2	3	4	5	6
1	1–2	2	44,0	9,7	21,4
2	2–3	2	25,0	3,7	9,4
3	3–4	2	45,6	10,2	22,4
4	4–5	2	27,4	4,5	11,0

Окончание табл.

5	5–6	2	35,0	6,9	15,8
6	10–8a	2	24,4	3,6	9,2
7	8a–10a	2	23,1	3,2	8,4
8	10a–15	2	28,6	4,9	11,8
9	15–16	2	22,4	3,0	8,0
10	16–17	1,4	20,9	2,5	6,4
11	11–12	2	20,6	2,4	6,8
12	12–13	2	19,4	2,0	6,0
13	13–14	2	21,0	2,5	7,0
14	14–15	2	22,0	2,8	7,6

В первой графе таблицы приведены номера участков маршрута, во второй — номера точек границ участков, соответствующих обследованным участкам высокоширотной трассы. Номера точек границ участков соответствуют номерам, приведенным на рисунке. В третьей графе приведена ширина обследованной полосы. Все участки, за исключением участка 10, расположенного между точками 16 и 17, обследованы в пределах полосы, имеющей двухкилометровую ширину. Участок № 10 обследован в полосе, имеющей ширину 1,4 км. В четвертой графе приведены минимальные значения глубин $Z_i^{\min}$, обнаруженные на данном участке. Глубины $Z_i^{\min}$ приведены в метрах. В пятой графе приводятся значения допустимых отклонений $\Delta B_i^{0,95}$ от границ обследованной полосы. В шестой графе приводится суммарная ширина полосы движения судна, в пределах которой глубины менее $Z_{\text{cr}} = 13,0$ м встречаются с вероятностью, не превышающей 0,05.

Обсуждение результатов (Discussion)

Несмотря на то, что ширина обследованных полос не превышает 2 км, ширина безопасной полосы движения может существенно превышать это значение. Данное превышение для отдельных обследованных участков маршрута, приведенных на рисунке, достигает одиннадцатикратного значения. Расширение допустимой полосы движения судов зависит от осадки судна, которая связана со значением Z_{cr} . Для судов с малой осадкой ширина полосы движения может быть увеличена. Для судов с большой осадкой ширина полосы движения должна быть уменьшена. Приведенные в таблице данные получены при значении доверительной вероятности 0,95. При доверительной вероятности, значение которой превышает уровень 0,95, ширина полосы движения уменьшается. Увеличение уровня доверительной вероятности до значения 0,999 требует уменьшения допустимой ширины полосы не менее чем два раза. Уменьшение уровня доверительной вероятности менее чем 0,95 позволяет расширить границы допустимой полосы движения. При уменьшении уровня доверительной вероятности до 0,90 ширина полосы может быть увеличена на четверть. Приведенные в таблице данные позволяют провести сравнительную оценку отдельных участков обследованного маршрута.

На рисунке (с. 300) приведены результаты этой оценки. Участки, отмеченные красным цветом, имеют допустимую ширину движения судов наименьшего значения. Для обеспечения безопасного плавания крупнотоннажных судов с большой осадкой на этих участках требуется расширение полосы обследования в первую очередь. На участках, отмеченных зеленым цветом, ширина допустимой полосы движения имеет наибольшую величину. На этих участках расширение полосы обследования может быть отложено.

Приведенные оценки относятся к условиям чистой воды, когда фактическая полоса движения судов на рекомендованном маршруте зависит от способности удержания судна на запланированной линии пути. Ширина фактической полосы движения судов в арктических морях, как правило, не превышает 20 км [4]. При наличии льда удержание судна на маршруте затрудняется. Во льдах суда вынуждены маневрировать и отклоняться от запланированной линии пути на значительные расстояния. Таким образом, при планировании площадного обследования высокоширотных трасс следует учитывать значения фактических отклонений движения судов от рекомендованного маршрута.

Заключение (Conclusion)

Предложенная методика может быть использована в качестве основы для обоснования этапов и порядка выполнения гидрографических работ в акватории СМП при планировании и развитии сети высокоширотных маршрутов для крупнотоннажных судов с большой осадкой.

В дальнейшем предполагается выполнение исследований, направленных на оценку фактических отклонений движения судов от рекомендованных маршрутов в разные периоды навигации. Это позволит более обоснованно определять требуемые параметры полос площадного обследования дна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Администрации Северного морского пути <http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html> (дата обращения: 26.02.2019).
2. 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
3. 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: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.
4. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
5. Ol'khovik E. Geoinformation system use for transportations planning in water area of Northern Sea Route / E. Ol'khovik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 194. — Is. 7. — Pp. 072010. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072010.
6. Морской портал Сканэкс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.scanex.ru/cloud/maritime/> (дата обращения: 25.02.2019).
7. Ng M.W. Vessel speed optimisation in container shipping: A new look / M.W. Ng // Journal of the Operational Research Society. — 2018. — Pp. 1–7. DOI: 10.1080/01605682.2018.1447253.
8. Тезиков А. Л. Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.
9. Иванов Р. В. Характеристика ледовых условий работы гидрографических судов в Карском море / Р. В. Иванов, Д. А. Полубелов, А. А. Соболева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1211–1224. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.
10. Миронов Е. У. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях / Е. У. Миронов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 16–28.
11. Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
12. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 14.03.2019).
13. Бураковский Е. П. К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитриевский // Известия КГТУ. — 2013. — № 29. — С. 159–164.
14. Ключев В. В. Количественная оценка показателя стесненности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.
15. Ключев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

16. *Афонин А. Б.* Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / *А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков* // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.

17. *Королёв И. Ю.* Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / *И. Ю. Королёв* // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.

18. *Королев И. Ю.* Исследование влияния подробности промера на оценку гарантированных глубин в акватории Северного морского пути: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.22.17 — водные пути сообщения и гидрография / *И. Ю. Королев*. — СПб.: ФГБУ ВО ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 115 с.

REFERENCES

1. Federal State Budgetary Institution “The Northern Sea Route Administration”. Web. 26 Feb. 2019 <<http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html>>.

2. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. “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.

3. 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.

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

5. Ol'khovik, E. “Geoinformation system use for transportations planning in water area of Northern Sea Route.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. No. 7. IOP Publishing, 2018. 072010. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072010

6. Morskoi portal Skaneks. Web. 25 Feb. 2019 <<http://www.scanex.ru/cloud/maritime/>>.

7. Ng, Man Wo. “Vessel speed optimisation in container shipping: A new look.” *Journal of the Operational Research Society* (2018): 1–7. DOI: 10.1080/01605682.2018.1447253.

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

9. Ivanov, Roman V., Denis A. Polubelov, and Anastasiya A. Soboleva. “Ice condition features of hydrographic vessels for work in Kara sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1211–1224. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.

10. Mironov, E. U., I. M. Ashik, V. I. Dymov, M. Yu. Kulakov, and S. V. Klyachkin. “Modeli i metody rascheta i prognoza ledovykh i okeanograficheskikh uslovii v arkticheskikh moryakh.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

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

12. Federal State Unitary Hydrographic Department. Web. 14 March 2019 <<http://www.hydro-state.ru/>>.

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

14. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. “Quantitative assessment of constraint of the Northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.

15. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. “Formalization of the assessment of safety of routes of the northern sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

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

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

18. Korolev, I.Yu. Issledovanie vliyaniya podrobnosti promera na otsenku garantirovannykh glubin v akvatorii Severnogo morskogo puti. PhD diss. SPb.: FGBU VO GUMRF imeni admiral S.O. Makarova, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ольховик Евгений Олегович —

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

Афонин Андрей Борисович —

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

Тезиков Александр Львович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olhovik, Evgeniy O. —

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

Afonin, Andrej B. —

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

Tezikov, Aleksandr L. —

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

Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

Received: March 20, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314

AREAS OF THE NORTHERN SEA ROUTE WITH THE HIGHEST FREQUENCY OF THE NORTHERN WINDS IN THE XXI CENTURY

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

¹ — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

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

The areas of the coastal route of the Northern Sea Route which were substantially subjected to the winds blowing from the northern directions during the months of the summer navigation season relating to the period from 2000 to 2018 are identified in the paper. Interannual changes of the total duration of such winds have increasing trends. It is pointed out that such winds can seriously deteriorate the navigation conditions in the Arctic seas by intensifying the swell and transporting the floating ice onto the navigable coastal seaways thus compromising the shipping safety. Phenomena of the Arctic air outbreaks are mentioned generally to be responsible for the most severe southward winds in the area. To analyze the hydrometeorological information on the Northern Sea Route, the Arctic System Reanalysis data are used as a source material. Its applicability and adequacy have been preliminarily tested by means of comparison with the real observation results obtained from the weather stations in Amderma, Igarka, and Cape Schmidt using the Delaunay triangulation. The meteorological conditions along the Northern Sea Route are studied during the most favorable months of the navigation season: August, September, and October. For each day of these months and all points on the Route separated by the spacing of 30 km from each other the absolute values and the direction of the average daily wind velocity vector, as well as the tendency of their changes, have been estimated. It has been established that for the considered period the highest average daily values of the wind speed (22.9 m/s) took place on August 24, 2016 at the western approach to the Long Strait. It has been revealed that, in general, along the Northern Sea Route the northern winds with an average daily speed exceeding 15 m/s, representing the greatest danger to the marine navigation and the population of the corresponding coastal areas, most often occurred in the particular areas of the Barents, Kara, and Chukchi Seas (including the Long Strait). The areas mentioned above have been shown to also demonstrate increasing trends in changes of the wind average duration. In theory due to the impact of the global warming process, such trends will continue in the future.

Keywords: northern wind, total duration, Northern Sea Route, navigation season, tendency.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Areas of the Northern Sea Route with the highest frequency of the northern winds in the XXI century.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.2 (2019): 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.

УДК 911: 656.61.052

УЧАСТКИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ С НАИБОЛЬШЕЙ ПОВТОРЯЕМОСТЬЮ ВЕТРОВ СЕВЕРНЫХ РУМБОВ В XXI ВЕКЕ

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

Выявлены участки прибрежного маршрута трассы Северного морского пути, на которых в 2000–2018 гг. наиболее часто возникали ветры северных румбов, а также участки, в межгодовых изменениях суммарных продолжительностей которых в определенные месяцы навигации присутствовали возрастающие тренды. Отмечается, что такие ветры способны существенно осложнять условия навигации в арктических морях, усиливать волнение, вызывать вынос дрейфующих льдов на прибрежные маршруты движения судов. Указана существенная роль вторжений арктического воздуха при их формировании.

При анализе гидрометеорологических данных о среднесуточных значениях компонентов скорости ветра в качестве фактического материала использованы результаты реанализа ASR и выполнена проверка его адекватности путем сравнения с данными фактических наблюдений на метеостанциях Амдерма, Игарка и мыс Шмидта с использованием метода триангуляции Делоне. Изучена метеорологическая обстановка, имевшая место в наиболее благоприятные для морской навигации в Арктике месяцы (август, сентябрь и октябрь). Для каждого суток этих месяцев и всех пунктов Северного морского пути, отстоящих по долготе друг от друга на 30 км, оценены значения модуля и направления вектора среднесуточной скорости ветра и тенденции их изменения. Установлено, что в течение рассматриваемого периода наибольшие среднесуточные значения модуля скорости ветра (22,9 м/с) пришлись на 24.08.2016 г. на участок, расположенный на подходе к проливу Лонга с запада. Выявлено, что в целом по трассе Северного морского пути ветры северных румбов со среднесуточной скоростью более 15 м/с, представляющие наибольшую опасность для судоходства и населения прибрежных территорий, чаще всего возникали на участках, проходящих через Баренцево, Карское и Чукотское моря (включая пролив Лонга). Показано, что в изменениях их средней продолжительности на указанных участках присутствуют возрастающие тренды. Ожидается, что из-за влияния процесса потепления глобального климата, такие тенденции сохранятся в будущем.

Ключевые слова: ветры северных румбов, суммарная продолжительность, Северный морской путь, навигационный период, тенденция.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Участки Северного морского пути с наибольшей повторяемостью ветров северных румбов в XXI веке / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.

Введение (Introduction)

Ветры северных румбов (ВСР), возникающие в арктических морях, приводят к похолоданиям и нагону воды на их побережьях. Кроме того, они могут существенно осложнять условия навигации в них и, в частности, усиливать волнение, вызывая вынос дрейфующих льдов на прибрежные маршруты движения судов. Поэтому выявление участков таких маршрутов, где ВСР в настоящее время возникают наиболее часто, а их повторяемость увеличивается, является актуальной проблемой не только гидрометеорологии, но и безопасности судоходства в арктических морях. Наибольший практический интерес решение данной проблемы представляет для водных путей с активным судоходством, одним из которых можно считать прибрежный маршрут (ПМ) Северного Морского пути¹ (СМП), схематично показанный на рис. 1.



Рис. 1. Примерный путь прибрежного маршрута СМП

ПМ СМП в пределах Арктики, как видно из рис. 1, проходит по Баренцеву и Карскому морям, морю Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому морю и связывает порт Мурманск с другими портами российского Заполярья и государств Тихоокеанского региона. Вследствие это-

¹ 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: 01.12.2018).

го именно по данному маршруту ежегодно осуществляется Северный завоз, который большей частью обеспечивает население северных территорий России продуктами питания и товарами, а их экономику — топливом, материалами и оборудованием. В настоящее время существенную долю трафика на маршруте составляет также транспортировка полезных ископаемых (нефть, газ, уголь, металлы) с северных месторождений. Кроме того, из-за потепления климата Арктики и активизации пиратства в южных морях, ПМ СМП все чаще рассматривается судоходными компаниями как альтернатива транзитным переходам через Суэцкий канал. Однако этот интерес проявляется пока достаточно осторожно в силу сложных гидрометеорологических условий, но динамика роста числа таких переходов положительная¹.

На большинстве участков ПМ СМП следующие по нему суда удаляются от побережий на единицы — десятки миль, что существенно облегчает контроль их местоположения по визуальным и радиолокационным ориентирам, а также радиомаякам. По той же причине на многих его участках невозможно развитие высокой волны даже при сильном ветре южных румбов, которые возникают в передних секторах проходящих над ними циклонов [1].

Главным фактором, ограничивающим проходимость тех или иных участков ПМ СМП, является существующая на них ледовая обстановка, которая может значительно осложнять навигацию в проливах Карские ворота, Вилькицкого, Санникова (или Дмитрия Лаптева) и Лонга². Она, как правило, осложняется при возникновении ВСР, которые всегда возникают в тыловых секторах циклонов. Наибольшей силой и продолжительностью характеризуются ВСР, возникающие при таких блокирующих процессах, как вторжение Арктического воздуха [2]–[5].

Одной из основных характеристик повторяемости ВСР на том или ином участке таких маршрутов является суммарная продолжительность (СП) их действия в том или ином месяце навигационного периода. Суммарная продолжительность определяется как количество суток этого месяца, в течение которых направление вектора среднесуточной скорости ветра относится к сектору от северо-запада до северо-востока (от 315° до 45°), а его модуль превосходит заданный уровень. Чем больше модуль среднесуточной скорости ВСР, тем больше возникающие при этом навигационные, экологические и иные риски. Возникновение ВСР на трассе СМП не только увеличивает навигационные риски, но может также наносить существенный ущерб населению и ландшафтам прибрежных территорий, порождая их временное затопление вследствие нагонов [6]. Ветровые нагоны наиболее опасны на участках побережий с низкими берегами, расположенных в районах трансгрессии, которая обладает наибольшей интенсивностью на всем восточном побережье Енисейской губы и на участке побережья Карского моря между портом Диксон и заливом Толля [7].

Несмотря на то, что ПМ СМП функционирует уже более 85 лет, количество метеостанций России, действующих ныне на прилегающих к нему побережьях арктических морей, невелико³. На многих его участках систематических метеорологических наблюдений не проводится. Для таких участков информацию о датах, в которые над ними существовали ВСР, можно получить лишь с помощью методов математического моделирования [8]. При этом, как исходные данные, могут быть использованы результаты тех или иных реанализов поля атмосферного давления, одним из которых является реанализ ASR (Arctic System Reanalysis)⁴. Тем не менее частота возникновения ВСР той или иной силы на различных участках ПМ СМП, а также тенденции изменения их СП в XXI в. ранее не оценивались. Последнее существенно осложняет их учет при планировании социально-экономического развития соответствующих территорий, а также управлении работой арктического флота.

¹ Количество транзитных рейсов по Севморпути выросло в 1,5 раза в 2017 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/press-center/branch-news/87> (дата обращения: 01.12.2018).

² Правила плавания в акватории Северного морского пути. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsga.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya/fl20.html (дата обращения: 01.12.2018).

³ Источники метеорологических данных на территорию РФ по станциям / М. Дубинин, И. Поспелов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gis-lab.info/qa/meteo-station-sources.html> (дата обращения: 01.12.2018).

⁴ Arctic System Reanalysis. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/arctic-system-reanalysis-asr> (дата обращения: 01.12.2018).

Целью настоящей работы является выявление участков ПМ СМП, на которых в современном периоде (2000–2018 гг.) в месяцы навигационного периода ВСР той или иной силы возникали наиболее часто, а их повторяемость увеличивалась. Для достижения указанной цели в отношении каждого участка ПМ СМП решены следующие задачи:

- 1) выявление всех дат, относящихся к наиболее активному навигационному периоду (август, сентябрь, октябрь), когда на нем в XXI веке существовали ВСР различной силы;
- 2) определение СП ВСР, а также оценка тенденций их изменения за период 2000–2018 гг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При решении рассматриваемых в исследовании задач в качестве фактического материала был использован реанализ ASR, который разработан и поддерживается группой полярной метеорологии Университета штата Огайо (США). В ASR информация о значениях компонентов скорости приводного ветра, в том числе в любом пункте Арктики, представлена с горизонтальным разрешением, равным 30 км. ASR основан на модели Polar Weather Research and Forecasting (Polar WRF) версии 3.3.1 [9]. Указанная информация с дискретностью три часа представлена за период с 01.01.2000 по 31.12.2018¹. Для оценки его адекватности использована информация о фактических среднесуточных значениях компонентов скорости ветра на метеостанциях Амдерма, Игарка и мыс Шмидта, полученная из [10].

Подобная оценка производилась путем определения достоверности статистического вывода о наличии соответствия зависимостей от времени фактических среднесуточных значений меридиональных составляющих скорости ветра на указанных ранее метеостанциях, а также их оценок, полученных путем экстраполяции результатов реанализа ASR в указанные пункты. При экстраполяции применялись допущения, принимаемые в *методе триангуляции Делоне* [11]. Достоверность указанного статистического вывода определялась с применением *метода корреляционного анализа* и *критерия Стьюдента* [12]. Полученные таким образом результаты оценки адекватности фактического материала приведены в следующей таблице:

Оценка достоверности вывода об адекватности фактического материала, %

Пункт / месяц	Амдерма	Игарка	Мыс Шмидта
Август	99,0	98	99
Сентябрь	99,0	98	98
Октябрь	98,0	99	98

Из таблицы следует, что реанализ ASR вполне адекватно описывает изменения меридиональных составляющих среднесуточной скорости ветра в указанных пунктах изучаемого региона, что свидетельствует о возможности его применения в качестве фактического материала при решении рассматриваемых задач. В качестве границ исследуемого участка земной поверхности приняты параллели 65°–80° с. ш. и меридианы 32,5° в. д. и 167,5° з. д. Указанные границы в полной мере включают трассы ПМ СМП. Для исследования были взяты наиболее благоприятные для морской навигации месяцы — август, сентябрь и октябрь. Обе поставленные задачи решались для всех пунктов ПМ СМП, разнесенных по долготе на 2,5°. Для каждого из этих пунктов и для каждого суток, относящихся к августу, сентябрю и октябрю 2000–2018 гг. из ASR определялись значение модуля и направление вектора среднесуточной скорости ветра. Исследования проводились для двух классов ВСР. В первый класс включены ВСР, для которых значение модуля их среднесуточной скорости составляло не менее 6 м/с. Ко второму классу отнесены ВСР, для которых значение этого показателя превышало 15 м/с.

¹ Arctic System Reanalysis. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/arctic-system-reanalysis-asr> (дата обращения: 01.12.2018).

Частота возникновения ВСП оценивалась для каждого рассматриваемого пункта маршрута СМП, следующим образом:

$$f = \frac{n}{N},$$

где n — общее количество суток из изучаемого месяца, относящихся к 2000–2018 гг., в которые был обнаружен ВСП;

N — общее количество суток этого месяца, вычисленное за указанный период (в августе и октябре $N = 589$, а в сентябре $N = 570$).

Для оценки долговременной тенденции (называемой в статистике *трендом*) полученных временных рядов межгодовых изменений СП ВСП в каком-либо пункте использовалась *методика расчета по угловому коэффициенту линейного тренда*, описанная в [12].

Результаты (Results)

В соответствии с описанной методикой для каждых суток августа, сентября и октября, относящихся к 2000–2018 гг., и каждого рассматриваемого пункта ПМ СМП с использованием ASR выполнена оценка модуля и фазы (направления) вектора среднесуточной скорости ветра. Установлено, что в течение рассматриваемого периода наибольшие оценки среднесуточных значений модуля скорости ветра (22,9 м/с) соответствуют дате 24.08.2016 и участку СМП, расположенному на подходе к проливу Лонга с запада (между меридианами 177,5° в. д. и 180°).

На основании полученных результатов выявлены все даты, когда направления этого вектора в том или ином пункте ПМ СМП относились к северным румбам, а значения его модуля превышали уровни 6 м/с и 15 м/с. Установленные таким образом даты учтены при вычислении частоты возникновения подобных событий за каждый рассматриваемый месяц изучаемого периода, а также соответствующих значений СП ВСП. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости от долготы пункта ПМ СМП значений частоты f , с которой в том или ином месяце навигационного периода в нем наблюдались ВСП со среднесуточными значениями скорости, соответствующими пороговым уровням 6 м/с и 15 м/с.

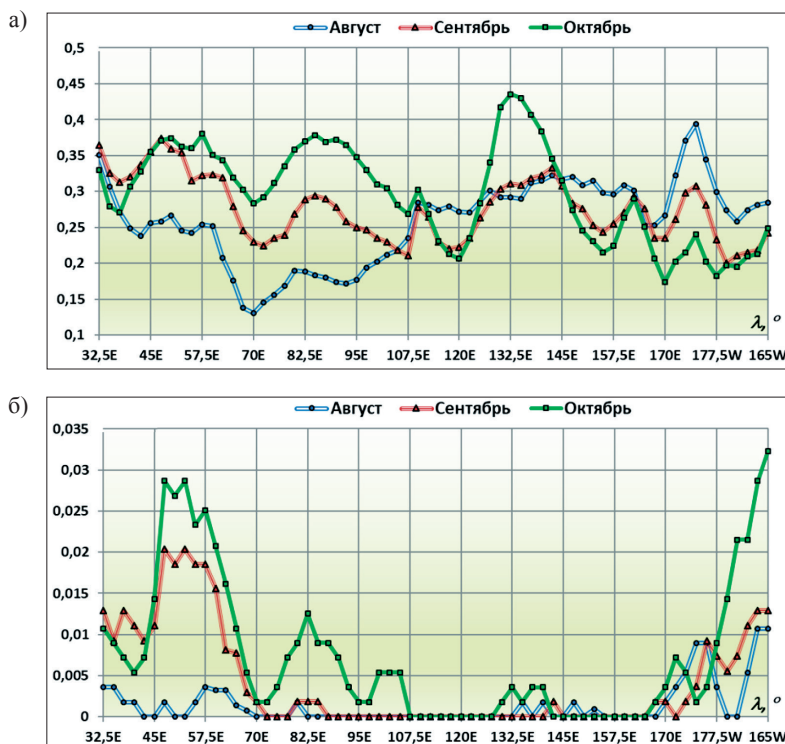


Рис. 2. Зависимости от долготы пункта ПМ СМП значений частоты (f), с которой в том или ином месяце навигационного периода в нем наблюдались ВСП со среднесуточным значением скорости: а — не менее 6 м/с; б — не менее 15 м/с

Из рис. 2, *а* видно, что за период 2000–2018 гг. ВСР со среднесуточными значениями скорости не менее 6 м/с наиболее часто возникали в августе на участках ПМ СМП, расположенных в проливе Лонга и на подходах к нему с запада. Они также имели место в Баренцевом море — в районе, прилегающем к выходу из Кольского залива. В сентябре участки рассматриваемого маршрута, где за тот же период данные ВСР возникали наиболее часто, находились:

- в районе Баренцева моря, прилегающем к воронке Белого моря;
- у побережья Карского моря между портом Диксон и устьем реки Ленивая (берег Харитона Лаптева);
- в проливе Санникова с прилегающими к нему районами моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря;
- на подходах с востока и запада к проливу Лонга и в самом этом проливе.

В октябре значения частоты возникновения рассматриваемых ВСР являлись наибольшими для участков ПМ СМП, расположенных в восточной части Баренцева и Карского моря, а также моря Лаптевых, и прилегающих к ним проливах Карские ворота, Вилькицкого и Санникова либо Дмитрия Лаптева. Средние значения частоты, с которой в том или ином месяце навигационного периода на всем ПМ СМП наблюдались ВСР со среднесуточным значением скорости не менее 6 м/с, минимальны в августе и максимальны в октябре.

Из рис. 2, *б* следует, что ВСР со среднесуточными скоростями не менее 15 м/с, которые способны вызывать наиболее ощутимый нагон воды и дрейфующих льдов к побережьям, в 2000–2018 гг. в те же месяцы наиболее часто возникали на участках ПМ СМП, расположенных в Баренцевом, Карском и Чукотском море. В Баренцевом море при таких ВСР наблюдаются сильные шторма, от которых для судов здесь практически отсутствуют надежные укрытия. В Карском и Чукотском море те же ВСР способны не только создавать на соответствующих участках прибрежного маршрута СМП опасное волнение, но и пригонять на них с севера дрейфующие льды. Кроме того, они способны вызывать затопление обширных прибрежных территорий, расположенных в Енисейском заливе и прилегающих к побережьям Карского моря между портом Диксон и заливом Толля. Следовательно, именно в Баренцевом, Карском и Чукотском море ВСР в XXI в. создают наиболее существенные гидрометеорологические риски как для навигации, так и для прибрежных территорий. При оценке СП ВСР в различных пунктах рассматриваемого маршрута установлено, что по мере увеличения наибольшей нижней границы возможного значения модуля вектора их средней скорости значения данных показателей снижаются. Поэтому тенденции их изменений в 2000–2018 гг. во всех его пунктах оценены лишь для ВСР, которым соответствуют среднесуточные значения скорости не менее 6 м/с.

Согласно описанной методике, для каждого пункта и каждого месяца навигационного периода вычислено значение количественной меры тенденции изменения СП ВСР — углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда межгодовых изменений данного показателя. Полученные таким образом зависимости от долготы пункта ПМ СМП значений углового коэффициента линейного тренда межгодовых изменений СП ВСР со среднесуточным значением скорости не менее 6 м/с, которые соответствуют всем месяцам навигационного периода 2000–2018 гг., представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, на ПМ СМП в рассматриваемый период и каждом месяце навигации существовали участки, где происходило значительное повышение СП ВСР, а следовательно, и гидрометеорологических рисков, а также участки, где имело место их снижение. Значимые возрастающие тренды межгодовых изменений СП ВСР для августа выявлены для участков ПМ СМП, расположенных в западной части Баренцева моря и Восточно-Сибирского моря, а также в восточной части моря Лаптевых и проливе Санникова.

Тенденции к увеличению сентябрьских СП ВСР обнаружены для участков рассматриваемого водного пути, которые находятся в западной части Баренцева моря и прибрежном районе Карского моря — от полуострова Ямал до порта Диксон. В последнем такие тенденции наиболее опасны, поскольку здесь наблюдается весьма интенсивная трансгрессия [7].

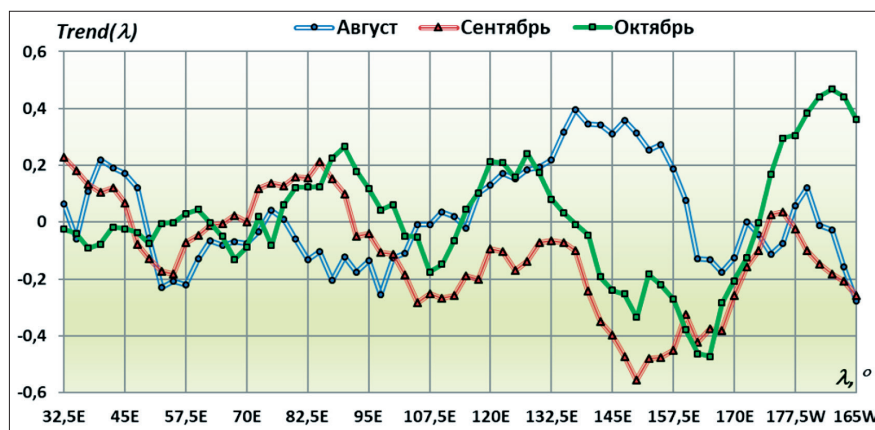


Рис. 3. Зависимости от долготы пункта ПМ СМП соответствующих ему значений углового коэффициента линейного тренда межгодовых изменений СП ВСР со среднесуточным значением скорости не менее 6 м/с для месяцев навигационного периода 2000–2018 гг.

Существенное возрастание в течение 2000–2018 гг. СП ВСР для октября зафиксировано в восточных частях Карского моря и проливе Вилькицкого, в море Лаптевых и проливе Санникова, а также Восточно-Сибирском море и проливе Лонга. На всех указанных участках ПМ СМП условия работы судов в настоящее время осложняются не только из-за того, что при возникновении на них ВСР усиливается волнение, но и вследствие увеличения их ледовитости. На участках того же маршрута, где тренды межгодовых изменений СП за тот или иной месяц ВСР в период 2000–2018 гг. являлись убывающими, условия работы флота становятся более благоприятными. В среднем в XXI в. по всей трассе СМП в августе и октябре СП ВСР, а, следовательно, и гидрометеорологические риски, увеличивались, а в сентябре снижались. При этом в августе за указанный период они наиболее существенно увеличились в Баренцевом море (где, как видно из рис. 2, б) часто возникали ВСР со среднесуточной скоростью более 15 м/с). В сентябре-октябре наибольшее влияние на работу водного транспорта и состояние побережий оказывало увеличение СП таких ВСР в восточной части Карского моря. Кроме того, в октябре представляла опасность тенденция к увеличению СП ВСР на участках прибрежного маршрута СМП, проходящих вдоль побережий Чукотского моря (между проливами Лонга и Беринговым).

Обсуждение (Discussion)

При сохранении в обозримом будущем выявленных тенденций изменений СП ВСР гидрометеорологические риски на указанных участках прибрежного маршрута СМП будут и далее возрастать. Поэтому существенный интерес представляет вопрос: *могут ли они в действительности сохраниться*. Как отмечалось ранее, причиной возникновения сильных и продолжительных, а следовательно, наиболее опасных ВСР являются вторжения арктического воздуха (ВАВ), формируемые в тыловых секторах циклонов, которые входят в высокие широты и взаимодействуют с соответствующими сегментами Арктического антициклона [13]. Следствием взаимодействия этих атмосферных вихрей является обострение барических градиентов в областях, которые их разделяют, что и является причиной усиления ВСР, а также образования вторжений арктического воздуха [2]. Поэтому изменения повторяемости ВСР (со средней скоростью более 15 м/с) является непосредственным следствием увеличения повторяемости как вторжений арктического воздуха, так и вызывающих их вхождений в высокие широты циклонов. Указанные процессы являются важнейшими компонентами меридиональных составляющих общей циркуляции земной атмосферы, а увеличение их повторяемости в некоторых секторах Северного полушария, выявленное в современном периоде [14], является следствием происходящего потепления глобального климата [15]. При дальнейшем потеплении климата активизация данных процессов над Баренцевым, Карским

и Чукотским морем, происходившая в навигационный период 2000–2018 гг., продолжится, приводя к дальнейшему увеличению СП ВСР. Следовательно, гипотеза, предполагающая дальнейшее увеличение ВСР на указанных участках ПМ СМП, может рассматриваться как вполне вероятная при осуществлении сценария изменений глобального климата, при котором будет происходить его потепление.

Как известно, следствием потепления глобального климата является снижение ледовитости Арктики, которое наиболее остро проявляется в ее секторах, прилегающих к Атлантике и побережьям Европы. Поэтому в Баренцевом море данное явление будет вызывать увеличение повторяемости сильных штормов, при которых следующие по рассматриваемому маршруту суда вынуждены будут практически всюду оказываться лагом к волне и ветру. Вероятное дальнейшее увеличение СП ВСР будет приводить к увеличению ледовитости участков СМП, расположенных у берегов полуострова Чукотка и в проливе Лонга.

Вероятное дальнейшее увеличение повторяемости СП ВСР в Карском море будет приводить к повышению ледовитости на соответствующих участках ПМ СМП лишь до тех пор, пока в нем будут существовать Новоземельский и Североземельский массивы дрейфующих льдов, которые в XXI веке в августе–октябре постепенно деградируют. На соответствующих участках побережья Карского моря данное явление будет повышать риски их временного затопления и ускоренного переформирования берегов.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Расположения участков прибрежного маршрута СМП с наибольшей частотой возникновения ветров северных румбов в XXI в. зависят как от месяца, в котором они рассматриваются, так и от нижней границы возможных значений модуля их среднесуточной скорости.
2. ВСР со среднесуточной скоростью более 15 м/с, которые представляют наибольшую опасность как для работающих на нем судов, так и для населения прибрежных территорий, в XXI в., в месяцы навигации чаще всего возникали на участках данного маршрута, проходящих через Баренцево, Карское и Чукотское моря, включая пролив Лонга.
3. В изменениях средней продолжительности ВСР на указанных участках присутствуют возрастающие тренды, вследствие этого создаваемые данными ветрами нагоны воды и дрейфующих льдов возникали чаще.
4. Выявленные особенности соответствуют современным представлениям о влиянии потепления глобального климата на изменения характеристик меридиональных составляющих общей циркуляции атмосферы, поэтому сценарий, при котором в ближайшем будущем они сохранятся, представляется вероятным при дальнейшем развитии процесса потепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salby M. L. Fundamentals of Atmospheric Physics / M. L. Salby. — New York: Academic Press, 1996. — 560 p.
2. Холопцев А. В. Вторжения арктического воздуха и современная климатическая изменчивость экстремальных температур и атмосферных осадков в Крыму / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин, Л. Е. Курочкин // Строительство и техногенная безопасность. — 2018. — № 12 (64). — С. 145–157.
3. Pfahl S. Importance of latent heat release in ascending air streams for atmospheric blocking / S. Pfahl, C. Schieritz, M. Croci-Maspoli, C. M. Grams, H. Wernli // Nature Geoscience. — 2015. — Vol. 8. — Pp. 610–614. DOI: 10.3929/ethz-a-010690671.
4. Barnes E. A. Exploring recent trends in Northern Hemisphere blocking / E. A. Barnes, E. Dunn-Sigouin, G. Masato, T. Woollings // Geophysical Research Letters. — 2014. — Vol. 41. — Pp. 638–644. DOI: 10.1002/2013GL058745.
5. Athanasiadis P. J. The representation of atmospheric blocking and the associated low-frequency variability in two seasonal prediction systems / P. J. Athanasiadis, A. Bellucci, L. Hermanson, A.A. Scaife, C. MacLachlan,

A. Arribas, S. Materia, A. Borrelli, S. Gualdi // *Journal of Climate*. — 2014. — Vol. 27. — Pp. 9082–9100. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00291.1.

6. Черкесов Л. В. Численное исследование сгонно-нагонных процессов и течений Азовского моря в период экстремальных ветров / Л. В. Черкесов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. — 2017. — № 5 (197). — С. 3–20.

7. Ключко А. А. Национальный атлас России / А. А. Ключко [и др.] — М.: ФГУП «Госгисцентр», 2004. — Т. 2: Природа и экология. — 495 с.

8. Bromwich D. H. A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic / D. H. Bromwich, A. B. Wilson, L. S. Bai, G. W. Moore, P. Bauer // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. — 2016. — Vol. 142. — Is. 695. — Pp. 644–658. DOI: 10.1002/qj.2527.

9. Hines K.M. Development and testing of Polar WRF. Part I. Greenland ice sheet meteorology / K. M. Hines, D. H. Bromwich // *Monthly Weather Review*. — 2008. — Vol. 136. — Pp. 1971–1989. DOI: 10.1175/2007MWR2112.1.

10. Historical weather data in Russia [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://en.tutiempo.net/climate/russia.html> (дата обращения: 01.12.2018).

11. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. — Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2002. — 128 с.

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

13. Дзердзеевский Б. Л. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов / Б.Л. Дзердзеевский, В.М. Курганская, З.М. Витвицкая // *Тр. науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2: Синоптическая метеорология*. — М.: Центральный институт прогнозов; Ленинград: Гидрометиздат, 1946. — Вып. 21. — С. 80.

14. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / Н. К. Кононова. — М.: ИГ РАН. Воентехиниздат, 2009. — 372 с.

15. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007 / Ed. by Bernstein L. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007. — 940 p.

REFERENCES

1. Salby, M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. New York: Academic Press, 1996.
2. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and L.Ye. Kurochkin. “Invasions of Arctic air and current climate variability of extreme temperatures and total precipitation in Crimea.” *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* 12(64) (2018): 145–157.
3. Pfahl S., C. Schwieler, M. Croci-Maspoli, C. M. Grams, and H. Wernli. “Importance of latent heat release in ascending air streams for atmospheric blocking.” *Nature Geoscience* 8 (2015): 610–614. DOI: 10.3929/ethz-a-010690671.
4. Barnes, E. A., E. Dunn-Sigouin, G. Masato, and T. Woollings. “Exploring recent trends in Northern Hemisphere blocking.” *Geophysical Research Letters* 41 (2014): 638–644. DOI: 10.1002/2013GL058745.
5. Athanasiadis Panos J., Alessio Bellucci, Leon Hermanson, Adam A. Scaife, Craig MacLachlan, Alberto Arribas, Stefano Materia, Andrea Borrelli, and Silvio Gualdi. “The representation of atmospheric blocking and the associated low-frequency variability in two seasonal prediction systems.” *Journal of Climate* 27 (2014): 9082–9100. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00291.1.
6. Cherkesov, L. V., T. Ya. Shul'ga, N.N. Dyakov, and R. R. Stanichnaya. “Numerical study of storm surge processes and currents of the Sea of Azov during a period of extreme winds.” *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal* 5(197) (2017): 3–20.
7. Klochko A. A., M. A. Romanovskaya, M. G. Grechushnikova, et al. *Natsional'nyy atlas Rossii. Tom 2. Priroda i ehkologiya* M.: FGUP GOSGISCENTR, 2004.
8. Bromwich, David H., Aaron B. Wilson, Le-Sheng Bai, George W. K. Moore, and Peter Bauer. “A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142.695 (2016): 644–658. DOI: 10.1002/qj.2527.
9. Hines, K. M., and D. H. Bromwich. “Development and testing of Polar WRF. Part I. Greenland ice sheet meteorology.” *Monthly Weather Review* 136 (2008): 1971–1989. DOI: 10.1175/2007MWR2112.1.

10. Historical weather data in Russia. Web. 1 Dec. 2018 <<https://en.tutiempo.net/climate/russia.html>>.
11. Skvortsov, A. V. *Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002.
12. Aivazyan, S. A., and V. S. Mhitaryan. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki*. M.: Yuniti, 1998.
13. Dzerdzhevskij, B. L., V. M. Kurganskaya, and Z. M. Vitvickaya. "Tipizatsiya cirkulyacionnyh mekhanizmov v severnom polusharii i harakteristika sinopticheskikh sezonov." *Tr. n.-i. uchrezhdenij Gl. upr. gidrometeorol. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Ser. 2. Sinopticheskaya meteorologiya*. Vol. 21. Moskva: Tsentral'nyi institut prognozov; Leningrad: Gidrometizdat, 1946. 80.
14. Kononova, N. K. *Klassifikatsiya cirkulyacionnyh mekhanizmov Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzhevskomu*. M.: IG RAN. Voentekhnizdat, 2009.
15. Bernstein, L., eds. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

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 13 марта 2019 г.
Received: March 13, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331

THE PROBLEMS OF NAMING THE PLAINS AND BASINS OF THE CENTRAL-ARCTIC AREA OF RISES OF THE ARCTIC OCEAN

Yu.G. Firsov¹, A.G. Zinchenko²

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

² — The All-Russia Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources
of the World Ocean named after academician I. S. Gramberg» (VNIIOkeangeologia),
St. Petersburg, Russian Federation

The toponyms of the undersea features inside the Russian sector of the Arctic Ocean in the context of Article 76 of the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) are considered in the paper. A short historical retrospective overview of the seafloor relief naming and current official toponyms presented in the GEBCO and VLIZ gazetteers is provided. The implementation of the legal term «juridical continental shelf» according to UNCLOS Article 76 leads to the necessity of some toponyms reduction. These toponyms had been named in the 50-60-s of the 20-th century when the bathymetric study of the Arctic Ocean was inefficient and basic geomorphologic features were not well understood. As an example the Wrangel plain structure is examined, which according to the GEBCO gazetteer is named: «Wrangel abyssal plain». It is emphasized that the definition «abyssal plain» for this structure is erroneous because this structure presents the complex dismember slope of the Makarov Basin comprising the two terraces. Based on the modern geological conceptions and interpretations it is proposed to allocate the lower terrace as a separate structure with the new name «Toll plain». Meanwhile the upper terrace can be renamed into «Wrangel plain». The legal aspects denote the urgency of using the proper seafloor relief toponyms and the international recognition of the Russian proposal concerning the new seafloor features as well as those previously discovered by the Russian explorers.

Keywords: Arctic Ocean, Arctic geomorphology, toponyms of the undersea features, United Nations Convention on the Law of the Sea, continental margin, continental slope, Wrangel plain, abyssal plain, complex dismember slopes.

For citation:

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

УДК 910.26

ПРОБЛЕМЫ НАИМЕНОВАНИЯ РАВНИН И КОТЛОВИН ЦЕНТРАЛЬНО-АРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ПОДНЯТИЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Ю. Г. Фирсов¹, А. Г. Зинченко²

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

² — Всероссийский научно-исследовательский институт Геологии и минеральных
ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены топонимы подводного рельефа Северного Ледовитого океана (СЛО), в том числе в контексте Статьи 76 Конвенции по морскому праву. Кратко изложена история формирования и современное состояние топонимики дна СЛО, закрепленное в каталогах (газетирах) Генеральной батиметрической карты Мирового океана (ГЕБКО-GEBCO), Морского института Фландрии (VLIZ) в отечественных справочниках и реестре. Отмечается, что необходимо уточнение отдельных топонимов, присвоенных в 50–60-е гг. XX в. при недостаточной изученности рельефа СЛО. В качестве примера рассмотрены

котловины Макарова и Подводников, абиссальные равнины Чукотская, Менделеева и Врангеля. Указывается, что дефиниция «абиссальная равнина» применительно к ним является неправомерной. Предлагается выделить площадку нижней террасы котловины Макарова (Подводников) в отдельную форму с названием «равнина Толля», а площадку верхней ступени переименовать, назвав «равниной Врангеля». Отмечается актуальность учета правовых аспектов при наименовании морфоструктур дна СЛО, а также необходимость международного оформления российских предложений по топонимическим названиям как новых, так и ранее открытых российскими исследователями.

Ключевые слова: топонимы подводного рельефа, Северный Ледовитый океан, ГЕБКО, батиметрическая карта СЛО, газетир ГЕБКО, газетир VLIZ, юридический континентальный шельф, континентальный склон, континентальный подъем, абиссальная равнина, морфоструктуры морского дна.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Проблемы наименования равнин и котловин центрально-арктической области поднятий Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов, А. Г. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 315–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331.

Введение (Introduction)

Постоянно возрастающий интерес к Северному Ледовитому океану (СЛО) и достигнутый к настоящему времени уровень изученности рельефа его дна требуют подробного исследования проблем топонимики СЛО. Даже при первом взгляде на новую отечественную карту «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115) [1] бросается в глаза малое количество географических названий (см. рис. 1). В связи с этим на повестке дня по-прежнему находятся вопросы пополнения списка топонимов, их упорядочения и разработки концептуального подхода к решению имеющихся проблем. Начиная с середины 1980-х гг. XX в., впервые появился призыв *покончить с вольным бесконтрольным обращением с топонимами форм рельефа СЛО* [2], но несмотря на целый ряд предпринимаемых действий, существенного прогресса в решении данного вопроса достигнуто не было. Даже сейчас, в начале XXI в. эта проблема пока все еще далека от своего разрешения, которое потребует последовательного и поэтапного выполнения ряда шагов. В настоящем исследовании затронута лишь часть актуальных вопросов топонимики Арктического бассейна СЛО, которые имеют отношение к проблеме обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) России в СЛО. Количество работ, посвященных наименованию форм рельефа дна СЛО, сравнительно невелико: [3]–[11]. Рассматриваемые проблемы имеют в СЛО свою специфику вследствие труднодоступности и в целом недостаточной изученности, поскольку они в настоящее время весьма актуальны для Арктического бассейна.

Важность и своевременность проблемы определяется как политическими, так научными и практическими задачами, стоящими перед Россией в Арктике, поскольку без полноценной топонимической базы невозможно конкретизировать районы исследований и осуществлять привязку результатов. Разночтения в топонимах приводят к недопониманию и ошибкам. Значение и роль географических названий (ГН) на картах подводного рельефа в масштабах Мирового океана на основе изучения обширного отечественного и зарубежного материала детально рассмотрены Г. В. Агаповой [12], которой впервые были комплексно изучены особенности топонимики дна Мирового океана: специфика названий рельефа дна, а также рассмотрены вопросы формирования массива наименований, правила номинации и использования наименований на картах и в публикациях, проблемы стандартизации и систематизации ГН и их современное решение. В числе прочих Г. В. Агапова отмечает такие важные задачи, как постоянное пополнение массива географических названий и терминов, необходимость их стандартизации, систематизации наименований и создания справочников географических названий, замещение и уточнение наименований, не соответствующих правилам номинации или полученных на основе результатов новых исследований. Помимо недостатка в топонимах СЛО и противоречий в их трактовке существенным недостатком является отсутствие современных карт или схем, составленных по принципу полной делимости,

которые позволили бы осуществлять географическую и геоморфологическую привязку любого пункта наблюдений в разных масштабах.

С появлением ст. 76 «Конвенции ООН по морскому праву 1982 г.» (далее — Конвенция) и с введением термина «юридический континентальный шельф» появился ряд новых специфических проблем классификации форм рельефа дна и их топонимики. Это обусловлено юридическим контекстом понятий, трактовка которых отличается от сложившейся в морской геологии. В свете проблемы ВГКШ и необходимости классификации объектов дна СЛО в терминах Конвенции и Научно-технического руководства (НТР) комиссии [36] вопросы топонимики СЛО приобретают особую актуальность. Первым этапом на пути решения возникающих при этом проблем может быть уточнение ранее присвоенных названий и конкретизация соответствующих форм рельефа с учетом достигнутой изученности рельефа дна.

Основная часть (Main Part)

Россия исторически всегда имела приоритет в исследованиях Арктики и СЛО. Широкомасштабное изучение СЛО с использованием ледовых баз и авиадесантного способа развернулось после окончания Второй мировой войны и осуществлялось преимущественно силами исследователей СССР, США и Канады [3]–[5]. На первом этапе советскими учеными были сделаны открытия основных форм рельефа дна СЛО [3], [4], [7], [8]. В 1948 г. советской высокоширотной экспедицией был открыт срединно-океанический хребет, впоследствии названный так в честь его первооткрывателя Я. Я. Гаккеля. Позже был обнаружен хребет, которому советские ученые дали имя Ломоносова. Поскольку исследования в центральной Арктике имели во многом военное назначение, сведения об их результатах не были широко известны. Информация об обнаруженном в 1948 г. хребте Ломоносова была впервые опубликована только в 1954 г. [5]. К этому времени отечественными исследователями были обнаружены также поднятия Менделеева, Чукотское плато, котловины Макарова, Амундсена и Нансена. Американские ученые, работая на ледовых станциях, в этот же период открыли Канадскую котловину, поднятия Альфа и равнину «Флетчер» (Fletcher Plain), примерно соответствующую современной Сибирской абиссальной равнине в котловине Макарова.

В 1963 г. учеными Научно-исследовательского института геологии Арктики (НИИГА) — ныне ФГБУ «ВНИИОкеангеология» им И. С. Грамберга, была подготовлена первая геоморфологическая карта СЛО масштаба 1:5 000 000 [6], на которой были нанесены основные топонимы рельефа дна. В то время классификация форм подводного рельефа только зарождалась и многие дефиниции формулировались достаточно произвольно. Основные крупнейшие и крупные формы рельефа дна Арктического бассейна, согласно наиболее современной отечественной батиметрической карте [1], обозначены на рис. 1.

Под Арктическим бассейном понимается часть Северного Ледовитого океана, ограниченная с юга внешними краями материковых отмелей (бровками шельфов) Евразии и Сев. Америки. В качестве синонимичных названий Арктического бассейна рассматриваются термины «Полярный бассейн» и «Центральный Арктический бассейн». В Арктическом бассейне различают две части: Евразийский и Амеразийский бассейны (суббассейны). Граница между ними с общегеографических позиций проводится по хребту Ломоносова, как показано на рис. 2 [13]. При этом требуется уточнение положения границы двух бассейнов, поскольку в геоморфологическом отношении хребет Ломоносова целиком принадлежит Амеразийскому бассейну. В то же время в состав граничащей с хребтом Ломоносова со стороны Евразийского бассейна котловины Амундсена должны входить окружающие ее склоны. Таким образом, евразийский склон хребта Ломоносова является общим для него и котловины Амундсена и служит границей Евразийского и Амеразийского бассейнов с геоморфологических позиций. В решении аналогичной проблемы разграничения положительных и отрицательных форм, достаточно типичной для морской геоморфологии, сделаны лишь первые шаги. Подход с использованием для разграничения соседних форм «общих склонов», который был ранее применен при составлении орографической схемы арктических шельфов России [14], представляется перспективным.

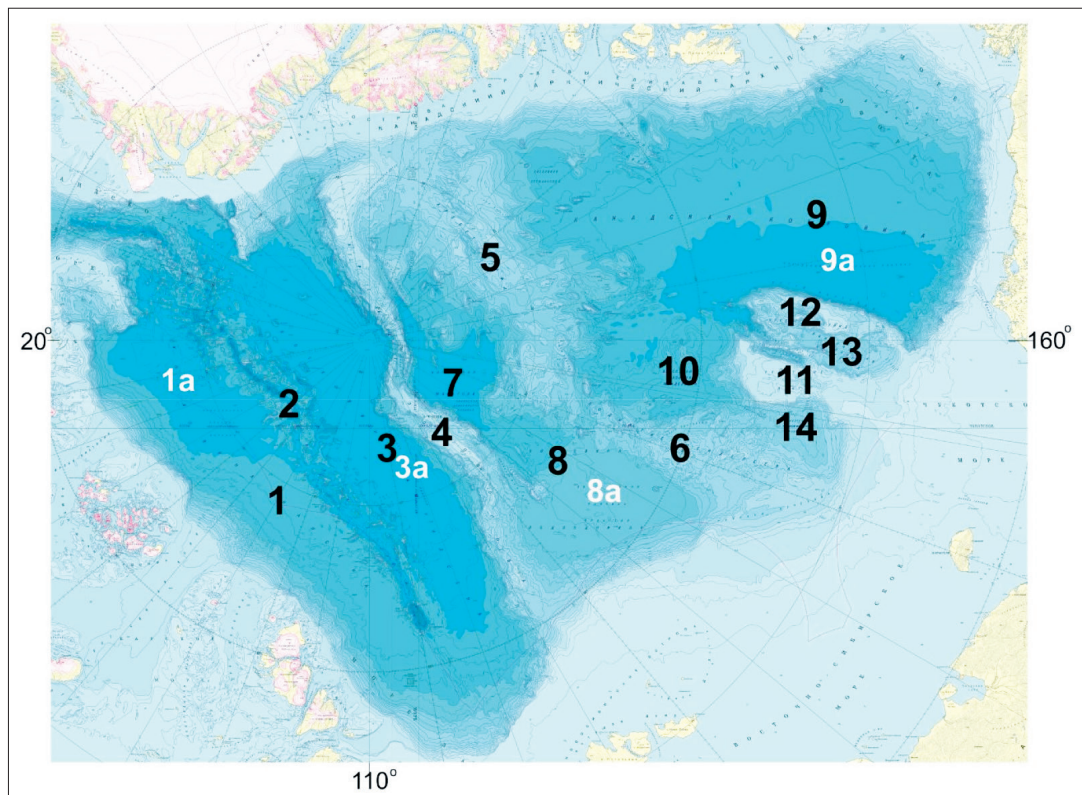


Рис. 1. Основные топонимы крупнейших и крупных форм рельефа дна Арктического бассейна, показанные на карте «Центрально-Арктический бассейн»: 1 — котловина Нансена; 1a — абиссальная равнина Баренца; 2 — хребет Гаккеля; 3 — котловина Нансена; 3a — Полярная абиссальная равнина; 4 — хребет Ломоносова; 5 — хребет Альфа; 6 — поднятие Менделеева; 7 — котловина Макарова; 8 — котловина Подводников; 9 — Канадская котловина; 9a — Канадская абиссальная равнина; 10 — абиссальная равнина Менделеева; 11 — Чукотское плато; 12 — хребет Нортунд; 13 — абиссальная равнина Нортунд; 14 — Чукотская абиссальная равнина

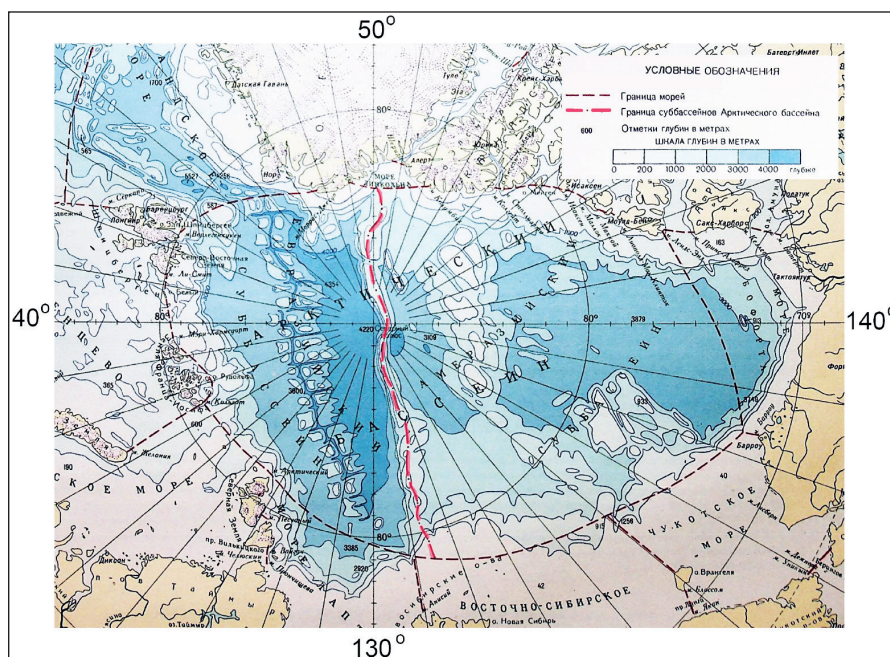


Рис. 2. Границы Евразийского и Амеразийского бассейнов (суббассейнов) согласно «Атласу Арктики»

В составе Евразийского бассейна различают котловины Нансена и Амундсена с разделяющим их срединно-океаническим хребтом Гаккеля (см. рис. 1). При этом часть дна котловины Нансена занимает абиссальная равнина Баренца, а часть дна котловины Амундсена — Полярная абиссальная равнина. Границы указанных равнин геоморфологически не выражены. Таким образом, ни дна котловин Евразийского бассейна целиком, ни их части за пределами абиссальных равнин Полярной и Баренца не имеют официальных названий. На практике нередко выходят из положения, используя термины: «абиссальная равнина Нансена» и «абиссальная равнина Амундсена», что представляется понятным, удобным и оправданным, тем более, что в свое время такое предложение уже было опубликовано [2]. Топонимика хребта Гаккеля детально не разработана и выходит за рамки данной статьи.

Амеразийский бассейн по сравнению с Евразийским имеет более сложное строение. Он включает Канадскую котловину, а также хребты Ломоносова и Альфа, поднятие Менделеева, Чукотское плато вместе с котловинами (Макарова, Подводников и др.), разделяющими эти поднятия. При этом все указанные формы, за исключением Канадской котловины, объединяются в Центрально-Арктическую область поднятий (ЦАОП). Это неофициальное название области на практике широко используется геологами и геофизиками [2], [15], [16]–[19]. ЦАОП образует своеобразный «мост» между Евразией и Северной Америкой. С позиций, изложенных в российском частично пересмотренном представлении [20], вся эта область, за исключением глубоководной части котловины Макарова, представляет собой сложный террасированный континентальный склон [17], [18]. Не все крупные отрицательные формы Амеразийского бассейна имеют собственные названия, между поднятием Менделеева и Чукотским плато на картах можно встретить названия только равнин в днищах депрессий: «Чукотская абиссальная равнина» и «абиссальная равнина Менделеева», а сами котловины (или впадины), которые их включают, названий не имеют, что весьма затрудняет описание этих форм. Возможно, здесь так же, как и в Амеразийском бассейне, можно пойти по пути дублирования названий котловины и равнины в ее днище. Гораздо сложнее дело обстоит с котловинами Макарова и Подводников, а также с равнинами в их днищах. Необходимо различать эти две категории форм и, соответственно, относящиеся к ним термины. Противоречия и разночтения касаются также имен собственных в названиях данных объектов.

Вопрос унификации наименований подводного рельефа Арктического бассейна СЛО ставился неоднократно. Так, к середине 60-х гг. XX в., когда в США, Канаде и СССР имелся уже большой объем батиметрической информации, в рамках Международного геофизического года ученые США осуществили такую попытку [9], выступив с инициативой взаимного согласования топонимов рельефа дна с коллегами из СССР. Американские предложения были изложены в работе [10]. В результате отечественными исследователями согласованные топонимы были закреплены и представлены в работе [11]. При этом американская сторона согласилась со следующими ныне общепринятыми наименованиями основных форм рельефа СЛО:

- котловина Нансена (американское название Nansen Basin [10]);
- котловина Амундсена (американское название Fram Basin [10]);
- котловина Макарова (Makarov Basin);
- Сибирская абиссальная равнина (Siberia Abyssal Plain, американское название Fletcher Plain [21]);
- абиссальная равнина Врангеля (Wrangel Abyssal Plain), взамен ранее использовавшегося названия «котловина Толля» [6];
- хребет Гаккеля (Gakkel Ridge, американские названия: Nansen Ridge, Mid-Oceanic Ridge [21]);
- хребет Ломоносова (Lomonosov Ridge);
- поднятие Менделеева (Mendelev Rise);
- Чукотское плато (Chukchi Plateau)
- Чукотская абиссальная равнина (Chukchi Abyssal Plain);
- абиссальная равнина Менделеева (Mendelev Abyssal Plain);
- хребет Нордвинд (Northwind Ridge).

Указанные топонимы, принятые для советских карт СЛО, появились и на зарубежных картах, а также легли в основу алфавитного перечня географических названий Генеральной батиметрической карты океанов — ГЕБКО (GEBCO) [22] (далее — газетир). Однако на картах Б. Хизена и М. Тарп [23], [24], выпущенных в 1971 и 1975 гг. по-прежнему были нанесены иные несогласованные названия. В дальнейшем вышеуказанные согласованные с зарубежными коллегами названия форм подводного рельефа не в полной мере использовались на зарубежных батиметрических картах СЛО и, в частности, на листе 5.17 ГЕБКО [25].

Топоним «котловина Макарова» был предложен Гаккелем в 1951 г. Приняв это наименование, зарубежные исследователи, в отличие от российских, по-другому трактуют ее границы. В газетире ГЕБКО [22] данная котловина включает глубоководную часть с отметками свыше 3800 м и более мелководную часть, так называемую *абиссальную равнину Врангеля*. При этом на юге глубоководной части обозначена Сибирская абиссальная равнина, северная граница которой морфологически никак не выражена. Таким образом, ситуация с котловинами Евразийского бассейна, дно которых охарактеризовано топонимами лишь частично, повторяется. Возможным решением проблемы могло бы стать распространение названия «Сибирская абиссальная равнина» на всю глубоководную часть котловины Макарова. Пойти в данном случае по пути дублирования названия котловины и равнины в ее днище не позволяет крайне запутанная ситуация с топонимом «котловина Макарова». Границы этой котловины, по данным газетира ГЕБКО [22], представлены на рис. 3, выделены желтым цветом.

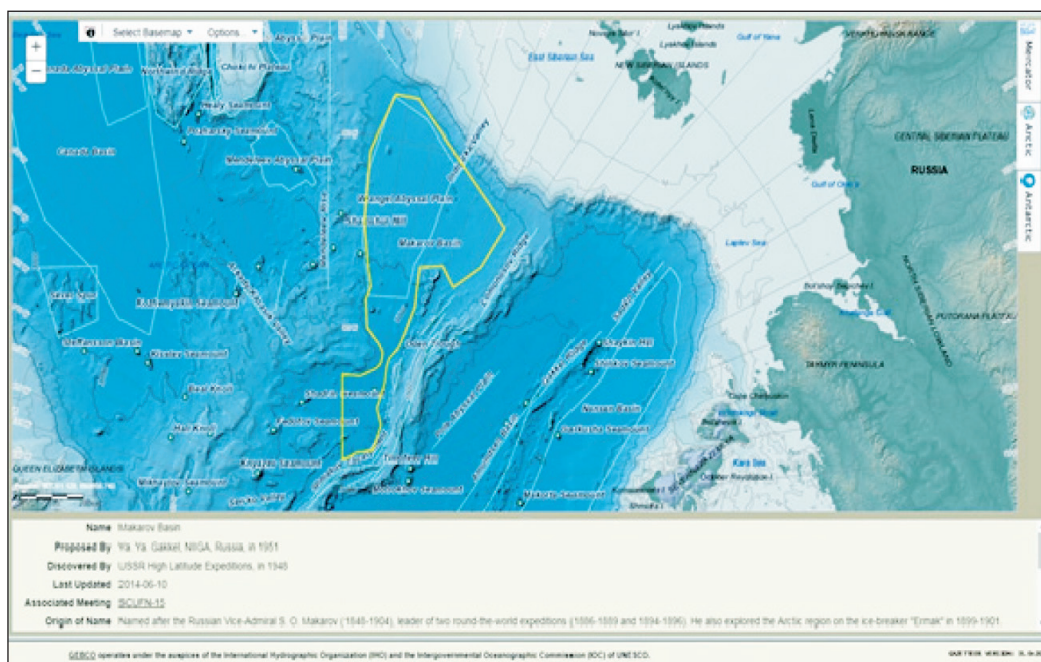


Рис. 3. Границы котловины Макарова (по данным газетира ГЕБКО)

В то же время отечественные исследователи для того, чтобы подчеркнуть различия в морфологии и глубинах отдельных частей котловины Макарова, нередко сужают ее границы до северной глубоководной части, называя остальную ее часть *котловиной Подводников*. Такое сужение границ котловины Макарова, в частности имеющее место на карте [1], противоречит не только газетиру ГЕБКО, но и отечественному справочнику 1993 г. [30], а также действующему Реестру географических названий [31]. Согласно сведениям Большой советской энциклопедии, котловина Подводников была открыта российскими исследователями в 1950 г. и в публикации [6] первоначально называлась *котловина Толля*. Остается невыясненным вопрос, почему этот введенный ранее топоним был изменен, а относительно мелководная часть дна этой «котловины» между поднятием Менделеева, хребтом Ломоносова и Новосибирским шельфом была названа *абиссальной*

равниной Врангеля. Это название закрепилось как в отечественной литературе [1], [9], так и в иностранной. Название *котловина Подводников* введено в работе [26].

В настоящее время в международной практике используются два официальных словаря топонимов форм подводного рельефа Мирового океана:

- газетир ГЕБКО [22], [27];
- газетир Фландрского морского института (VLIMAR Gazetteer), Marine Regions [28], [29].

Примечание. VLIZ — Vlaams Instituut voor de Zee (<http://www.vliz.be/>).

В отечественной практике в настоящее время используются:

- «Словарь географических названий форм подводного рельефа» [30];
- «Реестр наименований географических объектов континентального шельфа и исключительной экономической зоны Российской Федерации, а также географических объектов, открытых или выделенных российскими исследователями в пределах открытого моря и Антарктики на 27.12.2018» [31];

– «Руководство по нормализации названий подводных объектов Мирового океана» (1986 г.), утвержденное и введенное в действие приказом ГУГК от 17 января 1985 г., относящееся к временам существования СССР [32].

История газетира ГЕБКО началась в 1899 г. [33], когда морское международное научное сообщество впервые осознало необходимость исследования Мирового океана, включая классификацию форм подводного рельефа и присвоения им географических наименований. В настоящее время Международная гидрографическая Организация (МГО — ИГО) и Межправительственная океанографическая комиссия (МОК — ИОС) ЮНЕСКО продолжают работу на основе следующих документов:

- ИГО В6 «Standardization of Undersea Feature Names» [34];
- ИГО В8 «Gazetteer of Geographical Names of Undersea Features» [27].

Деятельность МГО/МОК в части классификации форм подводного рельефа и присвоения им наименований освещена в источнике [22]. Для постоянной текущей работы, касающейся рассмотрения и анализа поступающих заявок от национальных организаций по вопросам присвоения новых наименований формам подводного рельефа, создана подкомиссия SCUFN (Sub-Committee Undersea Features Names), работа которой освещается на сайте [34]. Практика и процедуры работы подкомиссии подробно изложены в работе [33] и документе [35].

Другим центром, выполняющим классификацию и каталогизацию форм подводного рельефа Мирового океана, в течение продолжительного периода времени оставалась американская организация US Board of Geographic Names (USBGN), которая создала специальный комитет: ACUF (Advisory Commute on Undersea Feature), выполняющий функцию ведения собственного газетира наименований форм подводного рельефа. Однако затем эти функции были переданы в ведение международно признанного центра, находящегося в Морском институте Фландрии (VLIZ) [28], где осуществляется ведение баз данных морских объектов, включая базу данных морских границ и газетир наименований форм подводного рельефа Мирового океана [28]. При этом во VLIZ разработан свой классификатор форм подводного рельефа и каталог форм подводного рельефа Мирового океана [29].

Одним из основных отечественных источников информации по топонимам дна Мирового океана является «Словарь географических названий форм подводного рельефа», подготовленный в Российском геологическом институте РАН в 1993 г. [30]. Он доступен только в виде типографского издания и содержит наименования форм подводного рельефа всего Мирового океана. Необходимо отметить, что в этом словаре для СЛЮ имеются топонимы, отсутствующие в обоих электронных газетирах (например, гора Остенсо — Ostenso Seamount) [30]. В «Руководстве по нормализации названий подводных объектов Мирового океана» [32] закреплены важнейшие положения, касающиеся наименования подводных объектов, употребления и правописания русских названий, передачи иноязычных названий и т. д. Это издание не потеряло своей ценности до настоящего времени, однако содержащийся в этом документе перечень основных терминов с определением

понятий нуждается в редактировании с позиций сегодняшнего дня. Так, в частности, представляется целесообразным уточнить определение терминов «абиссальная равнина», «глубоководная впадина», «желоб», «конус выноса», «материковый склон» и «склон», «плато», «срединная долина» и др. Географические координаты, указанные в российских документах [31], [32] для котловин Макарова и Подводников, а также для абиссальной равнины Врангеля, совпадают. При этом обращает на себя внимание тот факт, что названные объекты в приведенных координатах часто перекрывают друг друга, т. е. нечетко разграничены.

Каталог форм подводного рельефа Мирового океана ГЕБКО содержит 4221 наименований. В части СЛЮ он в настоящее время содержит более 190 топонимов, из которых 86 были предложены представителями нашей страны, включая 64 наименования, присвоенные в честь российских ученых и исследователей. С 2013 г. газетир ГЕБКО в электронном виде доступен на сайтах [22], [27]. Классификатор форм подводного рельефа ГЕБКО содержит 52 типа и может пополняться. Газетир VLIZ содержит только 135 форм подводного рельефа СЛЮ, включая 51 топоним, названный в честь российских ученых и исследователей, он доступен на сайте [28]. Классификатор форм подводного рельефа VLIZ содержит 51 наименование и немного отличается от дефиниций ГЕБКО. Анализ газетиров ГЕБКО и VLIZ показал, что большинство содержащихся в них топонимов рельефа СЛЮ совпадают, однако имеются отличия, включая различные терминологические категории одноименных объектов. В газетире VLIZ содержится 32 формы подводного рельефа СЛЮ, которые отсутствуют в газетире ГЕБКО и являются актуальными для геоинформационного анализа рельефа дна СЛЮ. Необходимо отметить отсутствие в газетире ГЕБКО следующих актуальных названий: котловина Наутилус (Nautilus Basin), отрог Наутилус (Nautilus Spur), проход Наутилус (Nautilus Gap), проход Арлис (Arlis Gap), отрог Арлис (Arlis Spur), отрог Геофизиков (Geofisikov Spur), отрог Марвин (Marvin Spur), долина Гидрографов, долина Седова. При этом проход «Наутилус», отроги «Геофизиков» и «Марвин», долины «Седова» и «Гидрографов» нанесены на российскую карту «Центральный Арктический Бассейн» [1]. Газетиры ГЕБКО и VLIZ по-разному трактуют актуальные топонимы, представленные в следующей таблице:

№ п/п.	Газетир ГЕБКО	Газетир VLIZ
1	Абиссальная равнина Врангеля (Wrangel Abyssal Plain)	Равнина Врангеля (Wrangel Plain)
2	Абиссальная равнина Менделеева (Mendeleev Abyssal Plain)	Равнина Менделеева (Mendeleev Plain)
3	Чукотская абиссальная равнина (Chukchi Abyssal Plain)	Чукотская равнина (Chukchi Plain)
4	Абиссальная равнина Нордвинд (Northwind Abyssal Plain)	Равнина Нордвинд (Northwind Plain)

В газетире ГЕБКО отсутствует топоним «котловина Подводников», а отнесение в нем равнин Врангеля, Менделеева и Чукотской к абиссальным представляется неправомерным, поскольку их глубины относительно невелики, а сами эти равнины в морфологическом отношении представляют собой террасы, в ряде случаев переходящие по простирацию террасы соседних поднятий. Рассматриваемые равнины приподняты над дном соседних, более глубоких впадин и отделены от них невысокими склонами [17]–[19]. Согласно одному из распространенных определений, принятой в ГЕБКО, абиссальная равнина — это «плоская слегка наклонная или почти горизонтальная поверхность дна на абиссальных глубинах» [35, с. 2–12].

Общепринятого определения абиссальных глубин не существует, их диапазон трактуется весьма широко. Вероятно, поэтому весьма размытым оказался и термин «абиссальные равнины». Однако применительно к морской геологии и геоморфологии существенным является то обстоятельство, что абиссальные равнины принадлежат ложу океана и находятся в основании континентального подножия, т. е. подъема, согласно терминологии Конвенции и НТР, а если оно не сформировано, то в основании континентального склона. Поэтому такие абиссальные равнины заведомо должны иметь значительные глубины. Уточнение «как правило, на глубинах свыше 4000 м» или указание «на 4000–6000 м» имеется в ряде справочников. В частности, глубоководное дно

показано именно на глубинах от 4000 м на схемах, иллюстрирующих НТР [36]. Равнины Врангеля, Менделеева и Чукотская имеют глубины, соответственно, 2600–3000 м, 3200–3300 м и 2200–2400 м, т. е. далеко не достигают глубины 4000 м. Следует подчеркнуть, что в газетире VLIZ они совершенно обоснованно называются просто *равнины* (Plain).

Необходимость различать собственно абиссальные равнины от прочих равнин, расположенных за бровкой шельфа, приобретает особенное значение в свете проблемы ВГКШ России в Северном Ледовитом океане, поскольку, согласно Конвенции и НТР, абиссальные равнины, относящиеся к категории океанского дна, не могут быть включены в расширенный континентальный шельф. Что касается равнин Врангеля, Менделеева и Чукотской, то, как и вся ЦАОП, на основе геоморфологических и геолого-геофизических данных они рассматриваются как компоненты сложного террасированного континентального склона [20]. Не соответствует категории абиссальных равнин и дно котловины Подводников в целом. К собственно абиссальным в СЛО, согласно источнику [20], отнесены равнины в днищах полностью или преимущественно замкнутых впадин с глубинами свыше 3800 м, а именно равнины Нансена, Амундсена, Канадской и глубоководной части котловины Макарова. Напомним, что по зарубежным данным, равнина Врангеля является частью котловины Макарова (см. рис. 1). На иностранных картах [38], в том числе «IBCAO» [37], [39] наносится топоним «Makarov Basin», а в южной ее части выделяется «Wrangel Abyssal Plain».

На рис. 4 показано трехмерное изображение рельефа дна СЛО с батиметрическими профилями через котловину Макарова, (в ее официальных границах), а на рис. 5 дан составной батиметрический профиль. Данный профиль наглядно представляет террасированный характер дна. Котловина Макарова (в ее официальных границах согласно ГЕБКО) включает две террасы и три склона: первый склон от бровки шельфа до изобаты 2600 м; второй склон между изобатами 2800 и 3400 м; третий склон между изобатами 3400 и 3800 м, граничащий с Сибирской абиссальной равниной котловин Макарова. С целью упорядочивания предлагается за верхней террасой оставить исторически сложившееся название «равнина Врангеля», уточнив ее границы согласно современным данным. Площадку ниже расположенной террасы предлагается именовать «равнина Толля», восстановив тем самым историческую справедливость в отношении изначального названия данной формы рельефа [6]. Что касается топонима «котловина Подводников», то он присутствует преимущественно в отечественной литературе и на российских морских навигационных и батиметрических картах. Поэтому предлагается рассматривать его как общегеографический термин.

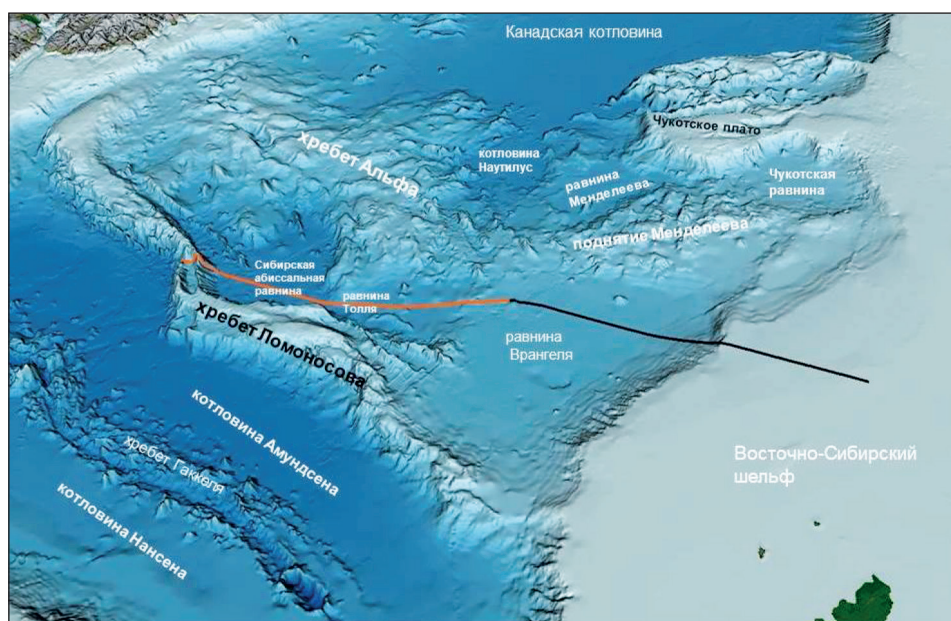


Рис. 4. Трехмерное изображение рельефа дна СЛО с батиметрическими профилями через котловину Макарова (красной линией показано положение профиля AR2014-06, черной — положение профиля AR2014-02)

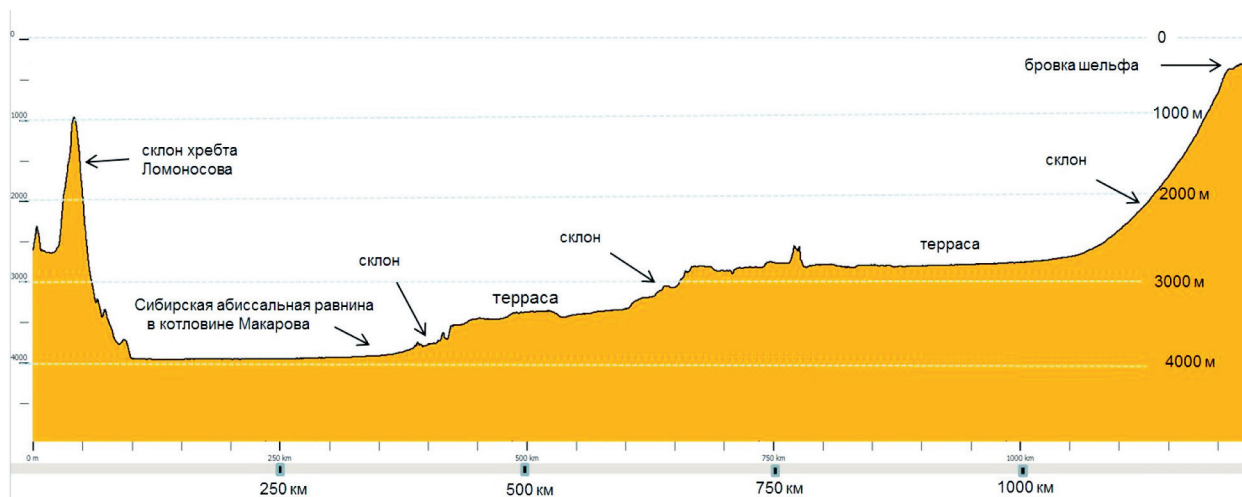


Рис. 5. Составной батиметрический профиль через котловину Макарова

Следует отметить, что наряду с газетирами главное значение имеет отображение топонимов на современных батиметрических картах СЛЮ. В настоящее время известны две официальные батиметрические карты СЛЮ.

1. Батиметрическая карта СЛЮ на основе цифровой модели IBCAO версии 3 [37], доступная в растровом формате [39]. Эта карта с регулярной сеткой размерностью 500 м подготовлена в масштабе 1: 5 000 00 для распечатки в формате A1. Она содержит только основные топонимы, представленные в газетире ГЕБКО [22], [27], [39].

2. Карта «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115), изд. Управления навигации и океанографии (УНиО) Министерства обороны РФ [1].

Батиметрическая карта «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115) была первоначально подготовлена Управлением навигации и океанографии (УНиО) Министерства обороны РФ на основе ретроспективных материалов съемок, выполненных в период 1954–1994 гг. и затем отредактирована с использованием современных российских съемок [40]. Эта карта была представлена международной научной общественности на рабочем совещании «Bathymetric mapping of the north polar seas» в 2002 г. [42], но не получила широкой известности за рубежом.

В 2017 г. батиметрическая карта «Центральный Арктический бассейн» была выпущена в новой редакции с учетом всех российских и ряда доступных современных батиметрических данных, полученных с использованием многолучевых съемок [40]. Источники современных данных для СЛЮ представлены в работе [41]. Карта «Центральный Арктический бассейн» содержит все топонимы, представленные в газетире ГЕБКО [22], [35], и ряд топонимов из газетира VLIZ, а также топонимы, принятые только в нашей стране.

Обсуждение (Discussion)

В последние годы целый ряд государств активно проводит батиметрические исследования в СЛЮ, направленные на обоснование своего расширенного континентального шельфа [41]. Среди новых топонимов, заявленных в SCUFN в последние годы, отметим предложения Швеции по наименованию двух морфоструктур на хребте Ломоносова, названных по имени научно-исследовательского ледокола: «Отрог Оден» (Oden Spur) и «Трог Одена» (Oden Trough). В 2010 г. Россия также провела специализированный рейс для батиметрического изучения своего арктического сектора в целях обоснования расширенного континентального шельфа [43], однако заявок на наименования вновь обнаруженных форм рельефа в SCUFN на основании полученных результатов пока сделано не было. Последней российской заявкой в SCUFN является топоним «поднятие Жилинского» (Zhilinsky Rise), утвержденный в 2015 г.

В Российской Федерации создание и ведение Государственного каталога географических названий осуществляются в соответствии с Федеральным законом от 18.12.1997 № 152-ФЗ «О наименованиях географических объектов» и Приказом Минэкономразвития России от 27.03.2014 № 172 «Об утверждении Порядка регистрации и учета наименований географических объектов, издания словарей и справочников наименований географических объектов, а также выполнения работ по созданию Государственного каталога географических названий».

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.02.2013 № 220-р работы по созданию «Государственного каталога географических названий и его ведению» (далее — Государственный каталог) осуществляет федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных». Внесению в Государственный каталог подлежат наименования географических объектов РФ, континентального шельфа и исключительной экономической зоны РФ, а также наименования географических объектов, открытых или выделенных российскими исследователями в пределах открытого моря и Антарктики.

На сайте Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр) представлен документ: «Реестр наименований географических объектов континентального шельфа и исключительной экономической зоны Российской Федерации, а также географических объектов, открытых или выделенных российскими исследователями в пределах открытого моря и Антарктики» на 27.12.2018 [31] (далее — Реестр). В части СЛЮ в Реестре содержатся 106 наименований географических объектов, включая 97 объектов, являющихся формами рельефа дна Арктического Бассейна и окраинных арктических морей РФ.

Реестр представлен в виде таблицы без связи с интерактивным картографическим изображением, что существенно затрудняет его использование с применением современных информационных технологий. В представленном виде Реестр нуждается в пополнении и редактировании. Ряд объектов, например, гора Машенкова, гора Тимофеева и гора Бурсевича включены в Реестр дважды, причем с разными номерами. Источником для составления Реестра, по-видимому, послужил газетир ГЕБКО [22], однако в Реестре отсутствует ряд форм рельефа дна, открытых российскими исследователями в пределах открытого моря и СЛЮ (например, гора Бухмеера). В Реестре приведены наименования географических объектов, находящихся не только в исключительной экономической зоне, но также в других морских зонах морей СЛЮ (например, бухта Коломийчука (адмиралтейский номер 5001815)), расположенная в Баренцевом море в пределах внутренних вод РФ. При таком подходе количество географических объектов, открытых российскими исследователями, которые необходимо включить в данный Реестр может быть существенно расширено. При этом рекомендуется руководствоваться справочником ГУНиО, в котором детально описаны географические названия объектов на побережьях морей СССР [44].

Выпускники Арктического факультета Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова внесли существенный вклад в изучение Арктики. Именами сотрудников Гидрографического института Главсевморпути, ВАМУ, а также выпускников гидрографов названы более 15 географических объектов в арктических морях РФ, которые по праву должны быть включены в Реестр. По нашему мнению, Реестр нуждается в пополнении и редактировании и в части наименований форм рельефа дна Арктического бассейна. Предлагается пересмотреть наименование абиссальных равнин: Чукотской, Менделеева и Врангеля, исключив их из категории абиссальных, а название «Сибирская абиссальная равнина» распространить на всю площадь дна глубоководной части котловины Макарова. На текущем этапе можно рекомендовать специалистам, работы которых связаны со СЛЮ, при употреблении тех или иных противоречивых топонимов делать необходимые уточнения в отношении их трактовки, а слово «абиссальная» в названии равнин Чукотской, Менделеева и Врангеля приводить в кавычках либо использовать наименования, закрепленные во VLIZ.

Для более обоснованного разграничения форм рельефа на повестке дня остро стоит вопрос о создании современной орографической карты Арктического бассейна в масштабах 1:5 000 000–1:10 000 000 с соблюдением принципа полной делимости площади. До настоящего времени в распоряжении широкого круга исследователей остаются лишь карты, на которых наименования даны в виде надписей. В газетире ГЕБКО границы отдельных объектов показаны очень обобщенно — в виде полигонов, линий или точек (см. рис. 3), причем известны примеры, когда линией или точкой обозначены объекты, имеющие значительную площадь. Полигоны, как правило, охватывают лишь центральную часть форм. Такое положение крайне затрудняет описание и географическую привязку районов работ, вносит недопонимание при обсуждении полученных результатов. Одним из предложений, призванных изменить сложившуюся ситуацию, в свое время стала мелкомасштабная орографическая схема А. Н. Ласточкина и Г. Д. Нарышкина [15], при создании которой впервые был сформулирован вопрос о линиях перегиба поперечного профиля дна как границах форм.

Также была предложена классификация форм с учетом их размеров соподчиненности, знака, удлиненности, замкнутости контура и др. Эти характеристики предлагалось представлять в виде составных элементов сложных индексов. В 1995 г., отчасти используя эти наработки, но уже без классификации и индексации форм, Г. Д. Нарышкин составил орографическую карту масштаба 1:5 000 000 со схемой орографических провинций, основанную на доступном на тот момент батиметрическом материале [45]. Ее несомненным достоинством был показ не условных, а конкретных геоморфологических границ. В настоящее время подобная работа может быть осуществлена на новом уровне батиметрической изученности и по усовершенствованной методике, в том числе с использованием элементов системно-морфологического подхода в науках о Земле, сформулированного А. Н. Ласточкиным [46].

Необходимо отметить, что географические наименования и соответствующие им объекты дна трансформировались по мере роста гидрографической изученности. В настоящее время удалось лишь частично унифицировать топонимы подводного рельефа СЛО через аппарат «Стандартизации наименований подводного рельефа» МГО [22]. К сожалению, в газетире ГЕБКО отсутствует ряд топонимов, актуальных для описания континентальной окраины Евразии и зоны основания континентального склона, связанных с частично пересмотренным представлением России [20].

Таким образом, рекомендуемые уточнения топонимов позволят более обоснованно защищать материалы частично пересмотренного Представления РФ на расширенный континентальный шельф в Северном Ледовитом океане в Комиссии по границам континентального шельфа, а также более качественно осуществлять географическую привязку районов исследований в Арктическом бассейне.

Выводы (Summary)

На основе результатов выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. База топонимов Арктического бассейна, в том числе в зоне заявленного расширенного шельфа РФ, не отвечает задачам сегодняшнего дня, географических названий форм рельефа дна недостаточно, существуют разночтения в трактовке уже имеющихся географических названий.

2. Газетиры ГЕБКО и VLIZ, а также отечественный Реестр [31], не являются в полной мере «синхронными». Требуется их актуализация путем взаимного согласования.

3. Необходимо уточнение и редактирование как Реестра [31], так и перечня основных понятий и терминов [32] силами заинтересованных ведомств под эгидой ФГБУ «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», ответственного за ведение «Государственного каталога географических названий».

4. С учетом современного повышенного интереса к Арктике целесообразно подготовить новый интерактивный реестр географических объектов Российского сектора СЛО, выделив в нем следующие разделы:

– названия форм подводного рельефа: отдельно по Арктическому бассейну, включая заявленный расширенный континентальный шельф, и отдельно по морским зонам (внутренних вод, территориального моря, прилегающей зоны и ИЭЗ);

– географические названия на побережьях арктических морей (мысы, заливы, проливы и т. д.).

При подготовке названий форм рельефа дна необходимо учитывать их геоморфологическую категорию, а также уточнять границы форм с учетом современных батиметрических данных.

5. Современная батиметрическая изученность СЛО позволяет уточнить и детализировать границы форм подводного рельефа. Существенным шагом вперед должно явиться создание картографических продуктов с полным покрытием площади дна, которые бы позволяли осуществлять географическую и геоморфологическую привязку любых пунктов и объектов исследования на уровне разных масштабов.

6. На вновь издаваемых российских картах и атласах СЛО предлагается использовать следующие топонимы:

– «Чукотская равнина» (взамен «Чукотская абиссальная равнина»);

– «равнина Менделеева» (взамен «абиссальная равнина Менделеева»);

– «равнина Нордвинд» (взамен «абиссальная равнина Нордвинд»);

– наименование «равнина Врангеля» (взамен «абиссальная равнина Врангеля») закрепить за верхней ступенью днища котловины Макарова, а ее нижнюю ступень предлагается назвать «равнина Толля».

7. На вновь издаваемых российских картах и в атласах СЛО предлагается использовать в дополнение к топонимам, закрепленным в ГЕБКО, следующие актуальные топонимы из газетира VLIZ: Nautilus Basin, Nautilus Spur, Nautilus Gap, Arlis Gap, Arlis Spur, Ostenso Seamount, а также рассмотреть вопрос об использовании остальных двадцати четырех топонимов из газетира VLIZ.

8. Предлагается обсудить в SCUFN вопрос о «синхронизации» указанных топонимов из газетира VLIZ и ГЕБКО, а также о расширении границ Сибирской абиссальной равнины на все дно глубоководной части котловины Макарова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Центральный Арктический бассейн. Масштаб 1:2 500 000, по параллели 75°. Проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — № 91115.
2. Кулаков Ю. Н. Морфоструктура бассейна Северного Ледовитого океана / Ю. Н. Кулаков, В. Д. Дибнер, Б. Х. Егизаров, Ю. Б. Казмин // Структура и история развития Северного Ледовитого океана. — Л.: ПГО Севморгеология, 1986. — С. 40–53.
3. О новых советских исследованиях и открытиях в Центральной Арктике // Изв. АН СССР. Сер. Геогр. — 1954. — № 5.
4. Острекин М. Е. Новейшие исследования Центральной Арктики / М. Е. Острекин // Природа. — 1954. — № 12.
5. Weber J. R. Maps of the Arctic Basin sea floor: a history of bathymetry and its interpretation / J. R. Weber // Arctic. — 1983. — Vol. 36. — No. 2. — Pp. 121–142.
6. Дибнер В. Д. Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана / В. Д. Дибнер, Я. Я. Гаккель, В. М. Литвин, В. Т. Мартынов, Н. Л. Шургаева // Тр. Науч.-исслед. ин-та геол. Арктики. — М.: Недра, 1965. — Т. 143. — С. 341–345.
7. Киселев Ю. Г. Глубинная геология Арктического бассейна / Ю. Г. Киселев. — М.: Недра, 1986. — 224 с.
8. Тарасов Б. В. Новое в рельефе дна Северного Ледовитого океана / Б. В. Тарасов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1961. — Вып. 8.
9. Beal M. A. The floor of the Arctic Ocean: geographic names / M. A. Beal, F. Edvalson, K. Hunkins, A. Molloy, N. Ostenso // Arctic. — 1966. — Vol. 19. — No. 3. — Pp. 214–219. DOI: 10.14430/arctic3430.
10. Остенсо Н. Континентальные окраины в Северном Ледовитом океане / Н. Остенсо // Геология континентальных окраин. — М., 1979. — Т. 3. — С. 101–112.
11. Трешников А. Ф. Географические наименования основных частей рельефа дна Арктического Бассейна / А. Ф. Трешников [и др.], // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1967. — № 27. — С. 5–15.

12. Агапова Г. В. Исследование и картографирование подводного рельефа в познании природы Мирового океана: дис. ... д-ра географ. наук / Г. В. Агапова. — М., 2008. — 46 с.
13. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. — ГУНиО МО СССР, 1980. — 190 с.
14. Зинченко А. Г. Орографическое деление и общая характеристика рельефа дна // Геология и полезные ископаемые России. / А. Г. Зинченко; ред. И. С. Грамберг, В. Л. Иванов, Ю. Е. Погребницкий. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — Т. 5. — Кн.1: Арктические моря. — С. 15–25.
15. Ласточкин А. Н. Орографическая схема Северного Ледовитого океана / А. Н. Ласточкин, Г. Д. Нарышкин // Вестник ЛГУ Сер. 7. — 1989. — № 2. — С. 45–54.
16. Нарышкин Г. Д. Геоморфологические аспекты внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Г. Д. Нарышкин [и др.]. — СПб.: ГУНиО, 2005. — 60 с.
17. Piskarev A. L. Geologic Structures of the Arctic Basin / A. L. Piskarev, V. A. Poselov, V. D. Kaminsky. — Springer, 2018. — 190 p.
18. Зинченко А. Г. Два типа континентальных склонов в Северном Ледовитом океане (в связи с проблемой внешней границы континентального шельфа) / А. Г. Зинченко // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане: сб. науч. тр.; под ред. В. Д. Каминского, Г. И. Аветисова, В. Л. Иванова. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. — С. 31–39.
19. Зинченко А. Г. Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте конвенции ООН по морскому праву 1982 г. / А. Г. Зинченко, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.
20. Частичное пересмотренное представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Резюме. — 2015. — 37 с.
21. Johnson G. L. Arctic Basin Morphology / G. L. Johnson, P. T. Taylor, P. R. Vogt, J. F. Sweeney // Polarforschung. — 1978. — Vol. 48. — № 1/2. — Pp. 20–30.
22. GEBCO Undersea Features Names Gazetteer. Arctic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/> (дата обращения: 02.11.2016).
23. Heezen B. C. Arctic Ocean Floor / B. C. Heezen // Supplement to National Geographic magazine. — 1971. — Vol. 140. — No. 4.
24. Heezen B. C. Map of the Arctic Region / B. C. Heezen, M. Tharp, M. Pinther. — 1975. — World 1:5,000,000.
25. General bathymetric chart of the oceans (GEBCO). Sheet 5.17: Scale 1:6 000 000. — Ottawa: Canadian Hydrographic Service, 1979.
26. Рассохо А. И. Подводный срединный Арктический хребет и его место в системе хребтов Северного Ледовитого океана / А. И. Рассохо [и др.] // Доклады Академии наук СССР. — 1967. — Т. 172. — № 3. — С. 659–662.
27. ИО-ИОС publication B-8 «Gazetteer of Geographical Names of Undersea Features [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/ (дата обращения: 15.06.2018).
28. VLIZ. Marine Gazetteer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.marineregions.org/gazetteer.php> (дата обращения: 15.06.2018).
29. VLIZ. Marine Gazetteer browser [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.marineregions.org/gazetteer.php?p=browser&id=1906&expand=true#ct> (дата обращения: 15.06.2018).
30. Агапова Г. В. Словарь географических названий форм подводного рельефа / Г. В. Агапова, Н. В. Виноградова, И. П. Кашникова. — М.: ГИН РАН, 1993. — 311 с.
31. Реестр наименований географических объектов континентального шельфа и исключительной экономической зоны Российской Федерации, а также географических объектов открытых или выделенных российскими исследователями в пределах открытого моря и Антарктики на 27.12.2018 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rosreestr.ru/upload/Doc/19-upr/Шельф-2018.pdf> (дата обращения: 30.12.2018).
32. ГКИНП-13-187–85. Руководство по нормализации названий подводных объектов мирового океана. — М.: ЦНИИГАиК, 1986. — 18 с.
33. Агапова Г. В. Географические названия рельефа дна Мирового океана / Г. В. Агапова, К. О. Добролюбова, Н. Н. Турко // Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д. Г. Панова (8–11 июня 2009 г., г. Ростов-на-Дону). — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. — С. 9–11.

34. Bathymetric survey for delineation of the extended continental shelf of the Russian Federation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.hydro-international.com/content/article/a-challenge-in-the-arctic?output=pdf> (дата обращения: 15.06.2018).

35. A digital gazetteer of the names of features on the seafloor [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/documents/b_6_e4_er_nov08.pdf (дата обращения: 15.04.2019).

36. Научно-техническое Руководство Комиссии по границам континентального шельфа. Пятая сессия. — Нью-Йорк, 3–14 мая 1999 г. — 90 с.

37. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ibcao.org/> (дата обращения: 10.06.2018).

38. Jakobsson M. Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor / M. Jakobsson, A. Grantz, Y. Kristoffersen, R. Macnab // Geological Society of America Bulletin. — 2003. — V. 115. — No. 12. — Pp. 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1.

39. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Printable maps [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.gebco.net/data_and_products/printable_map/ibcao_map/documents/ibcao_V3 (дата обращения: 25.06.2018).

40. Фирсов Ю. Г. Новая батиметрическая базы данных российского сектора Арктики в контексте заявки российской федерации на расширенный континентальный шельф в Северном Ледовитом океане / Ю. Г. Фирсов, С. В. Егоров // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения: сборник материалов II Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: Издательство «Политехника», 2017. — С. 489–492.

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

42. Glebovsky V. Y. New Russian bathymetry map of the central Arctic basin / V. Y. Glebovsky // Bathymetric mapping of the North Polar seas: Report of a Workshop at the Hawaii Mapping Research Group, University of Hawaii, Honolulu HI, USA, October 30-31, 2002. — University of Hawaii, 2002. — Pp. 9–11.

43. Glumov I. F. Challenge in the Arctic. / I. F. Glumov, A. F. Zenkov, D. M. Zhilin // Hydro International. — 2012. — № 1. — С. 27–30.

44. Справочник по истории географических названий на побережье СССР. Адмиралтейский номер 9012. — Изд. ГУНиО МО, 1976. — 322 с.

45. Орографическая карта Арктического бассейна. Масштаб 1:5 000 000 / Отв. ред. И. С. Грамберг, ил. ред. Г. Д. Нарышкин. — Хельсинки, Карттакус, 1995.

46. Ласточкин А. Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем) / А. Н. Ласточкин. — СПб.: Изд-во НИИХИ, 2002. — 762 с.

REFERENCES

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

2. Kulakov, Yu. N., V. D. Dibner, B. Kh. Egiazarov, and Yu. B. Kazmin. “Morfostruktura basseina Severnogo Ledovitogo okeana.” *Struktura i istoriya razvitiya Severnogo Ledovitogo okeana*. L.: PGO Sevmorgeologiya, 1986. 40–53.

3. “O novykh sovetskikh issledovaniyakh i otkrytiyakh v Tsentral’noi Arktike.” *Izv. AN SSSR. Ser. Geogr.* 5 (1954).

4. Ostrekin, M. E. “Noveishie issledovaniya Tsentral’noi Arktiki.” *Priroda* 12 (1954).

5. Weber, J. R. “Maps of the Arctic Basin sea floor: a history of bathymetry and its interpretation.” *Arctic* 36.2 (1983): 121–142.

6. Dibner, V. D., Ya. Ya. Gakkel’, V. M. Litvin, V. T. Martynov, and N. L. Shurgaeva. “Geomorfologicheskaya karta Severnogo Ledovitogo okeana.” *Tr. Nauch.-issled. in-ta geol. Arktiki. Vol. 143*. M.: «Nedra», 1965. 341–345.

7. Kiselev, Yu. G. *Glubinnaya geologiya Arkticheskogo basseina*. M.: Nedra, 1986.

8. Tarasov, B. V. “Novoe v rel’efe dna Severnogo Ledovitogo okeana.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 8 (1961).

9. Beal, M. A., F. Edvalson, K. Hunkins, A. Molloy, and N. Ostenso. "The floor of the Arctic Ocean: geographic names." *Arctic* 19.3 (1966): 214–219. DOI: 10.14430/arctic3430
10. Ostenso, N. "Kontinental'nye okrainy v Severnom Ledovitom okeane." *Geologiya kontinental'nykh okrain*. Vol. 3. M., 1979. 101–112.
11. Treshnikov, A. F., L. L. Balakshin, N. A. Belov, R. M. Demenitskaya, V. D. Dibner, A. M. Karasik, A. O. Shpaikher, and N. D. Shurgaeva. "Geograficheskie naimenovaniya osnovnykh chastei rel'efa dna Arkticheskogo Basseina." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 27 (1967): 5–15.
12. Agapova, G. V. Issledovanie i kartografirovaniye podvodnogo rel'efa v poznanii prirody Mirovogo okeana. Abstract of Dr. Diss. M., 2008.
13. *Atlas okeanov. Severnyi Ledovityi okean*. GUNiO MO SSSR, 1980.
14. Zinchenko, A. G. "Orograficheskoe delenie i obshchaya kharakteristika rel'efa dna." *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii. T. 5. Kn.1. Arkticheskie moray*. Edited by I.S. Gramberg, V.L. Ivanov, Yu.E. Pogrebetskii. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2004. 15–25.
15. Lastochkin, A. N., and G. D. Naryshkin. "Orograficheskaya skhema Severnogo Ledovitogo okeana." *Vestnik LGU. Ser.7 2* (1989): 45–54.
16. Naryshkin, G. D., A. A. Komaritsyn, A. V. Kavraiskii, V. A. Nesterov, A. B. Oparin, and B. S. Fridman. *Geomorfologicheskie aspekty vneshnei granitsy kontinental'nogo shel'fa Rossii v Arktike*. SPb.: GUNiO, 2005.
17. Piskarev, Alexey L., Victor A. Poselov, Valery D. Kaminsky. *Geologic Structures of the Arctic Basin*. Springer, 2018.
18. Zinchenko, A. G. "Dva tipa kontinental'nykh sklonov v Severnom Ledovitom okeane (v svyazi s problemoi vneshnei granitsy kontinental'nogo shel'fa)." *Sbornik nauchnykh trudov: «70 let v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane»*. SPb.: VNIIOkeangeologiya, 2018. 31–39.
19. Zinchenko, Anna G., and Yuri G. Firsov. "Geomorphology of the Arctic ocean in the context of The United Nations Convension on the law of the sea 1982." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.
20. *Chastichnoe peresmotrennoe predstavlenie Rossiiskoi Federatsii v Komissiyu po granitsam kontinental'nogo shel'fa v otnoshenii kontinental'nogo shel'fa Rossiiskoi Federatsii v Severnom Ledovitom okeane*. 2015.
21. Johnson, Galen, P. T. Taylor, P. R. Vogt, and J. F. Sweeney. "Arctic basin morphology." *Polarforschung* 48.1/2 (1978): 20–30.
22. GEBCO Undersea Features Names Gazetteer. Arctic. Web. 2 Nov. 2016 <<http://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/>>.
23. Heezen, B. C. "Arctic Ocean Floor." *Supplement to National Geographic magazine* 140.4 (1971).
24. Heezen, B. C., M. Tharp, and M. Pinther. *Map of the Arctic Region*. 1975. World 1:5,000,000
25. *General bathymetric chart of the oceans (GEBCO). Sheet 5.17: Scale 1:6 000 000*. Ottawa: Canadian Hydrographic Service, 1979.
26. Rassokho, A. I., L. I. Senchura, R. M. Demenitskaya, A. M. Karasik, Yu. G. Kiselev, and N. K. Timoshenko. "Podvodnyi sredinnyi Arkticheskii khrebet i ego mesto v sisteme khrebtov Severnogo Ledovitogo okeana." *Doklady Akademii nauk SSSR* 172.3 (1967): 659–662.
27. IHO-IOC publication B-8 «Gazetteer of Geographical Names of Undersea Features. Web. 15 June 2018 <https://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/>.
28. VLIZ. Marine Gazetteer. Web. 15 June 2018 <<http://www.marineregions.org/gazetteer.php>>.
29. VLIZ. Marine Gazetteer browser. Web. 15 June 2018 <<http://www.marineregions.org/gazetteer.php?p=browser&id=1906&expand=true#ct>>.
30. Agapova, G. V., N. V. Vinogradova, and I.P. Kashnikova. *Slovar' geograficheskikh nazvanii form podvodnogo rel'efa*. M.: GIN RAN, 1993.
31. Reestr naimenovaniy geograficheskikh ob'ektov kontinental'nogo shel'fa i isklyuchitel'noi ekonomicheskoi zony Rossiiskoi Federatsii, a takzhe geograficheskikh ob'ektov otkrytykh ili vydelennykh rossiiskimi issledovatelyami v predelakh otkrytogo morya i Antarktiki na 27.12.2018. Web. 30 Dec. 2018 <<https://rosreestr.ru/upload/Doc/19-upr/Шельф-2018.pdf>>.
32. *GKINP-13-187-85. Rukovodstvo po normalizatsii nazvanii podvodnykh ob'ektov mirovogo okeana*. M.: TsNIIGAiK, 1986.
33. Agapova, G. V., K. O. Dobrolyubova, and N.N. Turko. "Geograficheskie nazvaniya rel'efa dna Mirovogo okeana." *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya*

D.G. Panova. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuNTs RAN, 2009. 9–11.

34. Bathymetric survey for delineation of the extended continental shelf of the Russian Federation. Web. 15 June 2018 <<https://www.hydro-international.com/content/article/a-challenge-in-the-arctic?output=pdf>>.

35. A digital gazetteer of the names of features on the seafloor. Web. 15 April 2019 <https://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/documents/b_6_e4_er_nov08.pdf>.

36. *Nauchno-tehnicheskoe Rukovodstvo Komissii po granicam kontinentalnogo shelfa*. Pjataja sessija. Nju-Jork, 3-14 maja 1999 g.

37. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean. Web. 10 June 2018 <<http://ibcao.org/>>.

38. Jakobsson, M., A. Grantz, Y. Kristoffersen, and R. Macnab. "Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor." *Geological Society of America Bulletin* 115.12 (2003): 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1.

39. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Printable maps. Web. 25 June 2018 <www.gebco.net/data_and_products/printable_map/ibcao_map/documents/ibcao_V3>.

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

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

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

43. Glumov, I. F., A. F. Zenkov, and D. M. Zhilin. "A challenge in the Arctic. Bathymetric survey for delineation of the extended continental shelf of the Russian Federation." *Hydro International* 1 (2012): 27–30.

44. *Spravochnik po istorii geograficheskikh nazvanii na poberezh'e SSSR. Admiralteiskii nomer 9012*. Izd. GUNiO MO, 1976.

45. Gramberg, I. S., and G. D. Naryshkin, eds. *Orograficheskaya karta Arkticheskogo basseina*. Masshtab 1:5 000 000. Khel'sinki, Karttakesus, 1995.

46. Lastochkin, A. N. *Sistemno-morfologicheskoe osnovanie nauk o Zemle (geotopologiya, strukturnaya geografiya i obshchaya teoriya geosistem)*. SPb.: Izd. NIIKhI, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фирсов Юрий Георгиевич —

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

Зинченко Анна Георгиевна —

старший научный сотрудник
Всероссийский научно-исследовательский
институт Геологии и минеральных
ресурсов Мирового океана
(ВНИИОкеангеология)
190121, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, Английский пр. 1
e-mail: anna_zinchenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Firsov, Yury G. —

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

Zinchenko, Anna G. —

Senior Researcher
The All-Russia Scientific Research Institute
of Geology and Mineral Resources of the World
Ocean named after academician I. S. Gramberg»
(VNIIOkeangeologia)
1 Anglisky Av., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: anna_zinchenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2019 г.

Received: February 27, 2019.

IMPACT OF VESSEL DIMENSIONS AND DRAFT ON THE QUALITY OF INTEGRATED HYDROGRAPHIC SURVEYS

R.V. Ivanov, D.A. Polubelov

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

A comparative analysis of the quality of the bottom relief data obtained during the operation of two hydrographic vessels of different characteristics with pre-installed on them, identical in composition, hydrographic complexes is performed. The hydrographic vessels are examined using which the analyzed data are collected. The complexes of hydrographic equipment used in the data collection process are also considered. The methodology of shooting in the work area and the conditions under which the comparative analysis was carried out are described in detail. The problems arising from the area survey using equipment complexes based on a multipath echo sounder and side-scan sonar under adverse weather conditions, the presence of high wind waves and swell are discussed in detail. The results of the vessels average deviation from the working profiles depending on their size under the different weather conditions are given. Examples of the multibeam echo sounder data and operation of an underwater positioning system obtained using incorrect sound speed profiles are given. The results obtained during the calculation of the average number of distortions on the data from the side-scan sonar per 1 km of the working profile are presented. The necessity of further research of this issue is substantiated. The data were obtained in the process of areal survey of the Barents Sea water area in the region of Novaya Zemlya Island in the period from September to October 2016. During this period of navigation in the Barents Sea, the strong winds often interfere with the hydrographic surveys. The main purpose of this analysis is to assess the impact of the hydrographic vessel selection on the quality of the data obtained in the areas with the adverse weather conditions.

Keywords: hydrographic surveys, selection of watercraft, data quality, turnaround times.

For citation:

Ivanov, Roman V., and Denis A. Polubelov. "Impact of vessel dimensions and draft on the quality of integrated hydrographic surveys." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.2 (2019): 332–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-332-339.

УДК 551.506

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ОСАДКИ СУДНА НА КАЧЕСТВО ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Р. В. Иванов, Д. А. Полубелов

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

Выполнен сравнительный анализ качества данных о рельефе дна, полученных в процессе работы двух различных по своим характеристикам гидрографических судов с одинаковыми по своему составу гидрографическими комплексами. Рассмотрены гидрографические суда, с помощью которых осуществлялся сбор анализируемых данных, а также рассмотрены комплексы гидрографического оборудования, используемые в процессе сбора данных. Подробно описана методика выполнения съемки в районе работ и условия, при которых осуществлялся сравнительный анализ. Подробно описаны проблемы, возникающие при выполнении площадного обследования с помощью комплексов оборудования на базе многолучевого эхолота и гидролокатора бокового обзора при неблагоприятных погодных условиях, наличии высоких ветровых волн и зыби. Приведены результаты среднего отклонения судов от рабочих профилей в зависимости от их размеров при различных погодных условиях. Приведены примеры данных многолучевого эхолота и работы системы подводного позиционирования, полученные с использованием неверных профилей скорости звука. Приведены результаты, полученные в ходе подсчета среднего количества искажений на данных с гидролокатора бокового обзора на 1 км рабочего профиля. Обоснована необходимость дальнейших исследований данного вопроса. Данные были получены в процессе площадного обследования акватории Баренцева моря в районе

о. Новая земля в период с сентября по октябрь 2016 г. — в период навигации в Баренцевом море, когда не редко преобладают сильные ветра, мешающие выполнению гидрографических изысканий. Результатом данного анализа является оценка влияния выбора гидрографического судна на качество получаемых данных в районах с неблагоприятными погодными условиями.

Ключевые слова: гидрографические изыскания, выбор плавсредства, качество данных, сроки выполнения работ.

Для цитирования:

Иванов Р. В. Влияние размеров и осадки судна на качество выполнения комплексных гидрографических изысканий / Р. В. Иванов, Д. А. Полубелов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 332–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-332-339.

Введение (Introduction)

Одной из основных задач утвержденной президентом Российской Федерации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» является создание морских пространственных данных. Для этой цели необходимо обеспечить морские зоны, находящиеся под юрисдикцией Российской Федерации и акватории Мирового океана высокоточной съемкой рельефа дна с использованием современных технических средств. В области науки и технологии данного рода деятельность будет направлена на реализацию программы развития научно-исследовательского флота Российской Федерации.

Зачастую при необходимости выполнения гидрографических изысканий¹ [1] на этапе планирования работ выбор плавсредства основывается на минимальных допустимых нормах в заданных акваториях. Данный подход к выбору судна, как показано в настоящем исследовании, приводит к снижению качества съемки [2] и увеличению сроков выполнения работ. Исходя из этого было принято решение на примере сравнительного анализа данных, полученных гидрографическими промерными партиями ОАО «Управление перспективных технологий» во время площадного обследования Баренцева моря, отразить зависимость выбора судна от качества получаемых данных в неблагоприятных погодных условиях. Данные были получены и сопоставлены в ходе одновременного выполнения съемки рельефа дна двумя разными судами в одном районе, в одних и тех же погодных условиях с использованием одинаковых комплексов гидрографического оборудования.

Целью статьи является доказательство существующей гипотезы о прямой взаимосвязи весогабаритных характеристик судна-носителя и качества выходных данных установленного на нем оборудования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для выполнения изысканий использовались два идентичных комплекса гидрографического оборудования на базе многолучевого эхолота (МЛЭ) «R2sonic2024» и гидролокатора бокового обзора (ГБО) «Edgetech 4200».

В состав комплексов входили:

- система позиционирования «Applanix POS MV» с датчиком динамических перемещений;
- система подводного позиционирования «HiPar350» и транспондер, закрепляемый непосредственно у буксируемого ГБО;
- МЛЭ «R2sonic 2024» и «Valeport SVS» (датчик измерения скорости звука на уровне приемной антенны эхолота);
- Valeport SVP датчик для измерения скорости звука по всему профилю в месте погружения.
- ГБО «EdgeTech4200»;
- пакет программного обеспечения для регистрации и обработки данных «Qinsy/Qimera/Sonarwiz».

¹ РД 31.74.04-2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2002. 88 с.

Перед началом работ комплексы были протестированы и откалиброваны с использованием общепринятых методик [3]–[4]. Рассмотрим данные, полученные в ходе выполнения работ с использованием научно-исследовательского судна «KONINGIN JULIANA» (далее — судно 1) и морского буксира-спасателя «АТРИЯ» (далее — судно 2), оборудованного спускоподъемными штангами для МЛЭ и системами подводного позиционирования, а также специальной лебедкой для осуществления буксировки ГБО (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики используемых судов

Характеристики	Научно-исследовательские суда	
	«KONINGIN JULIANA»	«АТРИЯ»
Длина	47,6	58,3
Ширина	9,8	12,6
Средняя осадка	3,9	4,88
Водоизмещение	1008 т	1618

В процессе выполнения работ галсы съемки для обоих судов строились с учетом направления волны (носом к волне) с целью минимизировать бортовую качку [5]. Каждые четыре часа с борта обоих судов в дрейфе осуществлялись спускоподъемные операции датчика измерителя скорости звука Valeport SVP [6]. Операции, осуществляемые с целью сбора данных о скорости звука по всему профилю в точках погружения, были необходимы для обработки данных, получаемых с комплексов на базе МЛЭ. Длина галсов выбиралась в зависимости от района выполнения работ и используемого оборудования. Так, галсы для площадного обследования с использованием МЛЭ не превышали 10 км из-за особенностей гидрологии в районе выполнения съемки и являлись одинаковыми по протяженности для обоих судов. В процессе выполнения работ на обоих судах велись полевые журналы с ежечастной фиксацией погодных условий в районе работ с целью проведения контрольной сверки перед финальным анализом. Для анализа были выбраны 600 линейных километров площадной съемки рельефа дна с использованием МЛЭ, полученных в ходе работы обоих судов. Данные были выбраны в процессе выполнения съемки как в благоприятных погодных условиях, так и в условиях, не являющихся таковыми в полной мере.

Результаты (Results)

По результатам данных, полученных с помощью комплексов на базе МЛЭ в неблагоприятных погодных условиях, можно выделить ряд основных факторов, которые оказывают влияние на качество получаемых данных. Так, удержание судна на рабочем профиле в момент записи данных становится затруднительным из-за порывов ветра и увеличивающегося волнения [7]. Подобная проблема лишает возможности записывать данные с заявленным равномерным перекрытием, а также может поставить под угрозу безопасность судна в момент разворотов, что зачастую становится причиной временной приостановки работ (рис. 1).

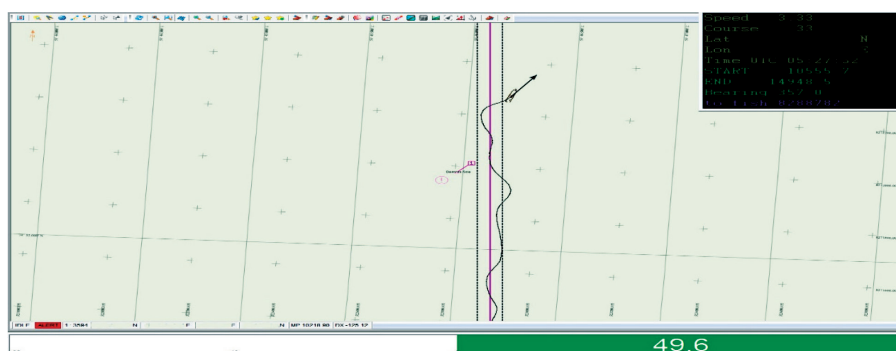


Рис. 1. Изображение, полученное с навигационного экрана с расположением судна относительно запланированного галса, стрелкой направления его движения и треком движения

В табл. 2 приведены данные волнения моря и высоты волны, а также среднее отклонение от рабочего профиля в процессе съемки.

Таблица 2

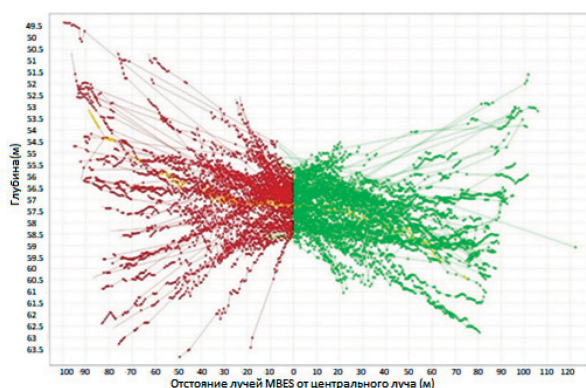
Среднее отклонение судов от заданного профиля

Волнение моря, баллы по шкале Борфорта	Высота волны, м	Зыбь, м	Среднее отклонение от рабочего профиля, м, на 1 км	
			Судно 1	Судно 2
1	0,25	0,1	0,5	Менее 0,5
2	0,25–0,5	0,3	1,5	0,5
3	0,5–0,7	0,6	3	1,2
4	0,75–1,25	0,8	5	2,2
5	1,25–2	1	7	4
6	2–3	1,5	10–12	6

Результаты наблюдений, приведенные в табл. 2, показывают, что среднее отклонение судов от рабочих профилей напрямую связано с ухудшением погодных условий [8], что, в свою очередь, оказывает влияние на уменьшение процента перекрытия в зависимости от глубины и ставит под угрозу безопасность мореплавания в зависимости от класса используемого судна и района работ [9].

Еще одной проблемой, оказывающей влияние на качество получаемых данных, выявленной в процессе работы при недостаточно благоприятных погодных условиях, является появление большого количества ошибочных измерений и пропусков данных, связанное с потерями сигнала приемной антенной МЛЭ [10]. Несомненно, это затрудняет процесс обработки полученных данных и снижает их качество в целом (рис. 2).

а)



б)

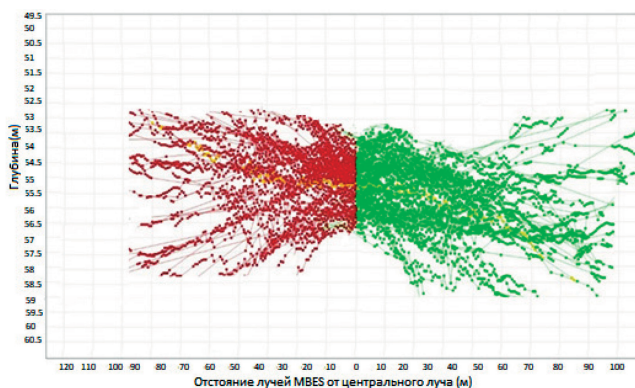


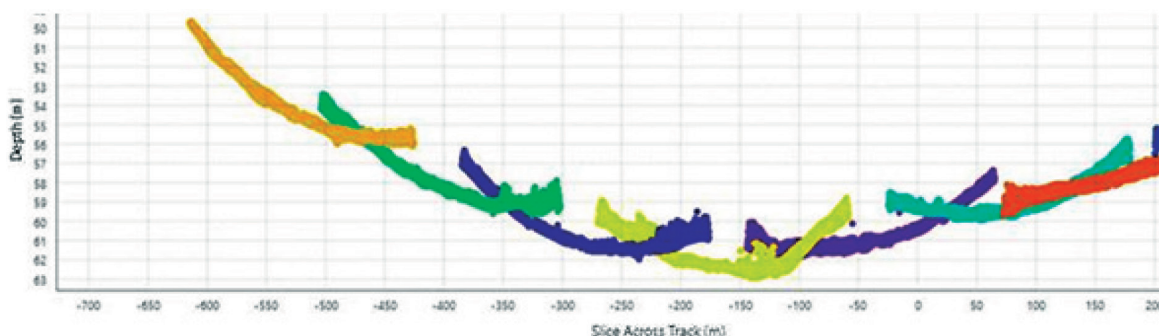
Рис. 2. Рельеф дна в разрезе, построенный по данным комплекса на базе МЛЭ с большим количеством ошибочных измерений и пропусков: а — судно 1; б — судно 2

Условные обозначения: красным цветом обозначены лучи, находящиеся слева от центрального по направлению движения судна, зеленым — лучи, находящиеся справа от центрального луча

Как видно из данных, полученных с промерного комплекса, установленного на судне 2 (см. рис. 2, б), количество ошибочных измерений и пропусков значительно меньше, чем из данных, полученных с промерного комплекса, установленного на судне 1 (см. рис. 2, а), при одних и тех же погодных условиях, что напрямую связано с мореходными качествами судна. Как известно, данные многолучевой съемки не могут являться корректными без учета данных вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). Изменение величины скорости звука на разных глубинах приводит к искривлению звуковых «лучей» — рефракции. Ухудшение погодных условий затрудняет или вовсе исключает выполнение спуско-подъемных операций, а отсутствие верных данных

по профилю ВРСЗ ведет к падению качества съемки. Так, на рис. 3, *а* видно появление рефракции лучей МЛЭ при использовании некорректных данных скорости звука.

а)



б)

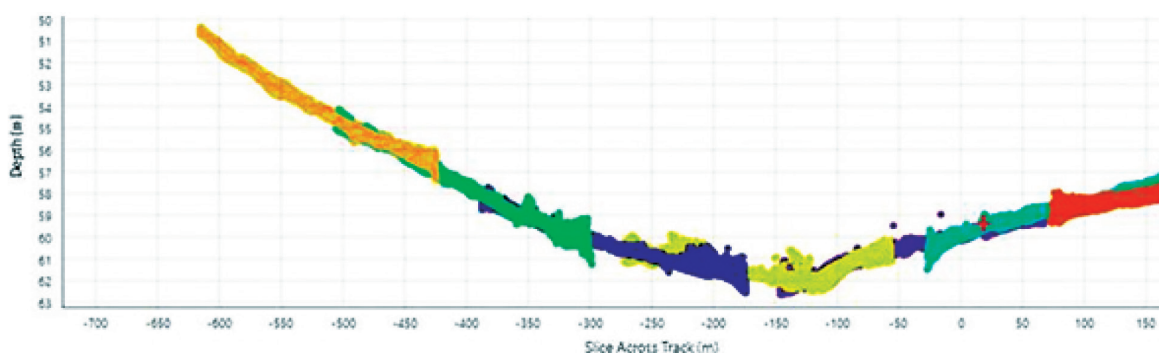


Рис. 3. Пример обработки участка съемки, выполненного с помощью промерного комплекса на базе МЛЭ: *а* — с неверными данными ВРСЗ и появлением рефракции; *б* — с использованием верного профиля скорости звука

Кроме того, при рассмотрении результатов работ комплексом на базе ГБО можно выделить несколько основных проблем. При использовании подводных систем позиционирования (Ніраp 350), в случае значительного ухудшения погодных условий, возникают трудности при приеме сигнала от маяка-ответчика, что делает определение положения буксируемого объекта (в данном случае «Edgetech- 4200») нестабильным. В дальнейшем это обстоятельство негативно сказывается на качестве получаемых изображений и точности их позиционирования [11] — рис. 4.

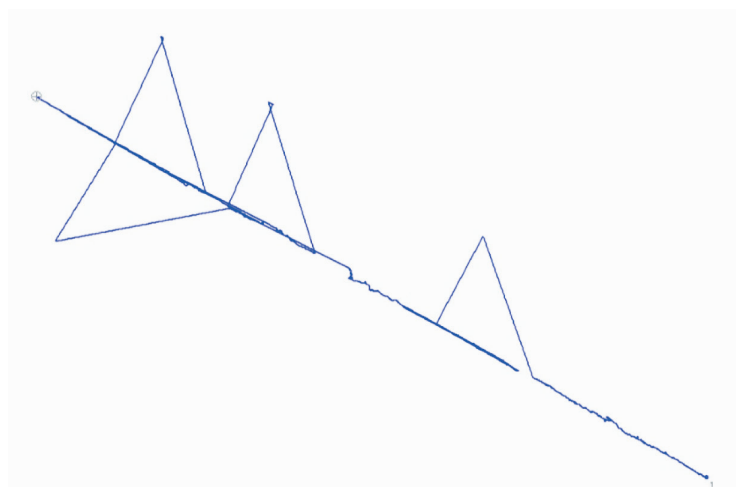


Рис. 4. Трек движения буксируемого объекта, построенный по данным системы подводного позиционирования, работающей в неблагоприятных погодных условиях

Для корректной работы системы подводного позиционирования необходим верный профиль ВРСЗ. Необходимо также отметить, что при нахождении судна курсом по направлению к волне существует эффект резкого натяжения и провисания буксировочного троса по мере преодоления судном волн, что, непременно, приводит к ухудшению качества поступающих данных. Смена курса на перпендикулярной волне с целью улучшения качества получаемых данных может поставить под угрозу безопасность судна и поэтому неприемлема [12]. На рис. 7 видны искажения данных ГБО в виде белых полос пропусков из-за рывков кабель-троса, а также нестабильной работы системы подводного позиционирования.



Рис. 7. Примеры данных съемки с использованием ГБО при высоком волнении моря

Таблица 3

Количество искажений на данных ГБО на 1 км

Волнение моря, баллы по шкале Бофорта	Высота волны, м	Среднее количество искажений на данных ГБО на 1 км
1	0,25	0
2	0,25–0,5	0
3	0,5–0,7	1–2
4	0,75–1,25	2–3
5	1,25–2	5
6	2–3	>8

На рис. 5 отображены данные ГБО без сбоев системы подводного позиционирования и с отчетливыми тенями объектов на дне.

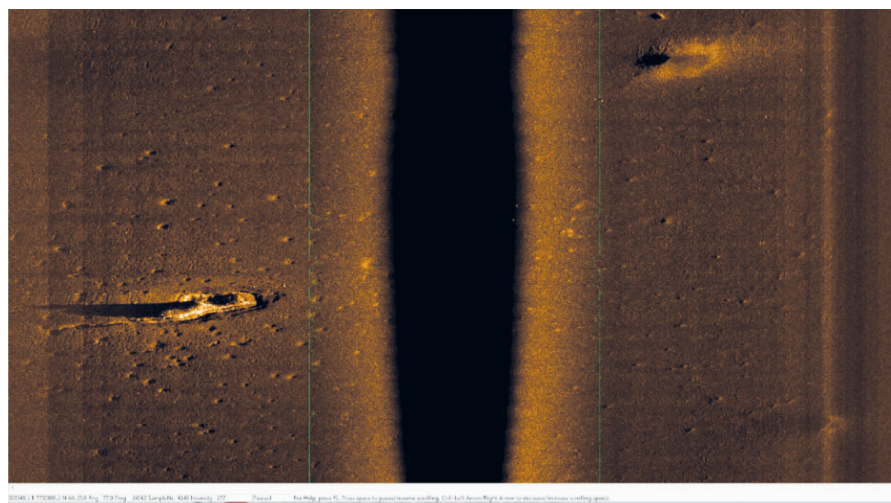


Рис. 6. Примеры данных съемки с использованием ГБО в хороших погодных условиях

Обсуждение (Discussion)

Из представленных примеров видно, что качество получаемых данных в процессе выполнения гидрографических изысканий, в районах с преобладающими сложными погодными условиями, в большой степени зависит от выбора судна. Представленный анализ рассматривает влияние размеров судна на качество данных, полученных с помощью одного комплекса оборудования из ряда большого количества аналогов. Это не позволяет рассмотреть вопрос более подробно. В дальнейшем, при наличии большего количества данных площадного обследования, полученных в ходе выполнения гидрографических изысканий с использованием различных комплексов оборудования и судов в различных погодных условиях, предлагается систематизировать и проанализировать их с целью выявления закономерностей. Подобный более подробный анализ позволит разработать свод рекомендаций по подбору оборудования с учетом тех или иных погодных условий и района плавания.

Заключение (Conclusion)

На основании выполненного исследования можно сделать вывод о том, что чем выше мореходные качества судна и чем увереннее оно способно удерживаться на рабочем профиле за счет своей конструкции в неблагоприятных погодных условиях, тем выше качество получаемых данных.

В дальнейшем планируется провести ряд исследований, направленных на выполнение сравнительного анализа данных, полученных в процессе выполнения гидрографических изысканий в различных погодных условиях с использованием различных гидрографических судов и комплексов оборудования с целью составления свода рекомендаций по подбору судов оптимальной конфигурации для выполнения того или иного вида гидрографических работ в тех или иных погодных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IHO manual on Hydrography. Publication C-13. — 1st Edition. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. — 511 p.
2. *Фирсов Ю. Г.* Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 171–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-3-171-179.
3. *Godin A.* The calibration of shallow water multibeam echo-sounding systems. M. Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 190 / A. Godin. — Canada: The University of New Brunswick, 1998. — 182 p.
4. *Zheng C.* Study on the calibration method of USBL system based on ray tracing / C. Zheng, Z. Li, D. Sun // 2013 OCEANS-San Diego. — IEEE, 2013. — Pp. 1–4. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741034
5. *Крюков Н. Д.* Учет течений, генерируемых ветром, при плавании судов / Н. Д. Крюков, В. А. Шматов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 23–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-23-29.
6. *Lenz M.* Sound velocity profiles in fluids for process monitoring / M. Lenz, E. Kühnicke // SENSOR + TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings. — 2011. — Pp. 147–152.
7. *Васильев В. В.* Тенденции изменения климата на севере в Российской Арктике / В. В. Васильев, В. С. Селин // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2015. — № 1 (44). — С. 5–13.
8. *Глухов В. Г.* Детализация параметров опасных для мореплавания явлений погоды / В. Г. Глухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2 (48). — С. 27–28.
9. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна судоходных морских и речных акваторий (ПГС № 4, ч. 2). — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 236 с.
10. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — Изд-во «Нестор-история», 2010. — 121 с.
11. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна судоходных морских и речных акваторий. Требования к съемке. Организация и методы выполнения съемки, обработки и представления данных съемки (ПГС № 4, ч. 1). — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 61 с.
12. Климат России. — СПб.: Гидрометеиздат, 2004. — 196 с.

REFERENCES

1. *IHO manual on Hydrography. Publication C-13*. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011.
2. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-3-171-179.
3. Godin, Andre. *The calibration of shallow water multibeam echo-sounding systems*. M.Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 190. Canada: The University of New Brunswick, 1998.
4. Zheng, Cuie, Zhao Li, and Dajun Sun. "Study on the calibration method of USBL system based on ray tracing." *2013 OCEANS-San Diego*. IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741034.
5. Kryukov, N. D., and V. A. Shmatkov. "Account of wind currents in navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 23–29. DOI: 10.21821 / 2309-5180-2015-7-3-23-29.
6. Lenz, Michael, and Elfgard Kühnicke. "Sound velocity profiles in fluids for process monitoring." *SENSOR + TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings*. 2011. 147–152.
7. Vasilyev, V. V., and V. S. Selin. "Trends of climate change on the north and in the Russian Arctic." *The North and the Market: Forming the Economic Order* 1(44) (2015): 5–13.
8. Glukhov, V. G. "Detalizatsiya parametrov opasnykh dlya moreplavaniya yavlenii pogody." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(48) (2007): 27–28.
9. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby № 4. S»emka rel'efa dna sudokhodnykh morskikh i rechnykh akvatorii (PGS № 4 Chast' 2)*. SPb.: UNiO MO RF, 2014.
10. Firsov, Yu.G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov»: ucheb. posobie*. Izd-vo «Nestor-istoriya», 2010.
11. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby № 4. S»emka rel'efa dna sudokhodnykh morskikh i rechnykh akvatorii. Trebovaniya k s»emke. Organizatsiya i metody vypolneniya s»emki, obrabotki i predstavleniya dannykh s»emki (PGS № 4 Chast' 1)*. SPb.: UNiO MO RF, 2014.
12. *Klimat Rossii*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Роман Владимирович —
аспирант, инженер-гидрограф
Научный руководитель: Шматков Владимир
Антонович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: answerwww@yandex.ru, kaf_nge@gumrf.ru
Полубелов Денис Алексеевич —
аспирант
Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: hydrohwhite@gmail.com, kaf_nge@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTTHORS

Ivanov, Roman V. —
Postgraduate, Hydrographic Engineer
Supervisor: Shmatkov, Vladimir 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: answerwww@yandex.ru, kaf_nge@gumrf.ru
Polubelov, Denis A. —
Postgraduate
Supervisor:
Shmatkov, Vladimir 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: hydrohwhite@gmail.com, kaf_nge@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 Февраля 2019 г.
Received: February 9, 2019.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-340-348

THE EFFECT OF INCREASING THE BLADES NUMBER OF SHIP'S BLADE PROPELLER ON HIS VIBRO-ACTIVITY AT OPERATION IN THE UNEVEN VELOCITY FIELD BEHIND THE VESSEL HULL

A. N. Pinchuk¹, V. K. Korzhov¹, L. Y. Vishnevsky²

¹ — Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, Russian Federation

² — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The influence of the number of blades of the blade propeller on its vibro-active and propulsive qualities at operation in the uneven velocity field behind the vessel hull is considered in the paper. The analysis begins with the theoretical considerations, which give a reason to believe that increasing the blades number should lead to decreasing the value of hydrodynamic forces affecting the propeller vibro-activity. This analysis takes into account the known property of any blade propeller, which consists in the fact that at operation in the uneven velocity field, not all of its harmonics are manifested on it in a power relation. This property is called filtration, when the blade propeller reacts to the emphasis from the harmonics of the field, multiples of the number of blades. Since the harmonics as the members of the Fourier series are decreasing in magnitude, then the magnitude of the variable forces on the blade propeller should decrease with increasing the number of its blades. To confirm the obtained theoretical result, the experimental data obtained under the laboratory conditions are used. They are based on the results of the acoustic measurements obtained in the cavitation pipe. At the same time, it is assumed that the contribution of the blade propeller is made mainly by the power acoustic radiation of the functioning propeller in the uneven velocity field at frequencies multiple to the blades number per frequency of its rotation. Thus, when obtaining the experimental data, not directly variable forces on the blade propeller are measured, but only its force acoustic radiation is recorded. The study is based on the fundamental principle: there are variable forces - there is an acoustic field, there are no variable forces - there is no acoustic field. The experimental data have shown that an increase in the blades number on the blade propeller favorably affects reducing the propeller vibration characteristics. Along with this, it is also noted that with a decrease in the propeller vibration characteristics, a decrease in the propulsive quality of the propeller is observed.

Keywords: propeller, impeller, blade propeller, vibro-activity, turbulence, noise emission, uneven flow.

For citation:

Pinchuk, Alexander N., Victor K. Korzhev, and Leonid Y. Vishnevsky. "The effect of increasing the blades number of ship's blade propeller on its vibro-activity at operation in the uneven velocity field behind the vessel hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 340–348. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-340-348.

УДК 629.12: 532.582.5.037

ВЛИЯНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧИСЛА ЛОПАСТЕЙ СУДОВОГО ЛОПАСТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ НА ЕГО ВИБРОАКТИВНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ В НЕРАВНОМЕРНОМ ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ЗА КОРПУСОМ СУДНА

А. Н. Пинчук¹, В. К. Коржев¹, Л. И. Вишневский²

¹ — Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

² — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрено влияние числа лопастей лопастного движителя на его виброактивные и пульсивные качества при работе в неравномерном поле скоростей за корпусом судна. Анализ начинается на основе теоретических положений, которые дают основание считать, что увеличение числа лопастей

должно приводить к снижению величины гидродинамических сил, влияющих на виброактивность движителя. При этом принято во внимание известное свойство любого лопастного движителя, состоящее в том, что при работе в неравномерном поле скоростей не все гармоники поля проявляются на нем в силовом отношении. Такое свойство называется «фильтрацией», при этом лопастной движитель реагирует на упор от гармоник поля, кратных числу лопастей. Поскольку гармоники как члены ряда Фурье являются убывающими по величине, величина переменных сил на лопастном движителе должна убывать с увеличением числа его лопастей. Для подтверждения полученного теоретического результата были использованы экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях. В их основе лежат результаты акустических измерений, полученные в кавитационной трубе. При этом предполагалось, что вклад лопастного движителя вносится главным образом силовым акустическим излучением работающего движителя в неравномерном поле скоростей на частотах, кратных числу лопастей, на частоту его вращения. Таким образом, при получении экспериментальных данных были измерены не непосредственно переменные силы на лопастном движителе, а регистрировалось лишь его силовое акустическое излучение. В основу исследования был заложен следующий принцип: есть переменные силы — есть и акустическое поле, нет переменных сил — нет и акустического поля. Экспериментальные данные показали, что увеличение числа лопастей на лопастном движителе благоприятно сказывается на снижении вибрационных характеристик движителя. Наряду с этим отмечается, что при снижении вибрационных характеристик движителя наблюдалось также снижение пропульсивного качества движителя.

Ключевые слова: гребной винт, рабочее колесо, лопастной движитель, виброактивность, турбулентность, шумоизлучения, неравномерный поток.

Для цитирования:

Пинчук А. Н. Влияние увеличения числа лопастей судового лопастного движителя на его виброактивность при работе в неравномерном поле скоростей за корпусом судна / А. Н. Пинчук, В. К. Коржев, Л. И. Вишневецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 340–348. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-340-348.

Введение

При строительстве кораблей и судов до Первой мировой войны количество лопастей гребного винта (ГВ) в большинстве случаев ограничивалось тремя. Пропульсивные качества таких движителей были наиболее высокими, доходившими при испытании их моделей в свободной воде до 75 % и более, поскольку относительная толщина сечений лопастей этих ГВ была небольшая и составляла ~ 2 % на рабочих радиусах в зависимости от дискового отношения. Поэтому при оптимальном распределения нагрузки по радиусу (при заданном упоре) потери были невелики (рис. 1) — [1], чем и объяснялся столь высокий КПД этих движителей, работающих в отсутствии кавитации.

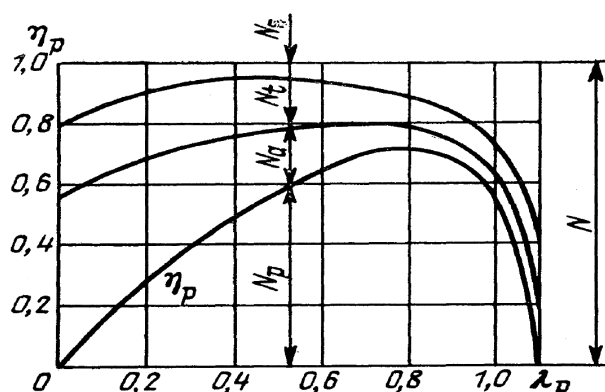


Рис. 1. Баланс мощности, затрачиваемой на работу гребного винта:

N — полная мощность, потребляемая винтом; N_p — полезная мощность;
 N_a — потеря мощности на осевые вызванные скорости; N_t — потеря мощности на закручивание потока;
 N_e — потеря мощности на профильное сопротивление лопастей

Положение существенно изменилось в период Второй мировой войны и после нее. Во время Второй мировой войны появились постоянно совершенствующиеся акустические средства

обнаружения кораблей и судов, а также жесткие санитарные нормы, относящиеся к их уровням вибрации (шумности), что не могло не сказаться на необходимости изменения характеристик ГВ — основного источника шумности и вибрации движущегося судна. Данное обстоятельство усиливалось еще и тем, что движитель работает непосредственно в окружающей среде, но не изолирован от нее в отличие от механизмов, работающих внутри корпуса судна. Природа возникновения шума от работающего движителя весьма многообразна и в зависимости от частоты шумоизлучения обусловлена влиянием различных источников (рис. 2) — [2].

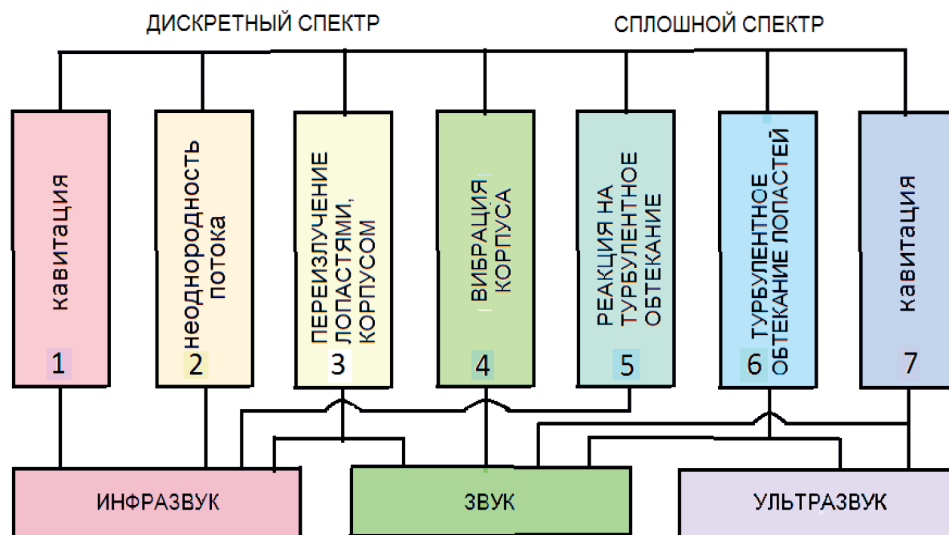


Рис. 2. Источники шумности гребного винта

Основной вклад в инфразвуковом диапазоне частот (до ~ 150 Гц) вносится неравномерностью потока, формирующегося под влиянием корпуса судна и переизлучением конструкцией движителя (его лопастями), а также реакцией на обтекание лопастей потоком в месте расположения движителя. Следует заметить, что дискретные составляющие уровней шума наблюдались бы и в равномерном потоке из-за наличия ограниченного числа несущих элементов движителя (звук вращения). Модулирование сплошной высокочастотной части спектра, связанной с кавитацией и турбулентным обтеканием, может проявляться в дискретных составляющих шума в низкочастотной области спектра, обусловленной изменением кавитации при вращении движителя вследствие изменения как глубины погружения, так и очага начальной кавитации [3]. Спектр акустического сигнала накладывается на естественный акустический шум, создаваемый морской поверхностью [4], [5]. Вклад в звуковой диапазон частот (150–2000 Гц) вносится работающими механизмами судна, турбулентностью потока при обтекании лопастей движителя и вибрацией корпуса, а также кавитацией, возникающей на лопастях движителя. К этому диапазону частот можно отнести и так называемый *кромочный шум*, который порождается вихрями, сходящими с выходящей кромки. Сход вихрей оказывает силовое воздействие на упругую лопасть, которая, в свою очередь, оказывает влияние на формирование сходящих вихрей и образование вибраций. В случае резонанса (совпадения частот действия сил, обусловленных сходом вихрей, и собственных частот колебания кромки) возникает «пение» винта [6].

Ультразвуковой диапазон (более 2000 Гц) обусловлен главным образом кавитацией и турбулентностью потока (шум вращения) при обтекании несущих элементов движителя и характеризуется сплошной частью спектра. Необходимо отметить, что возбуждение акустических возмущений корпуса винтом через воду и вал переизлучается обратно в среду на тех же частотах. Поэтому первоначальное выделение источника шума во многих случаях на практике затруднено [7]. По мере исследования изучаемого явления классификация, приведенная на рис. 2, должна уточняться и совершенствоваться. Вместе с тем существующие знания о данном явлении позво-

ляют спрогнозировать развитие конструкции движителя с целью снижения его уровней шумоизлучения и виброактивности, и относятся к числу несущих его элементов и к дискретным составляющим низкочастотной области спектра, обусловленных возникающими переменными силами на движителе при его работе в неравномерном потоке. Поэтому целью данной статьи является научная разработка способа уменьшения вибрационных характеристик движителя, что является актуальной задачей современного кораблестроения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка переменных сил на гребном винте. Как известно, гидродинамические характеристики движителя на заданном режиме его работы определяются главным образом шаговым

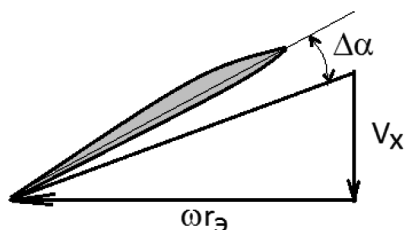


Рис. 3. Эквивалентное сечение

отношением и кривизной сечений. В случае неравномерного потока в месте расположения движителя существенную роль играет число лопастей Z . Проанализируем влияние числа лопастей на переменные силы, возникающие при работе движителя в неравномерном потоке. Заменим действие лопасти действием эквивалентного его сечения, расположенного на радиусе r_3 . Рассмотрим угол атаки $\Delta\alpha$ натекающего на рассматриваемое сечение потока без вызванных скоростей для простоты рассуждений, как показано на рис. 3.

На основе рис. 3 очевидны следующие соотношения [7]:

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{P}{2\pi r_3} - \arctg \frac{V_x}{\omega r_3}$$

$$\text{или } \tg \Delta\alpha \leq \frac{V_x}{\omega r_3} - \frac{P}{2\pi r_3}, \quad (1)$$

где V_x — скорость, натекающая на эквивалентное сечение;

n — частота вращения винта;

P — шаг винта на r_3 .

Последнее неравенство можно переписать в виде

$$\Delta\alpha \leq \frac{V_x}{\omega r_3} - \frac{P}{2\pi r_3}. \quad (2)$$

Представим V_x в виде частичной суммы ряда Фурье на интервале $0-2\pi$:

$$S_N(V_x, \theta) = \sum_0^N C_K e^{iK\theta}. \quad (3)$$

Поскольку, как известно, винт обладает фильтрующим свойством, то пульсация, например, упора и осевого момента на нем будет зависеть от гармоник неравномерного поля, кратных числу лопастей, т. е. от Z и mZ (где Z — число лопастей, $m = 1, 2, 3 \dots$). Если V_x — функция гладкая и дифференцируемая J раз, то для коэффициентов C_K справедлива следующая оценка:

$$C_K \sim 0 \left(\frac{1}{Z^i} \right). \quad (4)$$

Принимая равенства (2) и (3), получим следующее равенство в виде:

$$\Delta\alpha \leq \frac{V_0}{\omega r_M} - \frac{P}{2\pi r_M} + \sum_{l=Z}^{mZ} C_l e^{imZ\theta}. \quad (5)$$

Из равенства (5) следует, что переменная составляющая угла атаки $\Delta\tilde{\alpha}$ будет определяться третьим слагаемым в правой части этого выражения. На основании оценки (4) можно утверждать, что с увеличением числа лопастей Z $\Delta\tilde{\alpha}$ будет иметь следующий порядок стремления к нулю:

$$\Delta\tilde{\alpha} \sim 0 \left(\frac{1}{Z^J} \right). \quad (6)$$

Таким образом, на основании оценки порядка величин (6) следует, что пульсация упора с увеличением числа лопастей уменьшается, так как она линейным образом связана с переменным углом атаки — $\Delta\alpha$. Следует также ожидать снижение уровней шума, обусловленного пульсацией упора. В соответствии с формулой Ламба, его уровни на заданном расстоянии R определяются по формуле [7], [8]:

$$L = \frac{f_z \tilde{F}}{2\pi c R}. \quad (7)$$

Здесь $\tilde{F}$ — переменная сила на винте, возникающая при работе его в неравномерном поле скоростей; c — скорость звука; $f_z = Zn$ — частота, на которой происходит акустическое излучение; Z — число лопастей винта; n — частота его вращения.

Принимая во внимание оценку порядка величин (6), видно, что уровни, определяемые по формуле (6), имеют порядок в рассматриваемом радиусе R . Таким образом, с увеличением числа лопастей силовая составляющая уровней шума при работе винта в неравномерном потоке должна уменьшаться. При этом вывод о влиянии числа лопастей на уровни шума, вызванные работой движителя, остался бы без изменений. Данное обстоятельство объясняется тем, что за счет вызванных скоростей поле скоростей в месте расположения движителя выравнивается и его эпюра становится более гладкая, т. е. допускает дифференцирование большее число раз, чем это использовано при оценке (4). Что касается материала, из которого изготавливается движитель, в частности его лопасти, то в настоящее время физические представления о его звукоизлучении при работе не связываются непосредственно с материалом. Считается, например, что использование композитных материалов приведет к снижению его массы на 20–30 % и к внутреннему демпфированию, что может проявиться в снижении уровней шума на 2–3 дБ [9].

Результаты испытаний многолопастного движителя и их анализ. Для оценки вывода о влиянии числа лопастей на уровни шума, обусловленные силовой составляющей на лопастных частотах, были проведены испытания в кавитационной трубе специальных движителей (КТСД). В качестве испытуемых моделей использовались 9- и 24-лопастные рабочие колеса (РК) водометного движителя (ВД) [10], [11]. Результаты гидродинамических испытаний приведены на рис. 4 с направляющим аппаратом. На рис. 5 показаны результаты кавитационных испытаний, на которых число кавитации определялось по моменту исчезновения рассматриваемого вида кавитации на лопастях. На рис. 6 приведены акустические измерения, выполненные в 1/3 полосе частот при $J = 0,97$ (в качестве сравнительных данных на этих рисунках представлены аналогичные результаты, относящиеся к традиционным РК). На рис. 7 и 8 показаны эскизы размещения движителей на рабочем участке и общий вид 24-лопастного РК [12].

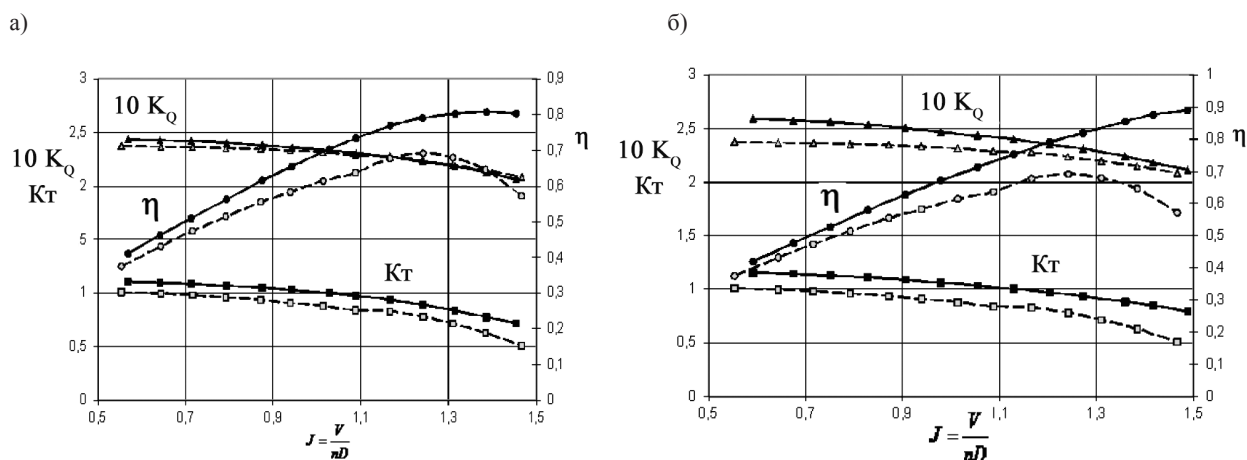


Рис. 4. Сравнение гидродинамических характеристик рабочих колес водометного движителя 8368 (а) и 8294 (б) при $n = 20 \text{ с}^{-1}$
Условные обозначения: — — — — соответствующее рабочее колесо;
— — — — 24-лопастное рабочее колесо

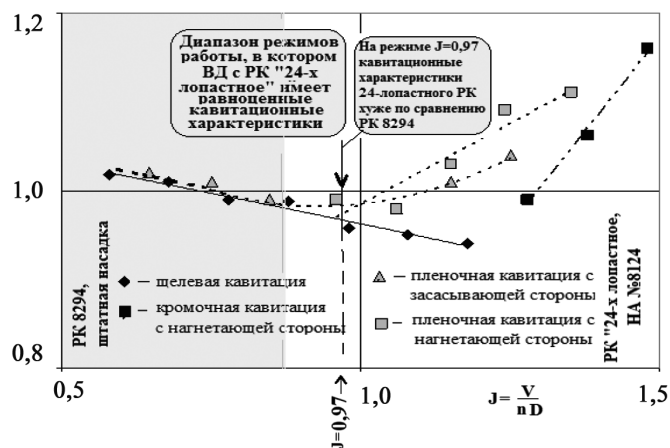


Рис. 5. Сравнение кавитационных характеристик ВД с РК 24-лопастное и ВД с РК № 8294

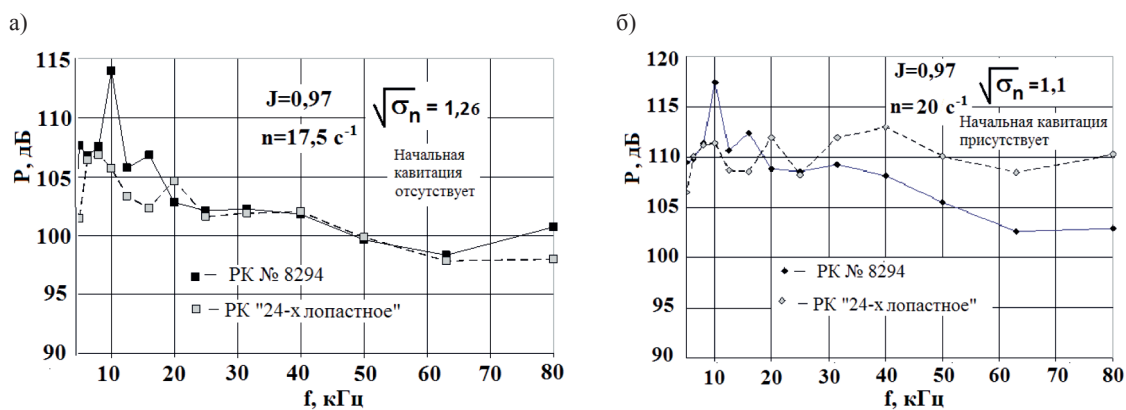


Рис. 6. Уровни шума в 1/3 октавной полосе частот ВД, оснащенного поочередно РК № 8294 и РК 24-лопастное с НА № 8124:
а — при отсутствии начальной кавитации; б — при наличии начальной кавитации

На рис. 7 приведены эскизы размещения рабочего колеса в проточной части ВД [2], на рис. 8 показан общий вид созданного РК модели ВД [1].

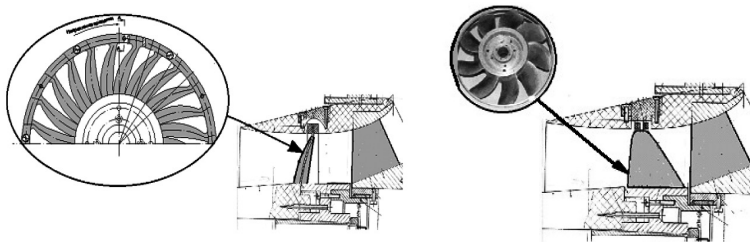


Рис. 7. Эскизы размещения РК в проточной части ВД

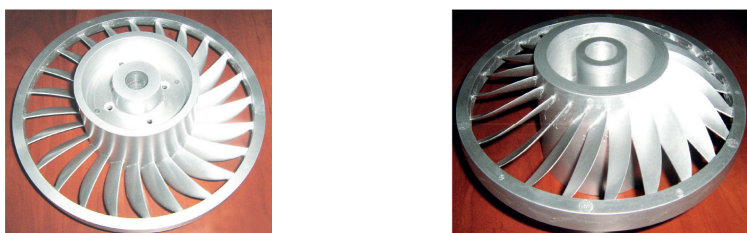


Рис. 8. Общий вид созданного РК модели ВД

При проведении сравнительных испытаний не производилось измерение переменных сил на лопастной частоте работы модели РК непосредственно, а были получены косвенные сравнительные экспериментальные данные, относящиеся к акустическим записям в 1/3 октавной полосе частот. На рис. 7 и 8 показаны записи работы РК в режиме $J = 0,97$, из которых видно, что с увеличением частоты вращения РК с $n = 17,5 \text{ с}^{-1}$ до 20 с^{-1} при $J = 0,97$ с развитием кавитации наблюдается подъем уровней шума в высоком диапазоне частот (см. рис. 6, б). Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что при отсутствии кавитации (см. кривые уровней на рис. 6, а) многолопастный РК имеет меньшие уровни шума в диапазоне частот 4–19 кГц и 62–80 кГц по сравнению с традиционным вариантом. Этот же результат в диапазоне частот 4–19 кГц наблюдается и на рис. 6, б, при наличии начальной стадии кавитации. Это подтверждается результатами визуального ее наблюдения, представленными на рис. 5.

Эффект снижения уровней шума в указанном диапазоне частот можно объяснить тем, что РК за счет большего числа лопастей менее чувствителен с точки зрения возникновения на нем переменных гидродинамических сил при работе в неравномерном поле скоростей в месте его расположения. Поэтому менее активен акустически с точки зрения силового шумоизлучения в отсутствии кавитации. Имеющееся различие в гидродинамических характеристиках многолопастного РК и традиционного РК в режиме $J = 0,97$ (см. рис. 4) по выполненным оценкам не имеет принципиального значения на сделанный вывод в отношении переменных сил. При этом необходимо учитывать, что число лопастей проектируемого движителя следует назначать с учетом наличия соответствующих гармоник в неравномерном потоке и ухода от резонансных частот корпуса судна. Бесконечное увеличение числа лопастей движителя может оказаться в общем случае нецелесообразным.

Заключение (Conclusion)

Представленные результаты показывают, что наряду с бесшумным распределением нагрузки вдоль радиуса движителя увеличение числа лопастей может рассматриваться как средство, направленное на снижение его шумности. Однако если первое средство главным образом используют для снижения кавитационного шума и увеличения тем самым критической скорости корабля (судна), то второе можно рассматривать как средство, уменьшающее виброактивность движителя и снижающее уровни низкочастотного шума. Оба направления в снижении шума сопровождаются уменьшением пропульсивного качества движителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышинский Э. Л. Борьба с вибрацией и шумом в инженерной практике / Э. Л. Мышинский. — СПб: ЦНИИ им. А. Н. Крылова, 2011. — 239 с.
2. Савенко В. В. Электродвижение и малошумность / В. В. Савенко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 1 (379). — С. 134–140.
3. Пинчук А. Н. Выравнивание потока в месте расположения движителей путем подачи газа в гидродинамический след от выступающих частей корпуса судна / А. Н. Пинчук, В. К. Коржев, Л. И. Вишневский // Эксплуатация морского транспорта. — 2018. — № 4 (89). — С. 79–90.
4. Zapevalov A. S. Modeling the spectrum of infrasonic hydroacoustic radiation generated by the sea surface under storm conditions / A. S. Zapevalov, K. V. Pokazeev // Acoustical Physics. — 2016. — Vol. 62. — Is. 5. — Pp. 554–558. DOI: 10.1134/S1063771016050195.
5. Mel'nikov N. P. Mesoscale spatial variability in seawater cavitation thresholds / N. P. Mel'nikov, V. P. Elistratov // Acoustical Physics. — 2017. — Vol. 63. — Is. 2. — Pp. 196–203. DOI: 10.1134/S1063771017010092.
6. Коржев В. К. Особенности гидродинамики и акустики, нетрадиционных корабельных гребных винтов с подвижным креплением лопастей к ступице / В. К. Коржев, Л. И. Вишневский // Сборник научных трудов ЧВВМУ им. П. С. Нахимова. — Севастополь, 2016. — Вып. № 2. — С. 84–92.
7. Тогуняц А. Р. Модельные исследования гидродинамических характеристик многофункционального двухступенчатого лопастного движителя за корпусом судна / А. Р. Тогуняц, Л. И. Вишневский, С. В. Капранцев // Морской вестник. — 2016. — № 4 (60). — С. 35–38.
8. Лобачев М. П. Проектирование и гидродинамический расчет водометных движителей / М. П. Лобачев, А. А. Русецкий, А. Ю. Яковлев. — СПб: ЦНИИ им. А. Н. Крылова, 2014. — 141 с.

9. Zapevalov A. S. Radar measurements of the vibration amplitude / A. S. Zapevalov, A. N. Pinchuk, V. M. Burdyugov // *Technical Physics*. — 2018. — Vol. 63. — Is. 12. — Pp. 1851–1853. DOI: 10.1134/S1063784218120216.

10. Тогуняц А. Р. Гидродинамические аспекты работы соосных гребных винтов противоположного вращения с электрической передачей мощности / А. Р. Тогуняц, Л. И. Вишневский // *Морской вестник*. — 2018. — № 3(67). — С. 83–86.

11. Вишневский Л. И. Практические возможности устранения щелевой кавитации в водомётных двигателях насосного типа / Л. И. Вишневский, В. П. Ильин, О. П. Орлов, В. Г. Хорошев, А. В. Чалов // Межведомственная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ». Ч 2: Труды конференции. — СПб: ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 2015. — С. 108–116.

12. Вишневский Л. И. Нетрадиционные судовые гребные винты, разработанные на основе подвижного крепления лопастей к ступице / Л. И. Вишневский // Математические модели и их приложения: сборник научных трудов, посвященный 80-летию со дня рождения А. Г. Терентьева. — Чебоксары: Чувашский государственный ун-т им. И. Н. Ульянова, 2016. — С. 46–83.

REFERENCES

1. Myshinskii, E. L. *Bor'ba s vibratsiei i shumom v inzhenernoi praktike*. SPb: TsNII im. Krylova A. N., 2011.
2. Savenko, Valentin Viktorovich. "Electric propulsion and low noise." *Proceedings of Krylov state scientific center* 1(379) (2017): 134–140.
3. Pinchuk, A. N., V. C. Korzhev, and L. I. Vishnevsky. "Flow alignment in motor position through a gas supply to a hydrodynamic next from serving parts of ship's housing." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(89) (2018): 79–90.
4. Zapevalov, A. S., and K. V. Pokazeev. "Modeling the spectrum of infrasonic hydroacoustic radiation generated by the sea surface under storm conditions." *Acoustical Physics* 62.5 (2016): 554–558. DOI: 10.1134/S1063771016050195.
5. Mel'nikov, N. P., and V. P. Elistratov. "Mesoscale spatial variability in seawater cavitation thresholds." *Acoustical Physics* 63.2 (2017): 196–203. DOI: 10.1134/S1063771017010092.
6. Korzhev, V. K., and L. I. Vishnevskii. "Osobennosti gidrodinamiki i akustiki, netraditsionnykh korabel'nykh grebnykh vintov s podvizhnym krepлением lopastei k stupitse." *Sb. nauch. tr. ChVVMU im. P.S. Nakhimova*. Is. 2. Sevastopol', 2016. 84–92.
7. Togunyats, A. R., L. I. Vishnevskii, and S. V. Kaprantsev. "Model'nye issledovaniya gidrodinamicheskikh kharakteristik mnogofunktsional'nogo dvukhstupenchatogo lopastnogo dvizhitelya za korpusom sudna." *Morskoi vestnik* 4(60) (2016): 35–38.
8. Lobachev, M. P., A. A. Rusetskii, and A. Yu. Yakovlev. *Proektirovanie i gidrodinamicheskii raschet vodometnykh dvizhitelei*. SPb: TsNII im. Krylova A. N., 2014.
9. Zapevalov, A. S., A. N. Pinchuk, and V. M. Burdyugov. "Radar Measurements of the Vibration Amplitude." *Technical Physics* 63.12 (2018): 1851–1853. DOI: 10.1134/S1063784218120216.
10. Togunyats, A. R., and L. I. Vishnevskii. "Gidrodinamicheskie aspekty raboty soosnykh grebnykh vintov protivopolozhnogo vrashcheniya s elektricheskoi peredachei moshchnosti." *Morskoi vestnik* 3(67) (2018): 83–86.
11. Vishnevskii, L. I., V. P. Il'in, O. P. Orlov, V. G. Khoroshev, and A. V. Chalov. "Prakticheskie vozmozhnosti ustraneniya shchelevoi kavitatsii v vodometnykh dvizhitelyakh nasosnogo tipa." *Mezhvedomstvennaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy voennoi nauki i politekhnicheskogo obrazovaniya VMF»*. Chast' 2: Trudy konf. SPb: VMA im. Kuznetsova N.G., 2015. 108–116.
12. Vishnevsky, L. I. "Propellers making using free connection of blades to the hub." *Matematicheskie modeli i ikh prilozheniya: sbornik nauchnykh trudov: posvyashchaetsya 80-letiyu so dnya rozhdeniya A. G. Terent'eva*. Cheboksary: Chuvashskii gosudarstvennyi universitet imeni I. N. Ul'yanova, 2016. 46–83.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пинчук Александр Николаевич —
кандидат технических наук
Черноморское высшее военно-морское ордена
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Дыбенко, д. 1-а
e-mail: sir.leks-65@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pinchuk, Alexander N. —
PhD
Nakhimov Black Sea Higher
Naval School
1 Pavla Dybenka Str, Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: sir.leks-65@yandex.ru

Коржев Виктор Клавдиевич —

доктор технических наук, профессор
Черноморское высшее военно-морское ордена
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Дыбенко, д. 1-а
e-mail: korvk@mail.ru

Вишневский Леонид Иосипович —

доктор технических наук, профессор
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44
e-mail: vishli@yandex.ru

Korzhev, Victor K. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Nakhimov Black Sea Higher
Naval School
1 Pavla Dybenka Str, Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: korvk@mail.ru

Vishnevsky, Leonid Y. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Krylov State
Research Centre
44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg,
196158, Russian Federation
e-mail: vishli@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 января 2019 г.

Received: January 18, 2019.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356

VORTEX FLOWS IN THE SHIP'S SYSTEMS AND DEVICES

A. G. Gorobets

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

Liquid or gas flows in pipeline and other ship systems are usually vortex for natural reasons. Artificial twisting is used to intensify the various technological processes. At the same time, their hydrodynamic characteristics and impact on the processes require the further study. The experiments during which the phenomenon of transformation (separation) of the vortical flow in the cellular lattice is being researched have been conducted. It has been discovered that a vortical flow which goes through the lattice transforms into a system of vortical flows which retain their characteristics after they have gone through the lattice. The interaction of the transformed flows leads to the formation of the stable dynamic structure composed of the main vortexes and the satellite vortexes. This flow has all the advantages of the vortical flow but has a lower index of hydrodynamic resistance. The fact of the lower resistance of the transformed vortical flow as compared the vortical flow that is not divided and a smaller angle of opening the flow in water and gas indicates the existence of an internal structure and increased stability of the transformed flow. The vortical flows of liquid or gas are used to efficiently bring the heat from the heat-generating assemblies of ship's nuclear reactors, in the ventilation systems and air conditioning systems of ramified and narrow ship's compartments. Besides, the vortical movement of liquid and gas flows occurs in all pipeline systems when the liquid and gas flow through the holes or nozzles. The results obtained in the paper allow us to provide a new explanation of the behavior and characteristics of liquid and gas vortical flows passing through cellular lattices. Use of swirling and transformed flows of liquid and gas can improve the performance and quality of many systems connected with the liquid and gas movement, including reducing their hydrodynamic noise.

Keywords: vortical flow, vortex, separator, transformation of the vortical flow, Theorem of Helmholtz, vortex structure, mass transfer, heat transfer, hydrodynamic resistance, stability of the flow.

For citation:

Gorobets, Alexander G. "Vortex flows in the ship's systems and devices." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356.

УДК 532.517.4

ВИХРЕВЫЕ ПОТОКИ В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ И УСТРОЙСТВАХ

А. Г. Горобец

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

Изучены потоки жидкости или газа в трубопроводных и иных судовых системах, обычно являющиеся вихревыми по естественным причинам. Отмечается, что искусственная закрутка используется для интенсификации различных технологических процессов. При этом их гидродинамические характеристики и влияние на происходящие процессы требуют дальнейшего изучения. Исследуется явление трансформации закрученных потоков жидкости и газа в ячеистых пространственных решетках. Экспериментально установлено, что пройдя через пространственную решетку, закрученный поток превращается в систему вихревых потоков, которые после выхода из решетки сохраняют свою индивидуальность. Взаимодействие между ними приводит к образованию устойчивой динамической структуры в виде основных вихрей и вихрей сателлитов. Такой поток сохраняет все преимущества закрученного потока, но обладает меньшим гидродинамическим сопротивлением. Обнаруженный эффект сни-

жения гидродинамического сопротивления трансформированных закрученных потоков, по сравнению с нетрансформированными потоками, свидетельствует о наличии внутренней структуры и большей устойчивости этого потока. Закрученные потоки жидкости или газа используются для эффективного отвода тепла от тепловыделяющих сборок корабельных атомных реакторов в системах вентиляции и кондиционирования разветвленных и затесненных судовых помещений. Кроме того, вихревое движение потоков жидкости и газа имеет место во всех трубопроводных системах при истечении жидкости или газа через отверстия или насадки. Результаты, полученные в данной работе, позволяют по-новому объяснять поведение и свойства закрученных потоков жидкости и газа при их прохождении через пространственные решетки. Использование закрученных и трансформированных потоков жидкости и газа позволяет повысить производительность и качество многих систем, связанных с движением жидкости и газа, в том числе снизить их гидродинамический шум.

Ключевые слова: закрученный поток, разделитель, трансформация потока, теорема Гельмгольца, вихревая структура, массоперенос, теплопередача, гидродинамическое сопротивление, устойчивость потока.

Для цитирования:

Горобец А. Г. Вихревые потоки в судовых системах и устройствах / А. Г. Горобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356.

Введение (Introduction)

Стремительное развитие индустрии и транспорта формируют повышенный интерес исследователей к изучению течений жидкости и газа с хаотическими режимами адвекции. В работах [1]–[4] изучается эволюция завихренности и скорость ее переноса на основе теоремы Гельмгольца и уравнения Навье – Стокса с использованием метода дискретных вихрей. Такие режимы течения представляют значительный практический интерес для инженерных приложений, связанных с движением жидкости в трубопроводах, гидродинамикой затопленных потоков, с использованием гидрореактивных движителей судов, процессами теплопередачи и охлаждения.

Открытие явления детерминированного хаоса позволило многим исследователям посмотреть на проблему адвекции жидкости с новых концептуальных позиций. При этом вопрос о достоверности критериев детерминированного хаоса при идентификации интенсивных режимов адвекции выделенных объемов жидкости является актуальным. Известна задача выравнивания распределения скоростей потока в канале с целью улучшения характеристик технологических аппаратов, которая была систематически исследована, например, в источниках [5], [6]. В частности, в этих работах был рассмотрен случай выравнивания скоростей потока с помощью рассредоточенного по сечению сопротивления (сетки, решетки) при «боковом вводе потока в аппарат». В данном случае имеет место закрутка потока, наблюдаемая с помощью шелковинок.

В работах [7]–[9] рассматривается задача выравнивания поля скоростей на входе в активную зону ядерного реактора из коллектора напорной камеры — входного коллектора. По мнению авторов этих работ, устранение закрутки и выравнивание потока достигаются путем установки за тонкостенной решеткой спрямляющей ячейковой решетки или специального раскручивающего аппарата — «рассекателя» в виде пакета параллельных пластин. Во входном коллекторе возникает закрутка потока теплоносителя (центральный вихрь, входной вихрь в форме стабильного — *торового*), что приводит к неравномерности в распределении потока теплоносителя. Обеспечение рационального распределения потока по каналам зоны достигается с помощью гидравлического профилирования — установки локальных сопротивлений на входе в тепловыделяющие сборники. Потоки в ячейках пространственных решеток и каналах активных зон реакторов считались незакрученными, т. е. «раскрученными».

На основании выводов, сделанных в работах [7]–[9], существовало мнение о том, что закрученный поток можно раскрутить с помощью ячейковой решетки, или «рассекателя». В настоящем исследовании впервые обнаружено явление трансформации закрученного потока с помощью ячейистой пространственной решетки в систему закрученных потоков, что соответствует первой теореме Гельмгольца о вихрях. Закрутка потока, подводимого к каналу какого-либо аппарата,

может быть естественной, обусловленной, например, несимметричным подводом потока, или искусственной, осуществляемой, например, с помощью лопаточного завихрителя. Если на пути такого потока установить ячеистую пространственную решетку типа сотовой структуры или в виде пучка продольно обтекаемых стержней тепловыделяющей сборки ядерного реактора, то единый закрученный поток разделяется решеткой на систему закрученных потоков. В каждую ячейку при этом вносится завихрение, которое и вызывает закрутку потока в каждой ячейке.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют по-новому объяснять поведение и свойства трансформированных закрученных потоков после их прохождения через пространственную ячеистую решетку и использовать их для совершенствования судовых систем и устройств.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыты проводились на гидроаэродинамических стендах, один из которых показан на рис. 1. При разработке стенда были учтены рекомендации источников [10]–[13] и др.

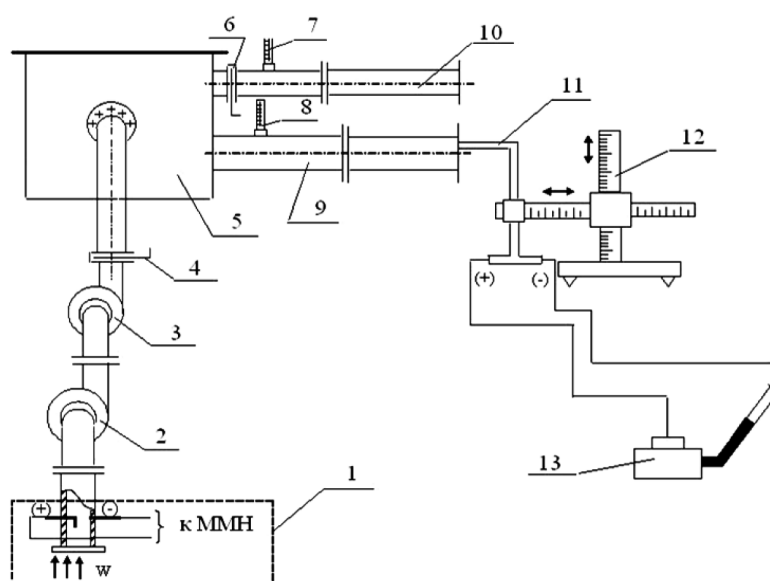


Рис. 1. Гидроаэродинамический стенд

Воздух из помещения лаборатории через расходомер 1 подается вентиляторами 2, 3 в бак 5, из которого воздух поступает в один из каналов 9, 10. Другие элементы рабочего участка: 4, 6 — регулирующие заслонки; 7, 8 — термометры; 11 — напорная трубка Пито – Прандтля с наружным диаметром рабочей части 6 мм; 12 — координатник двухосевой, позволяющий перемещать напорную трубку с шагом в 1 мм и приспособленный для использования микрометрической головки с шагом в 0,1 мм; 13 — микроманометр типа ММН.

Наблюдения могут проводиться на самих каналах или присоединяемых к ним исследуемых рабочих участках. Основные результаты были получены на рабочем участке (рис. 2), присоединяемом к аэродинамическому стенду. Рабочий участок на рис. 2 представляет собой стеклянный канал 1 и цилиндрическую вставку 4 для наблюдения характера течения с помощью шелковинок, закрепленных на струнах. Цифрами 2 и 3 на рабочем участке обозначены, соответственно, лопаточный завихритель и разделитель, число секторов которого варьировалось. Вдоль канала расположены патрубки для измерения перепада давлений 5.

Измерения гидравлических характеристик осуществлялись пневмометрическим методом с использованием микроманометров типа ММН. Частотные характеристики течений измерялись с помощью строботометра SWM-2 типа 7179/220 FNr-122 (*Hofman Electronic und Maschinen GMB*, Darmstadt, Germany). Акустические измерения выполнены с использованием аппаратуры фирмы *Bruel & Kjaer*.

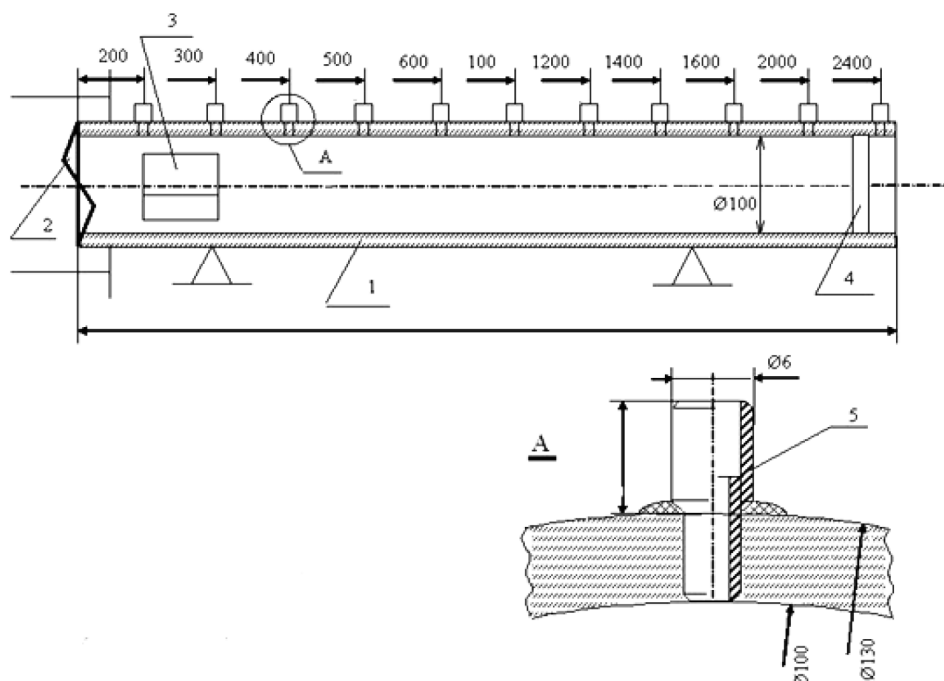


Рис. 2. Стекланный канал для визуальных наблюдений и измерений перепадов давления

Результаты (Results)

Результаты наблюдениями на рабочем участке при использовании разделителей с числом секторов $z = 2$ и 3 приведены в таблице. Установлено, что частоты потоков в секторах больше частоты набегающего потока, их величины зависят от количества секторов и возрастают по мере увеличения расхода или числа Рейнольдса.

Зависимость частот от числа секторов и числа Рейнольдса

Количество секторов разделения z	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Число Рейнольдса, $\text{Re} \cdot 10^{-4}$	Частота f , Гц
Разделитель отсутствует $z = 0$	205	6,03	7,50
	240	7,09	10,0
	266	7,83	11,7
	282	8,25	14,2
$z = 2$	205	6,03	11,7
	240	7,09	13,3
	266	7,83	16,7
	282	8,36	18,3
$z = 3$	166	4,65	15,8
	200	5,82	18,7
	240	7,09	20,8
	266	7,83	23,3
	286	8,36	25,0

Полученные данные свидетельствуют о том, что трансформация закрученного потока в многоячеечной пространственной решетке имеет место, при этом частота потоков в ячейках более чем в два раза превосходит частоту потоков у набегающего потока.

Вихревая структура потока после разделителя с тремя секторами показана на рис. 3. Здесь заштрихованные фигуры — основные вихревые потоки, выходящие из секторов разделителя, остальные фигуры — вихри-сателлиты.

Гидравлическое сопротивление потока в канале за пространственной решеткой ниже, чем сопротивление закрученного потока перед решеткой. Это сказывается на уровне гидродинамического шума, создаваемого потоками. Указанные эффекты обусловлены взаимодействием вихрей в потоке.

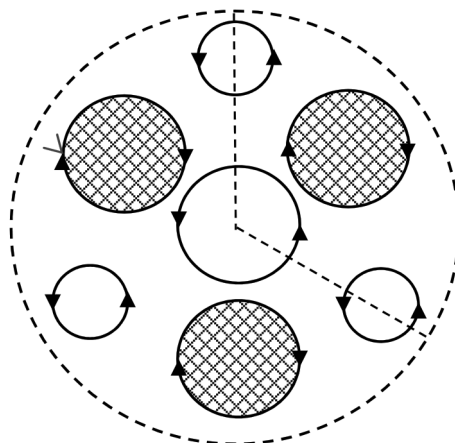


Рис. 3. Вихревая структура потока после разделителя с тремя секторами

Экспериментально установлено снижение гидравлического сопротивления закрученного и трансформированного потока, что обусловлено возникновением и функционированием сложной вихревой структуры, включающей основные вихри и вихри-сателлиты. Гидродинамические характеристики закрученного и трансформированного потоков представлены на рис. 4 и 5.

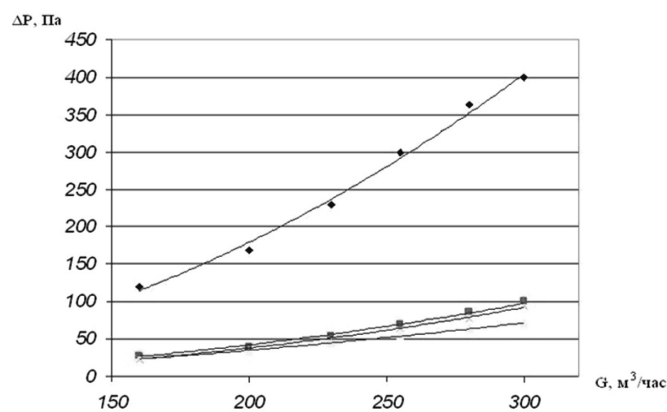


Рис. 4. Перепад давлений в рабочем участке: ◆ — установлен только завихритель; × — отсутствует завихритель и разделитель; ■ — три сектора; Δ — четыре сектора

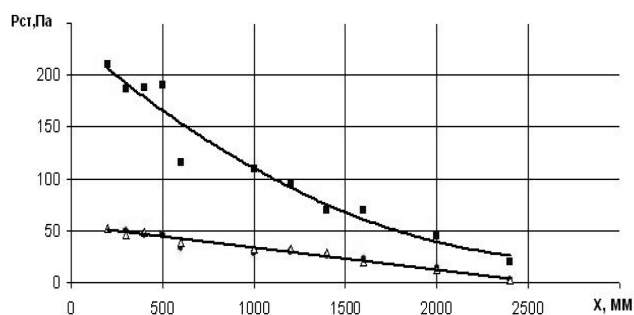


Рис. 5. Распределение статического давления вдоль канала диаметром 100 мм при расходе $G = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$: Δ — пустая труба; ● — установлен завихритель и разделитель; ■ — установлен только завихритель

Гидродинамические характеристики потоков при разделителях с двумя–четырьмя секторами близки к характеристике незакрученного потока. При этом гидравлическое сопротивление закрученного, но не трансформированного потока существенно выше аналогичного у потока, трансформированного с помощью трехсекторного разделителя. Сопротивление последнего практически совпадает с таковым у незакрученного потока.

Обсуждение (Discussion)

Гидродинамика многовихревого закрученного потока, образовавшегося при трансформации, имеет ряд существенных особенностей. После выхода из решетки сформированные в ячейках потоки сохраняют индивидуальность, взаимодействуя друг с другом. При их течении в канале в потоке возникает сложная вихревая структура, состоящая из основных потоков и вращающихся между ними вихрей-сателлитов. Между вихрями происходит энергообмен, который приводит к изменениям их поперечных размеров при движении по каналу. Число крупных вихрей-сателлитов больше числа основных вихрей, а направление их вращения обратно таковому у основных.

Факт трансформации закрученных потоков наблюдался визуально. Для этого использовалась шелковинка, вводимая в поток. Частота вращения закрученных потоков в ячейках выше, чем частота в потоке перед решеткой, что соответствует закону сохранения момента количества движения. Гидравлическое сопротивление потока в канале за пространственной решеткой ниже, чем сопротивление закрученного потока перед решеткой. Это сказывается и на уровне гидродинамического шума, создаваемого потоками. Отмеченные эффекты обусловлены взаимодействием вихрей в потоке.

Обнаруженный эффект снижения сопротивления трансформированного потока по сравнению с нетрансформированным закрученным потоком свидетельствует о наличии внутренней структуры и большей устойчивости этого потока. В пользу этого предположения свидетельствует и зафиксированный, меньший по сравнению с нетрансформированным потоком, угол раскрытия многовихревого потока после выхода из канала.

Наблюдениями свободной затопленной струи, выходящей из канала, установлено следующее:

- расширение закрученной струи в отсутствие разделителя существенно больше, чем незакрученной, угол расширения для незакрученной струи в проведенных измерениях был в два раза меньше;
- расширение закрученной струи при наличии разделителя с тремя секторами такое же, как у незакрученной, соответственно, разделение закрученной струи с помощью разделителя, установленного в сопло, увеличивает ее устойчивость и уменьшает диссипацию.

Таким образом, трансформированные закрученные потоки, сохраняя все достоинства закрученных потоков, обладают лучшими гидродинамическими характеристиками.

Заключение (Conclusion)

Результаты проведенных в исследовании наблюдений изменяют представления о гидродинамике закрученных потоков при их движении через ячейчатые пространственные решетки, изложенные в работах [5], [6], [9], [13]. Полученные в них экспериментальные результаты объясняются явлением трансформации закрученного потока в систему взаимодействующих закрученных потоков, а не его «раскруткой».

Результаты проведенных исследований могут иметь следующие области технического применения:

- совершенствование гидроаэродинамических характеристик течения в трубопроводных системах путем использования явления трансформации закрученных потоков, которые отличаются низким гидравлическим сопротивлением, высокими показателями теплообмена, лучшими акустическими и вибрационными характеристиками;

– создание форсированных теплообменных аппаратов и тепловыделяющих сборок ядерных реакторов [14];

– совершенствование процессов истечения различных сред через насадки, отличающиеся тем, что в них используется явление трансформации закрученного потока [15];

– создание систем вентиляции затесненных помещений, отличающихся высокой эффективностью, лучшими гидравлическими и акустическими характеристиками;

– создание и совершенствования вихревых движителей водных и воздушных судов [16]–[18], которые в случае надводных судов дают конструкции преимущества по затратам мощности при перемещении по воде.

Некоторые из этих результатов нашли свое применение на судах северного флота для совершенствования судовых систем и устройств.

Работа проводилась в 2010–2014 гг. при поддержке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» под руководством В. С. Никитина. Автор статьи выражает глубокую признательность Е. М. Аину, зав. кафедрой инженерной защиты окружающей среды филиала СПбГМТУ в г. Северодвинске, за многолетнюю совместную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков В. В. Эволюция завихренности в жидкости и газе / В. В. Марков, Г. Б. Сизых // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. — 2015. — № 2. — С. 8–15.
2. Сизых Г. Б. Метод добавления завихренности / Г. Б. Сизых // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2016. — № 3. — С. 26–31. DOI: 10.7868/S0568528116030130.
3. Yin J. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR / J. Yin, Y. Qian, T. Zhang, D. Wang // Annals of Nuclear Energy. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 20–32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009.
4. Ahmadi F. Particle image and tracking velocimetry of solid-liquid turbulence in a horizontal channel flow / F. Ahmadi, M. Ebrahimian, R. S. Sanders, S. Ghaemi // International Journal of Multiphase Flow. — 2019. — Vol. 112. — Pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.12.007.
5. Идельчик И. В. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И. В. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1983. — 351 с.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Книга по требованию, 2012. — 466 с.
7. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике: в 3 т. / Сост. и ред. П. Л. Кириллов. — М.: ИзДАТ, 2010–2014. — 686 с.
8. Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок: сб. трудов ФЭИ: в 3 т. М.: — Изд-во ГНЦ ФФЭИ, 1999. — 675 с.
9. Лепеш Г. В. Повышение эффективности теплообменных аппаратов путем применения вихревого эффекта / Г. В. Лепеш, А. Г. Лепеш, С. К. Лунева // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2016. — № 4 (38). — С. 23–31.
10. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. — М: Энергия, 1978. — 704 с.
11. Пат. 2270374 Российская Федерация, МПК F15D 1/04. Способ трансформации потоков, 2006 / Е. М. Аин, А. В. Агеев, А. Г. Горобец [и др.]; Заяв. и патентообл. ФГУП «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега»». — № 2004119634/06; заявл. 28.06.2004; опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5.
12. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1974. — 480 с.
13. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. — М.: Стройиздат, 1979. — 295 с.
14. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О. В. Митрофанова. — М.: Физматлит, 2010. — 287 с.
15. Zhou C. Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells / C. Zhou, X. Wu, T. Zhang, X. Zhao, S. Gai, H. Xiang // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2019. — Vol. 173. — Pp. 965–974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091.
16. Никитин А. В. Вихрь и вихревые движители / А. В. Никитин. — М.: Академия тринитаризма, 2007. — Эл. №77–6567.

17. Остроухов Н. Н. Вихревые движители водных и воздушных судов / Н. Н. Остроухов, Е. В. Чумакова // Мир транспорта. — 2016. — Т. 14. — № 6 (67). — С. 86–96.
18. Liu M. Cavitation–vortex–turbulence interaction and one-dimensional model prediction of pressure for hydrofoil ALE15 by Large Eddy Simulation / M. Liu, L. Tan, S. Cao // Journal of Fluids Engineering. — 2019. — Vol. 141. — Is. 2. — Pp. 021103. DOI: 10.1115/1.4040502.

REFERENCES

1. Markov, V. V., and G. B. Sizykh. “Vorticity evolution in liquids and gases.” *Fluid Dynamics* 50.2 (2015): 186–192. DOI: 10.1134/S0015462815020027.
2. Sizykh, G. B. “Vorticity addition method.” *Fluid Dynamics* 51.3 (2016): 321–326. DOI: 10.1134/S0015462816030030.
3. Yin, Junlian, Yalan Qian, Tingting Zhang, and Dezhong Wang. “Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR.” *Annals of Nuclear Energy* 126 (2019): 20–32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009.
4. Ahmadi, Farzad, Masoud Ebrahimi, R. Sean Sanders, and Sina Ghaemi. “Particle image and tracking velocimetry of solid-liquid turbulence in a horizontal channel flow.” *International Journal of Multiphase Flow* 112 (2019): 83–99. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.12.007.
5. Idel’chik, I. V. *Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov)*. M.: Mashinostroenie, 1983.
6. Idel’chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. M.: Kniga po Trebovaniyu, 2012.
7. Kirillov, P. L., eds. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoi energetike [v 3t.]*. 2014.
8. *Gidrodinamika i bezopasnost’ yadernykh energeticheskikh ustanovok. Sbornik trudov FEI. V trekh tomakh*. GNTs FFAEI, 1999.
9. Lepesh, G. V., A. G. Lepesh, and S. K. Luneva. “Increase in efficiency of heat exchange devices by use of vortex effect.” *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* 4(38) (2016): 23–31.
10. Preobrazhenskii, V. P. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory*. M: Energiya, 1978.
11. Ain, E. M., A. V. Ageev, A. G. Gorobets, et al. RU 2 270 374 C1, IPC F 15 D 1/04. Sposob transformatsii potokov. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2006.
12. Povkh, I. L. *Aerodinamicheskii eksperiment v mashinostroenii*. L.: Mashinostroenie, 1974.
13. Taliev, V. N. *Aerodinamika ventilyatsii*. M.: Stroiizdat, 1979.
14. Mitrofanova, O. V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok*. M. Fizmatlit, 2010.
15. Zhou, Chao, Xiaodong Wu, Tongyi Zhang, Xu Zhao, Shaohua Gai, and Huizhu Xiang. “Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 173 (2019): 965–974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091.
16. Nikitin, A. V. “Vikhr’ i vikhreyye dvizhiteli.” *Akademiya trinitarizma*. M., 2007. El. №77-6567.
17. Ostroukhov, Nikolai N., and Ekaterina V. Chumakova. “Vortex propulsion units of sea vessels and aircrafts.” *World of Transport* 14.6(67) (2016): 86–96.
18. Liu, Ming, Lei Tan, and Shuliang Cao. “Cavitation–vortex–turbulence interaction and one-dimensional model prediction of pressure for hydrofoil ALE15 by Large Eddy Simulation.” *Journal of Fluids Engineering* 141.2 (2019): 021103. DOI: 10.1115/1.4040502.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горобец Александр Григорьевич —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: aleksandr-gorobets@yandex.ru,
kaf_physics@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorobets, Alexander G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: aleksandr-gorobets@yandex.ru,
kaf_physics@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2019 г.

Received: February 21, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366

DEVELOPMENT OF THE PROPULSION SWITCHED RELUCTANCE DRIVE FOR THE VESSELS WITH HIGH POWER ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

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

Currently, a promising direction for the vessels with electric propulsion is the creation of switched-reluctance drives. The experience of successful creation of ship's switched reluctance drives samples predetermined the implementation in order to verify the calculated methods and design solutions of 500 kW switched reluctance drive sample. A 9-phase switched reluctance drive with conventional design of the magnetic system and corresponding number of inverters is selected. It has been shown that the multiphase converter control from one microcontroller becomes irrational due to the limited number of specialized discrete outputs, and effective control over the entire frequency range is performed by the time parameters and voltage amplitude. To evaluate the adjusting properties of 500 kW switched reluctance drive the load characteristics are obtained, from which it follows that the electric drive works stably in the frequency range of 200–850 min⁻¹ and load of 10–100 % both in the motor and in the generator modes. The joint operation of the switched reluctance drive both in the motor and in the generator mode, in the presence of a mechanical connection between their shafts and electrical connection through the power supply circuits is experimentally evaluated. The graphs of the motor and generator currents, as well as the inductance graphs reconstructed from them, are given. In addition, the phase portraits of the phase switching cycle in the motor and generator modes under the mutual loading of the switched reluctance drive are considered. All these tests made it possible in a short time to create the switched reluctance drive for the supply vessel "Victor Konetsky", successfully operated at the fleet, as well as to carry out a number of technical projects of the switched reluctance drive for 4–13 MW electric propulsion systems.

Keywords: electric drive, propulsion electrical motor, switched reluctance drive, inverter, energy.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Development of the propulsion switched reluctance drive for the vessels with high power electric propulsion systems". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

УДК 621:313:3

РАЗРАБОТКА ГРЕБНОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

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

Проанализирован процесс создания вентильно-индукторных двигателей, являющийся в настоящее время перспективным направлением для судов с электродвижением. Отмечается, что опыт успешного создания образцов корабельных вентильно-индукторных приводов предопределил реализацию в целях проверки расчетных методик и конструктивных решений образца вентильно-индукторного двигателя мощностью 500 кВт. Выбран вариант девятифазного вентильно-индукторного двигателя с традиционной конструкцией магнитной системы и соответствующим числом инверторов. Показано, что управление многофазным преобразователем от одного микроконтроллера становится нерациональным из-за ограниченного числа специализированных дискретных выводов, а эффективное управление во всем диапазоне

частот производится временными параметрами и амплитудой напряжения. Для оценки регулировочных свойств вентильно-индукторного двигателя мощностью 500 кВт на стенде получены нагрузочные характеристики, из которых следует, что электропривод устойчиво работает в диапазоне частот 200–850 мин⁻¹ и нагрузки 10–100 % как в двигательном, так и в генераторном режиме. Выполнена экспериментальная оценка совместной работы вентильно-индукторного двигателя как в двигательном, так и в генераторном режиме при наличии механической связи между их валами и электрической связи по цепям питания. Приведены графики токов двигателя и генератора, а также восстановленные по ним графики индуктивностей соответственно. Кроме того, рассмотрены фазовые портреты цикла коммутации фазы в двигательном и генераторном режимах при взаимном нагружении вентильно-индукторного двигателя. Все эти испытания позволили в короткие сроки создать вентильно-индукторный двигатель для судна-снабженца «Виктор Конецкий», успешно эксплуатируемого на флоте, а также выполнить ряд технических проектов вентильно-индукторного привода для систем электродвижения мощностью 4–13 МВт.

Ключевые слова: электропривод, гребной электрический двигатель, вентильно-индукторный двигатель, инвертор, энергия.

Для цитирования:

Романовский В. В. Разработка гребного вентильно-индукторного двигателя для систем электродвижения большой мощности / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

Введение (Introduction)

Опыт успешного создания образцов корабельных вентильно-индукторных приводов (ВИП) малой и средней мощности [1] и потребность в судовых электродвигателях (СЭД) мощностью от единиц до десятков МВт для судов нового поколения в целях проверки расчетных методик и конструктивных решений предопределили реализацию в г. Новочеркасске образца вентильно-индукторного двигателя (ВИД) мощностью 500 кВт при частоте вращения 1000 мин⁻¹ и экспериментального стенда (рис. 1). Этот же ВИД является пригодным для имитации основных режимов работы в системах резервного электродвижения при частоте вращения 750 мин⁻¹ и мощности 375 кВт.

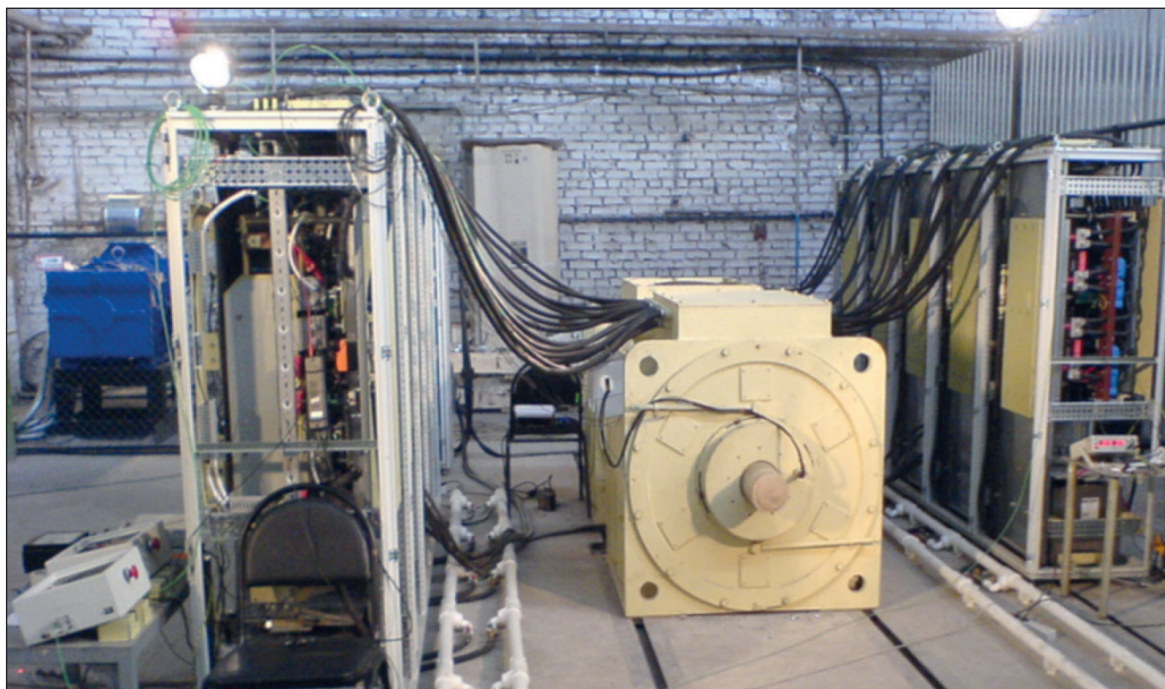


Рис. 1. Экспериментальный стенд испытания гребных ВИД мощностью 500 кВт

В основу принятой к реализации функциональной схемы (рис. 2) положен вариант системы с взаимным нагружением испытуемой и нагрузочной идентичных ВИД.

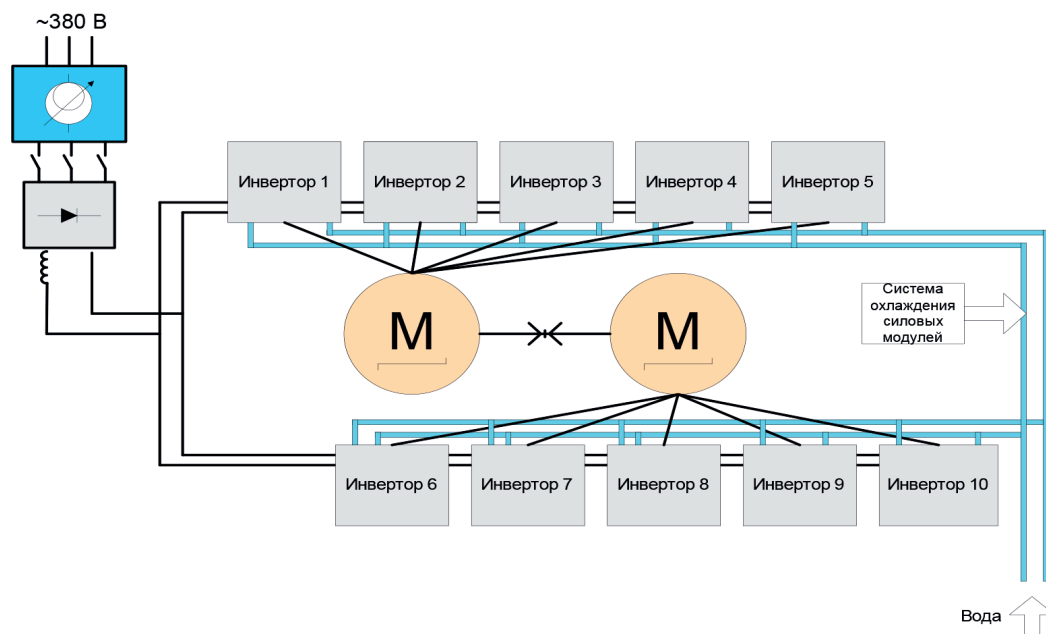


Рис. 2. Функциональная схема стенда испытаний макета СЭД

Выбран вариант с параллельным подключением источника электропитания — индукционного фазорегулятора и неуправляемого выпрямителя. Последующее уточнение схемы испытуемого стенда потребовало нахождения максимально возможной мощности первого ГЭД и перспективы наращивания мощности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для реализации схемы испытуемого стенда был выбран вариант девятифазного ВИД с традиционной конструкцией магнитной системы, с соответствующим числом инверторов и их мощностью. Конструктивно девять независимых инверторов, каждый из которых питает одну фазу ВИД, размещены в пяти шкафах с водяной системой охлаждения силовых модулей. Идентичность ВИД и преобразователей обеспечивает полную обратимость силовой схемы — каждая машина может исследоваться как в двигательном, так и в генераторном режимах. Однако конфигурация ограничивает динамические режимы вследствие того, что неуправляемый выпрямитель первичного источника питания не обеспечит обратную передачу электроэнергии. Одним из способов решения данной проблемы является рассеивание рекуперированной в цепь постоянного тока кинетической энергии в нагрузочных резисторах, включенных в цепь постоянного тока посредством дополнительного ключа [2]. Из возможных схем питания СЭД [3], [4] принята схема на основе несимметричной мостовой схемы. Анализ схем инвертора для ВИД показывает, что при больших мощностях у всех схем нет серьезных преимуществ перед базовой полумостовой схемой, но каждая из них имеет свои недостатки.

Каждая фазная обмотка питается от несимметричной мостовой схемы. В плече моста последовательно встроены ключ и обратный диод. Для предотвращения пульсаций напряжения параллельно мосту подключены два последовательно соединенных электролитических конденсатора, а для ограничения ИКП также включен высокочастотный конденсатор. Последовательно с обмоткой каждой фазы и в общей цепи источника питания всех фаз подключен датчик тока. Информацию о напряжении в звене постоянного тока предоставляет датчик напряжения. Функциональная схема системы управления СУ СЭД отличается большой мощностью, поэтому число фаз увеличивается, и преобразователь размещается в нескольких шкафах. Для испытания ВИД большой мощности изготовлен полномасштабный образец системы электропитания мощностью 13 МВт [5].

Управление многофазным преобразователем с одним микроконтроллером становится нерациональным, в первую очередь, ввиду сложности передачи управляющих сигналов на большие расстояния, а также наличия небольшого числа дискретных выводов [6]. Поэтому задачи управления ВИД при ощутимых колебаниях питающего напряжения решаются совершенствованием алгоритмов управления ключами коммутатора фаз многопроцессорной распределенной трехуровневой системой управления (СУ), элементы которой связываются на всех уровнях по CAN-интерфейсу.

Системы контроля и управления нижнего уровня датчиков и исполнительных устройств реализованы посредством плат. В качестве ядра платы выступает PIC-контроллер с расширенной периферией и решением вспомогательных задач. Регулирующий DC/DC преобразователь в звене постоянного тока усложняет конструкцию системы, ощутимо уменьшая теоретические показатели. Недостатки «амплитудного» управления усугубляются в мощных приводах. Рассмотрим «фазовое» управление — вариацию временных параметров: $\alpha_{оп} = f(n^*)$ — угол опережения; $\alpha_{имп} = f(n^*)$ — угол импульса; $\alpha_{ок.п} = f(n^*)$ — угол окончательной паузы при стабильном напряжении (рис. 3).

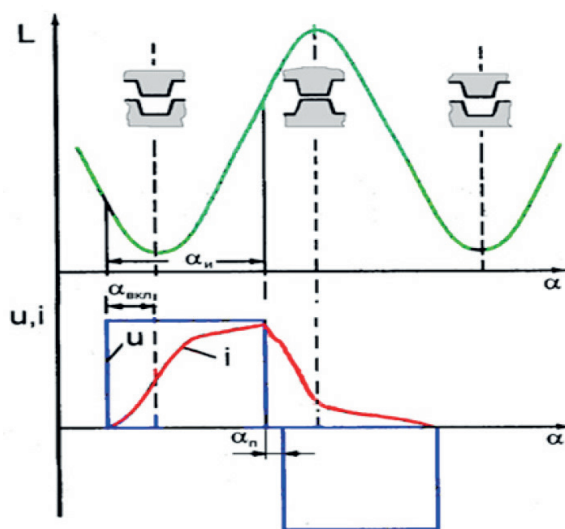


Рис. 3. Параметры фазового управления

Установлены критерии оптимизации: максимум КПД и минимум пульсаций. В целях сохранения высокого значения КПД в изменяющемся диапазоне частот и напряжения целесообразно использовать комбинированное управление. Оптимальное управление достигается временными параметрами и амплитудой напряжения. В свою очередь, при управлении временными параметрами напряжения сложно достичь заданного КПД на малых скоростях из-за малой мощности. Решением этой проблемы является *чопперный понижающий регулятор напряжения*, способный регулировать напряжение от нуля до номинала. С учетом этого КПД регулятора окажется не менее 0,95, а КПД двигателя — не менее 0,96. Поэтому суммарный КПД системы будет порядка 0,912, что является хорошим показателем.

Частоту вращения машин, как правило, регулируют пропорционально-интегральным регулятором скорости. Однако трудно достичь требуемого времени разгона или реверса при использовании двигателей с высоким моментом инерции ротора и нагрузки [7]. Для хорошей динамики разгона и регулирования требуются иные способы управления с учетом особенностей двигателя. Одним из оптимальных способов повышения КПД электропривода при малых мощностях является оптимизация временных параметров и амплитуды напряжения, которая позволит осуществить корректное управление ВИД. Для оценки регулировочных свойств ВИД-500 на стенде получены также нагрузочные характеристики при $U_{ин} = 170 \text{ В}$, $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4).

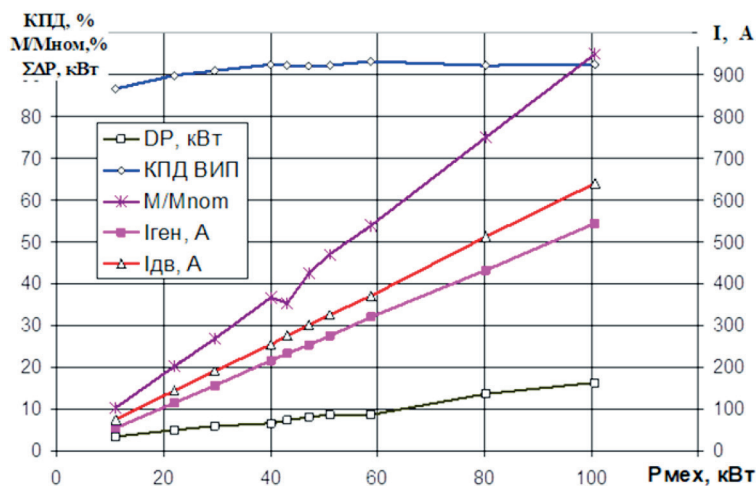


Рис. 4. Нагрузочные характеристики

Результаты (Results)

Из характеристик следует, что электропривод устойчиво работает в диапазоне частот 200–850 мин⁻¹ и нагрузки 10–100 % в двигательном, а также и в генераторном режиме. КПД электропривода с учетом потерь в преобразователе и в соединительных проводах равен приблизительно 92 % в пределах нагрузки 40–100 % и снижается до 87 % при уменьшении нагрузки до 10 %.

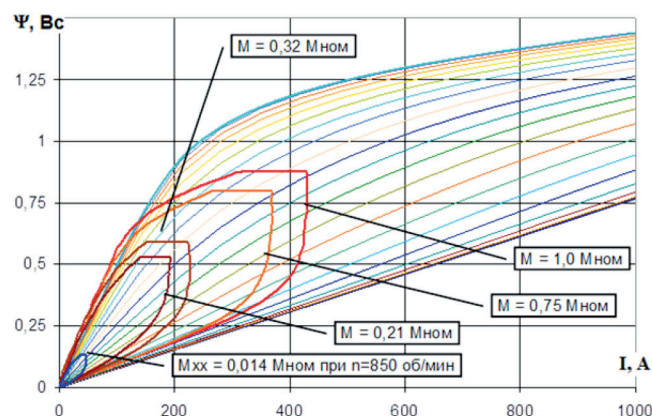


Рис. 5. Фазовые портреты цикла коммутации фазы при изменении нагрузки

В дополнение к этим характеристикам обработаны осциллограммы и на рис. 5 в координатах Ψ, i показаны траектории циклов коммутации фазы ВИД-500, а в таблице даны энергетические показатели при смене нагрузки. Так как площадь внутри траектории [8], [9] цикла коммутации равна механической энергии $W_{\text{мех}}$ и пропорциональна моменту M , наложение циклов коммутации на семейство кривых намагничивания дает визуальную оценку степени задействования магнитной системы по созданию момента.

Энергетические показатели при $n \sim 200$ мин⁻¹ и изменении нагрузки

n , мин ⁻¹	$M / M_{\text{ном}}$	КПД, %	$K_{\text{ЭМП}}$	I_{ϕ} , А	K_{ϕ}
213	0,99	96,7	0,71	218	1,53
216	0,75	96,9	0,70	162	1,41
230	0,32	96,2	0,66	100	1,74
212	0,21	94,7	0,61	95	1,71

Анализ данных таблицы показывает, что снижение момента нагрузки со 100 до 20 % практически не оказывает влияние на КПД, но уменьшает на 10 % коэффициент электромагнитного преобразования ($K_{\text{ЭМП}}$).

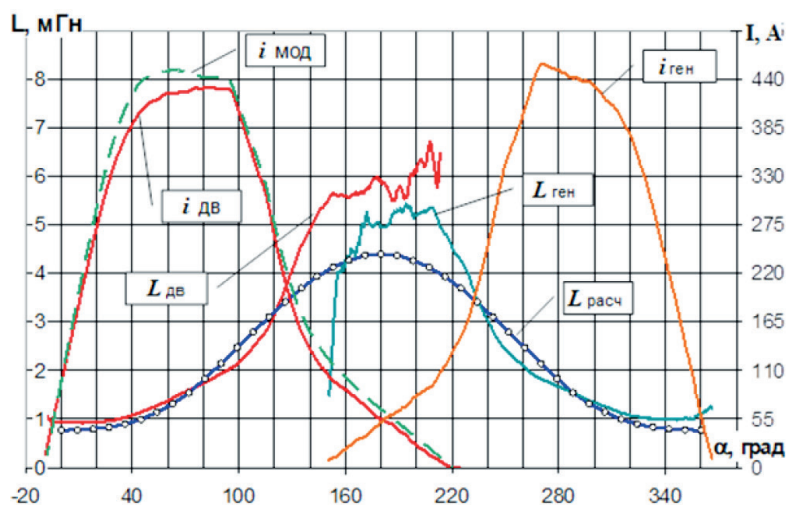


Рис. 6. Осциллограммы токов двигательного и генераторного режимов при взаимонагрузке ВИД-500

Выполним экспериментальную оценку совместной работы ВИД в двигательном и генераторном режиме при наличии механической и электрической связи. На рис. 6 приведены графики токов двигателя $i_{\text{дв}}(\alpha)$ и генератора $i_{\text{ген}}(\alpha)$, а также графики индуктивностей $L_{\text{дв}}(\alpha)$ и $L_{\text{ген}}(\alpha)$, совмещенные с графиком $L_{\text{расч}}(\alpha)$. Для двигательного режима штриховой линией показан график $i_{\text{мод}}(\alpha)$ с компьютерной модели при $\alpha_{\text{вкл}} = -10^\circ$, $T_{\text{вкл}} = 105^\circ$ и $T_{\text{У0}} = 20^\circ$. Расхождение между графиками $i_{\text{дв}}(\alpha)$ и $i_{\text{мод}}(\alpha)$ находится в пределах 7 % от амплитудного значения, что свидетельствует об адекватности компьютерной модели реальному объекту.

Графики токов двигательного и генераторного режимов [10], [11] практически симметричны относительно вертикальной оси, которая проходит через угол $\alpha = 180^\circ$, однако на этих графиках появляются небольшие отклонения от симметрии (увеличение амплитуды тока генераторного режима приблизительно на 30 А). Наиболее заметно изменения проявляются на графиках фазовых портретов (рис. 7), где стрелками показано направление движения отображающей точки: по часовой — для генераторного, против часовой — для двигательного режимов.

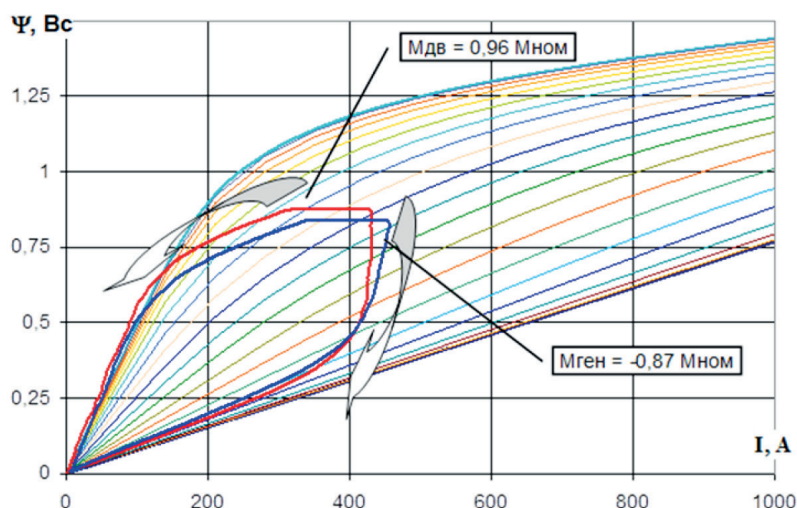


Рис. 7. Фазовые портреты цикла коммутации фазы в двигательном и генераторном режимах при взаимном нагружении ВИД-500

Начальный участок двигательного режима практически идентичен конечному генераторно-го и наоборот. Увеличение расхождений приводит к схожим изменениям в углах коммутации фаз, при которых напряжение фазы переключается между положительным, нулевым и отрицательным значениями, и становятся равны $\sim 9^\circ$ в сторону отставания для генераторного режима, вследствие чего площадь внутри [12] цикла коммутации фазы генераторного режима несколько меньше, чем двигательного режима, но это не противоречит физическому смыслу, так как энергия, являющаяся разностью площадей, тратится на компенсацию потерь в стали двигателя и генератора, механических потерь в агрегате. Оценка по среднему моменту: $M_{\text{дв}} = 0,96 M_{\text{ном}}$, а $M_{\text{ген}} = 0,87 M_{\text{ном}}$. Соответственно КПД: $\eta_{\text{дв}} = 0,96 \%$ и $\eta_{\text{ген}} = 0,97 \%$.

Вычисление $K_{\text{ЭМП}}$ с целью оценки энергетической эффективности генераторного режима имеет свои особенности. На рис. 8 показаны графики изменения электромагнитной мощности $P_{\text{ЭМ}}$ и энергии $W_{\text{ЭМ}}$, отражающие генераторный режим на рис. 6 и 7. Для графика $W_{\text{ЭМ}}$ имеется смещение вдоль вертикальной оси. В результате значения $W_{\text{ЭМ}}$ к моменту окончания импульса положительного напряжения генераторного и двигательного режимов отличаются: $W_{\text{в}} < W_{\text{ЭМ max}}$.

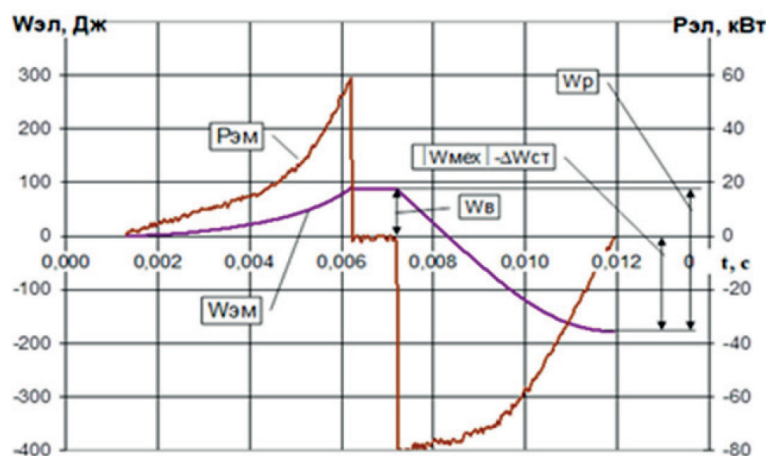


Рис. 8. Графики изменения электромагнитной мощности и энергии для одной фазы за цикл коммутации в генераторном режиме

Для двигательного режима часть $W_{\text{ЭМ max}}$ — накопленная магнитная энергия $W_{\text{р}}$, возбуждающая магнитную систему ВИД, которая рекупируется источнику электроэнергии. Оставшаяся часть $W_{\text{ЭМ max}}$ преобразуется в $W_{\text{мех}}$. Для генераторного режима $W_{\text{в}}$ — часть магнитной энергии [13], полученная от источника электроэнергии. Другая часть магнитной энергии получается из преобразования механической энергии в возбужденной магнитной системе ВИД. Рекупируемая энергия $W_{\text{р}}$ источника электроэнергии является алгебраической суммой: $W_{\text{р}} = W_{\text{мех}} - W_{\text{в}}$ или с учетом знаков — $|W_{\text{р}}| = |W_{\text{мех}}| + W_{\text{в}}$. Вновь сгенерированной электрической энергией без учета потерь является $W_{\text{мех}}$. С учетом ранее изложенного, $K_{\text{ЭМП}}$ генераторного режима определяется как отношение преобразованной механической энергии к рекупируемой электроэнергии:

$$K_{\text{ЭМП}} = \frac{|W_{\text{мех}}|}{|W_{\text{р}}|} = \frac{|W_{\text{мех}}|}{|W_{\text{мех}}| + W_{\text{в}}}.$$

В результате для генераторного режима $K_{\text{ЭМП}} = 0,67$.

Выводы (Conclusion)

1. В настоящее время системы электродвижения судов с применением ВИП находят все большее применение на судах-снабженцах и буксирах, однако данный привод в будущем требует доработки. В частности, необходимо выполнить оценку виброшумовых характеристик ввиду, в первую очередь, слабого «звена» — подшипников [14].



Рис. 9. Сборка вентильно-индукторного двигателя мощностью 2 МВт судна «Виктор Конецкий»

2. Эти испытания позволят в короткие сроки создать ВИД для судна-снабженца «Виктор Конецкий» (рис. 9), успешно эксплуатируемого на флоте, и выполнить ряд технических проектов ВИП для СЭД мощностью 4–13 МВт, а также подготовить техническое предложение по реализации ВИП-1000-1100, который может быть высокоэффективно и легко встроено в электроэнергетическую систему с СЭД, например, судов-спасателей или судов снабженцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Б. В. Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.
2. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 23–33.
3. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Лагода Ф. И. Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.
5. Liang Y. New circuits for emulating switched reluctance motor windings / Y. Liang, H. Chen, J. Shi, H. Liu // IET Electric Power Applications. — 2016. — Vol. 10. — Is. 6. — Pp. 458–466. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0627.
6. Bostanci E. Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study / E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, B. Fahimi // IEEE transactions on transportation electrification. — 2017. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 58–75. DOI: 10.1109/TTE.2017.2649883.
7. Rahmanian E. Maximum Power Point Tracking in Grid Connected Wind Plant by Using Intelligent Controller and Switched Reluctance Generator / E. Rahmanian, H. Akbari, G.H. Sheisi // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2017. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.
8. Kuai S.Y. Position sensorless technology of switched reluctance motor drives including mutual inductance / S.Y. Kuai, S. Zhao, F.P. Heng, X. Cui // IET Electric Power Applications. — 2017. — Vol. 11. — Is. 6. — Pp. 1085–1094. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0490.
9. Azer P. Advanced Fault-Tolerant Control Strategy for Switched Reluctance Motor Drives / P. Azer, J. Ye, A. Emadi // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). — IEEE, 2018. — Pp. 20–25. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450151.

10. Silva W. A. Adaptive Feedforward Control Applied in Switched Reluctance Machines Drive Speed Control in Fault Situations / W. A. Silva, B. C. Torrico, W. B. Correia, L. L. dos Reis // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. — 2018. — Vol. 140. — Is. 5. — Pp. 051002. DOI: 10.1115/1.4037836.
11. Wang S.Y. Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy / S.Y. Wang, F.Y. Liu, J.H. Chou // *Applied Soft Computing*. — 2018. — Vol. 66. — Pp. 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.
12. Garcia-Amoros J. Linear Hybrid Reluctance Motor with High Density Force / J. Garcia-Amoros // *Energies*. — 2018. — Vol. 11. — Is. 10. — Pp. 2805. DOI: 10.3390/en1102805.
13. Ye J. An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives / J. Ye, B. Bilgin, A. Emadi // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2015. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 1457–1470. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2316272.
14. Dos Santos F.L.M. Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle / F.L.M. dos Santos, J. Anthonis, F. Naclerio, J. J. Gyselinck, H. Van der Auweraer, L. C. S. Góes // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2014. — Vol. 61. — Is. 1. — Pp. 469–476. DOI: 10.1109/TIE.2013.2247012.

REFERENCES

1. Nikiforov, B.V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.
2. Ptakh, G.K. "Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.3 (2015): 23–33.
3. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Prospects for the development of electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Lagoda, F.I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.
5. Liang, Yan, Hao Chen, Jiaotong Shi, and Huajian Liu. "New circuits for emulating switched reluctance motor windings." *IET Electric Power Applications* 10.6 (2016): 458–466. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0627.
6. Bostanci, Emine, Mehdi Moallem, Amir Parsapour, and Babak Fahimi. "Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study." *IEEE transactions on transportation electrification* 3.1 (2017): 58–75. DOI: 10.1109/TTE.2017.2649883.
7. Rahmanian, Ehsan, Hasan Akbari, and G. Hossein Sheisi. "Maximum power point tracking in grid connected wind plant by using intelligent controller and switched reluctance generator." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8.3 (2017): 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.
8. Kuai, Song-yan, Shuai Zhao, Feng-ping Heng, and Xin Cui. "Position sensorless technology of switched reluctance motor drives including mutual inductance." *IET Electric Power Applications* 11.6 (2017): 1085–1094. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0490.
9. Azer, Peter, Jin Ye, and Ali Emadi. "Advanced Fault-Tolerant Control Strategy for Switched Reluctance Motor Drives." *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2018. 20–25. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450151.
10. Silva, Wellington A., Bismark C. Torrico, Wilkley B. Correia and Laurinda L. N. dos Reis. "Adaptive Feedforward Control Applied in Switched Reluctance Machines Drive Speed Control in Fault Situations." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 140.5 (2018): 051002. DOI: 10.1115/1.4037836.
11. Wang, Shun-Yuan, Foun-Yuan Liu, and Jen-Hsiang Chou. "Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy." *Applied Soft Computing* 66 (2018): 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.
12. Garcia-Amorós, Jordi. "Linear Hybrid Reluctance Motor with High Density Force." *Energies* 11.10 (2018): 2805. DOI: 10.3390/en1102805.
13. Ye, Jin, Berker Bilgin, and Ali Emadi. "An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives." *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.3 (2015): 1457–1470. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2316272.
14. Dos Santos, Fabio L.M., Jan Anthonis, Francesco Naclerio, Johan J. C. Gyselinck, Herman Van der Auweraer, and Luiz C. S. Góes. "Multiphysics NVH modeling: Simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.1 (2014): 469–476. DOI: 10.1109/TIE.2013.2247012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Никифоров Борис Владимирович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Макаров Арсений Михайлович — аспирант

Научный руководитель:

Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

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

e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor 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: kaf_edas@gumrf.ru

Nikiforov, Boris 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: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Makarov, Arsenii M. — Postgraduate

Supervisor:

Romanovsky, Viktor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2018 г.

Received: December 24, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379

THE UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEM AND ELECTRICAL PROPULSION SYSTEM OF THE ARC7 ICE-CLASS TANKER «SHTURMAN SKURATOV»

V. U. Kolesnichenko

Gazpromneft Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

An overview of the unified electric power system of the ice-class tanker “Shturman Skuratov” with AC-AC current electric propulsion system is provided in the paper. The scheme of the main high-voltage power plant and the table of loads of diesel-generator units in the main operating modes of the vessel is presented. The description of the main modules of frequency converters with intermediate DC link ABB ACS6000, implementing the direct torque control algorithms for synchronous motors with two anchor windings, is given. The basic elements of autonomous voltage inverters built on power semiconductor devices – IGCT thyristors (turn-off thyristors with integrated control unit), complete with reverse diodes of rapidly recovering type are considered. The circuitry solutions applied in the autonomous voltage inverter necessary to protect the turn-off thyristors from excessive values of the current rise rate during switching on and to ensure simultaneity of the thyristors control during locking are considered. The characteristics of the power semiconductors of the phase modules and brake resistors required during braking with the reverse of the propeller motor are given. The main types of protection of a high-voltage power station against overloads caused by the work of the rowing electrical installation, which are described in the ship documentation, are considered. The practical data on the features of the frequency converter at the construction of speed feedback using encoders or the use of data calculated from the adaptive model of the propeller motor at modulation are presented.

Keywords: propulsion electrical system, frequency converter with DC link, autonomous voltage inverter, control system, turn-off thyristor with integrated control unit.

For citation:

Kolesnichenko, Vitalii U. “The unified electric power system and electrical propulsion system of the ARC7 ice-class tanker «Shturman Skuratov».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

УДК 621.316.71

ЕДИНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ГРЕБНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ТАНКЕРА ЛЕДОВОГО КЛАССА ARC7 «ШТУРМАН СКУРАТОВ»

В. Ю. Колесниченко

Газпромнефть Шиппинг, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведен анализ единой электроэнергетической системы танкера ледового класса «Штурман Скуратов» с гребной электрической установкой переменного тока. Представлена схема основной высоковольтной электростанции и таблица нагрузок дизель-генераторных агрегатов в основных эксплуатационных режимах работы судна. Дано описание основных модулей преобразователей частоты со звеном постоянного тока ABB ACS6000, реализующих алгоритмы прямого управления моментом гребных синхронных электродвигателей с двумя якорными обмотками. Рассмотрены основные элементы автономных инверторов напряжения, построенных на силовых полупроводниковых приборах — IGCT-тиристорах (запираемые тиристоры с интегрированным блоком управления), в комплекте с обратными диодами быстро восстанавливающегося типа. Рассмотрены примененные в автономном инверторе напряжения схемотехнические решения, необходимые для защиты запираемых тириستоров от чрезмерных значений скорости нарастания тока при включении и обеспечения одновременности управления тиристорами при запираании. Приведены характеристики силовых полупроводниковых приборов фазных модулей и тормозных резисторов, необходимых при торможении реверсом гребного электродвигателя. Рассмотрены приведенные в судовой документации основные виды защиты высоковольтной электростанции от перегрузок, вызванных работой гребной электрической установки. Представлены

практические данные об особенностях работы преобразователя частоты при построении обратной связи по скорости с применением энкодеров или использовании данных, рассчитанных из адаптивной модели гребного электродвигателя при модуляции.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, преобразователь частоты, звено постоянного тока, автономный инвертор напряжения, система управления, запираемый тиристор, интегрированный блок управления.

Для цитирования:

Колесниченко В. Ю. Единая электроэнергетическая система и гребная электрическая установка танкера ледового класса ARC7 «Штурман Скуратов» / В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

Введение

Танкеры ледового класса Arc7 предназначены для обеспечения круглогодичной транспортировки нефти Новопортовского месторождения от терминала «Ворота Арктики» — единственного в мире нефтеналивного терминала за Полярным кругом. Суда выполнены по уже зарекомендовавшей себя в условиях севера концепции судна двойного действия «Double Acting Ship, DAS»: в свободной воде судно работает носовой частью вперед, во льдах — кормой. Подобное решение и конструктивная прочность усиленного ледового пояса позволяют судам эффективно работать в зимнее время и преодолевать кормой лед толщиной до 1,8 м. В качестве движителей на танкере используются две поворотные на 360° винторулевые колонки типа Azipod серии VI общей мощностью 22 МВт. В источнике [1] приведены такие преимущества данной серии, как высокая маневренность, максимальный крутящий момент ГЭД при работе на низких частотах и даже его остановке, надежность механической конструкции, благодаря чему корпус погружной гондолы выдерживает высокие ударные нагрузки при работе во льдах, а максимальный крутящий момент ГЭД может применяться полностью без механических ограничений. Для обеспечения высокой маневренности судна при грузовых операциях у выносного терминала «Ворота Арктики» в весенне-осенний период в качестве активного средства управления судном используется носовое подруливающее устройство (ПУ) мощностью 1250 кВт.

Приведенные в статье данные могут быть полезны обслуживающему персоналу судов с аналогичным оборудованием при проведении планового технического обслуживания, ремонта и поиска неисправностей, а также использованы для компьютерного моделирования единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) арктических танкеров и других типов судов. Компьютерная модель позволит проводить исследования переходных режимов, оценивать влияние силовой полупроводниковой техники в пропульсивном комплексе на качество электрической энергии, рассчитывать токи короткого замыкания и провалы напряжения [2]. Экспериментальные данные компьютерной модели, имитирующей работу ЕЭЭС в нормальных и аварийных режимах [3], при тяжелой ледовой обстановке могут быть использованы для прогнозирования отказов элементов ЕЭЭС и, согласно правилам РМРС, разработки анализа влияния видов неисправностей (FMEA — Failure Mode Effective Analyze).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Единая электроэнергетическая система судна (ЕЭЭС) состоит из основной судовой электростанции (СЭС) 6,6 кВ, 60 Гц, главного распределительного щита (ГРЩ) общесудовых приемников электроэнергии 440 В, 60 Гц и аварийного распределительного щита (АРЩ) — рис. 1.

Основная СЭС, обеспечивающая питание гребной электрической установки (ГЭУ) переменного тока, включает: два дизельных двигателя STX 14V32/40 мощностью 7000 кВт, 720 об/мин; два дизельных двигателя STX 18V32/40 мощностью 9000 кВт, 720 об/мин; четыре генератора фирмы АВВ: DG1, DG4 мощностью 9333 кВт·А (8400 кВт, $\cos \varphi = 0,9$) и два генератора DG2, DG3 мощностью 7000 кВт·А (6300 кВт, $\cos \varphi = 0,9$). Класс изоляции генераторов — F. Система возбуждения каждого генератора состоит из электронного регулятора напряжения (РН) АВВ

Unitrol 1020, возбуждителя, диодного моста и обмотки возбуждения на роторе генератора. Для обеспечения срабатывания защиты от коротких замыканий (КЗ) РН включает в себя бустерную цепь, необходимую для поддержания установившегося значения тока КЗ. Генераторы имеют водяное охлаждение и сигнализацию от протечек.

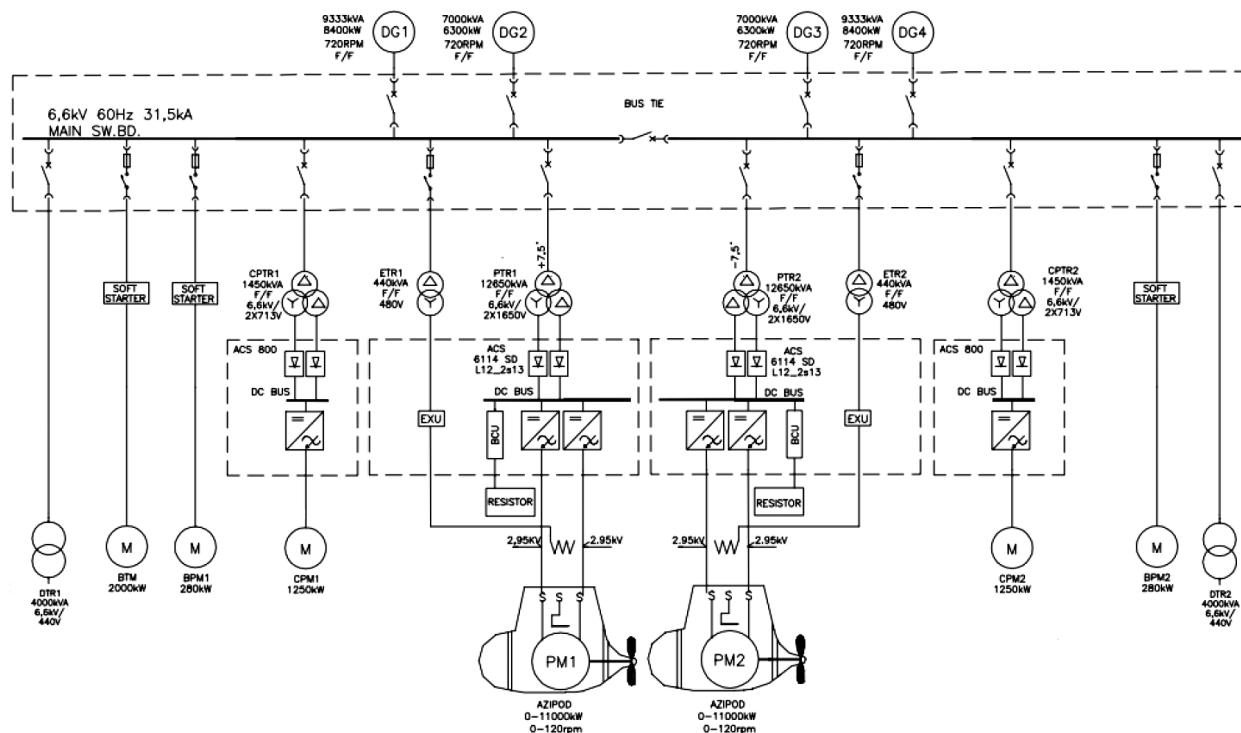


Рис. 1. Схема основной СЭС

ЕЭЭС обладают высокой регулировочной и перегрузочной способностью, высоким КПД на долевых нагрузках, повышают надежность и безопасность эксплуатации всей установки в целом [4], [5]. В табл. 1 приведены нагрузки дизель-генераторных агрегатов (ДГА) в основных режимах работы судна.

Таблица 1

Режимы работы судна «Штурман Скуратов»

Режимы работы судна	Ход в свободной воде	Ход в ледовых условиях	Грузовые операции: выгрузка	Маневренный режим	Стоянка в порту		Аварийный	
					зима	лето	блэкаут	пожар
Азиподы, кВт	12069	23209		2321				
Подруливающее устройство, кВт	—	—	—	1667	—	—	—	—
Грузовые насосы, кВт	—	—	2261	—	—	—	—	—
Балластные насосы, кВт	—	—	506	—	—	—	—	—
Система предотвращения обледенения, кВт	1375	1375	1375	1375	375	—	96	—
Общая нагрузка, кВт	14916	26037	5582	6620	991,5	709,3	408	302
Количество работающих генераторов	2×8400 ДГ	1	2	1	—		—	
	2×6300 ДГ	2	2	0	—		—	

Окончание табл. 1

Количество работающих генераторов	1×1400 Ст. ДГ	—	—	—	—	1		—	
	1×600 АДГ	—	—	—	—	—		1	
	доступная мощность, кВт	21000	29400	8400	8400	1400		600	
Загрузка ДГ, %		71	88,6	66,4	78,8	70,8	50,7	68	50,3

Отбор мощности для ГРЩ 440 В, 60 Гц осуществляется через один из двух понижающих трансформаторов: DTR1, DTR2. Также комплектация ЕЭЭС включает в себя стояночный дизель STX 7L21/31 мощностью 1540 кВт, 900 об/мин и генератор Hyundai Heavy Industries мощностью 1750 кВт·А (1400 кВт, $\cos \varphi = 0,8$). Стояночный дизель-генератор предназначен для питания общесудовых приемников электроэнергии судна при стоянке в порту без проведения грузовых операций. Мощность аварийного ДГА составляет 750 кВт·А (600 кВт, $\cos \varphi = 0,8$).

Пуск электродвигателей балластных насосов и ПУ обеспечивается через устройства плавного пуска. В случае неисправности устройств плавного пуска возможен прямой пуск электродвигателей. Для управления электродвигателями грузовых насосов применяются преобразователи частоты (ПЧ) ABB ACS800. Питание грузовых ПЧ происходит через трехобмоточные трансформаторы CPTR1, CPTR2. Вторичные обмотки трансформаторов соединены по схеме «звезда – треугольник» и сдвинуты на 30°. Линейное номинальное напряжение вторичных обмоток 713 В, 60 Гц. Тип электродвигателя ПУ — асинхронный. Номинальный режим работы S2 — 60 мин.

Гребная электрическая установка. ГЭУ не имеют бесспорных преимуществ для большинства типов судов, но, в связи с отсутствием жесткой механической связи между движителем и валами первичных двигателей, являются наиболее приемлемыми для ледоколов и судов ледового плавания, обладают рядом эксплуатационных достоинств, среди которых можно выделить повышенные маневренные качества, широкую возможность управления и автоматизации, высокую живучесть ЕЭЭС, что обеспечивается возможностью перераспределения нагрузки между первичными двигателями и возможностью их поагрегатного ремонта.

В комплексе винторулевых колонок Azipod в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) используются синхронные машины с двумя якорными обмотками. Применение двух якорных обмоток позволяет достичь уменьшения пульсаций электромагнитного момента ГЭД [6] и возникновения шагового режима, когда двигатель вращается с остановками, особенно при работе на малых частотах и небольшом моменте инерции [7]. По сравнению с асинхронным синхронный ГЭД имеет следующие преимущества:

- большая величина воздушного зазора между статором и ротором, что особенно важно для ледоколов и судов ледового плавания, поскольку снижается вероятность повреждения обмоток двигателя при вибрациях;
- меньшее влияние износа подшипников на изменение характеристик двигателя [8];
- более высокий КПД;
- более высокая перегрузочная способность.

Управление ГЭД осуществляется ПЧ ABB ACS6000, выполненным по схеме «неуправляемый 12-пульсный выпрямитель – звено постоянного тока – управляемый инвертор» с реализацией алгоритмов DTC (Direct Torque Current — прямое управление моментом) и замкнутой системой управления (обратной связью с применением энкодеров — датчиков углового положения). В работе [9] приводится функциональная схема и алгоритм работы метода DTC, основной задачей которого является быстрая реакция электромагнитного момента на возмущающее и управляющее воздействие. В отличие от векторного частотного управления прямое управление моментом

не требует широтно-импульсной модуляции и координатных преобразований. При этом переключение силовых полупроводниковых приборов происходит согласно алгоритму оптимальных переключений, что способствует снижению коммутационных потерь.

ПЧ оснащен многофункциональной микропроцессорной системой управления (МПСУ) с развитым пользовательским интерфейсом. Модульное исполнение ПЧ ACS6000 (рис. 2) ведет к снижению капитальных затрат и занимаемых площадей.

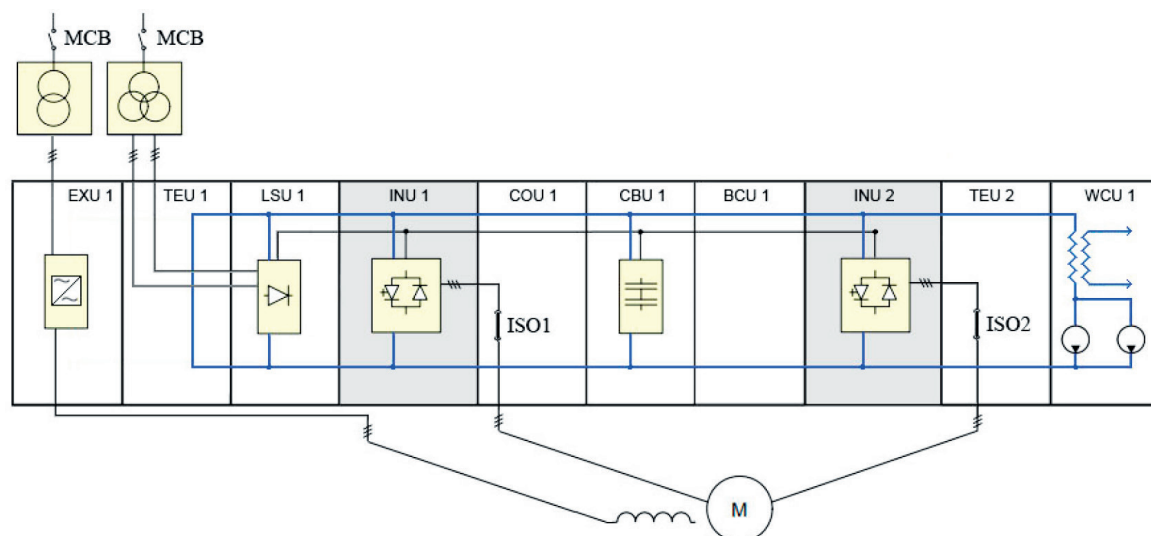


Рис. 2. Конфигурация ПЧ ACS6000 судна «Штурман Скуратов» содержит модули:

- EXU 1* — возбуждения ГЭД; *TEU 1, 2* — крепления силовых шин;
INU 1, 2 — трехуровневых инверторов напряжения; *COU 1* — инверторы контроля;
CBU 1 — инверторы конденсаторов; *BCU 1* — крепления внешних тормозных резисторов;
WCU 1 — водяного охлаждения ПЧ, *MCB* — главные автоматические выключатели;
ISO1, ISO2 — автоматические изоляторы обмоток ГЭД

Модуль *LSU 1* представляет собой 12-пульсный неуправляемый выпрямитель (НВ) на диодах и используется для двухквadrантной работы с постоянным коэффициентом мощности 0,96 во всем диапазоне частот вращения¹. Модуль управления *COU 1* содержит элементы управления, контроля и защиты ПЧ. Основной компонент системы управления — контроллер АМС34, построенный на процессоре Motorola DSP с тактовой частотой 150 МГц. Последние две цифры означают поколение процессора. АМС34 имеет два порта типа PPCS и восемь портов DDCS для передачи данных по оптоволоконной связи. Управление инверторами ПЧ осуществляется контроллером через интерфейсные карты управления и измерений INT-Board. Интерфейсная карта INT-Board используется как система управления и измерений АИН, содержит программируемые элементы с алгоритмом оптимального переключения ключей АИН для поддержания заданной частоты вращения или мощности ГЭД и алгоритмом отключения АИН при аварийных событиях; осуществляет связь между главной картой АМС34 и другим оборудованием АИН. Обмен данными между системой управления и внешними устройствами обеспечивается платами ввода / вывода S800 и шинного модема TB820 серии Advant с помощью протокола DDCS.

Среди программного обеспечения контроллера системы управления основную программу представляет MSM (Main State Machine). Программа вызывается операционной системой контроллера через определенные промежутки времени и управляет пуском, остановкой и обработкой сообщений об ошибках и неисправностях ПЧ. А также определяет оптимальную реакцию на любые события, возникающие при работе. Автономные инверторы напряжения (АИН) *INU1, 2* выполнены по трехфазной мостовой схеме (рис. 3).

¹ Привод Drive ACS 6000 переменного тока среднего напряжения для регулирования скорости и крутящего момента электродвигателей мощностью 3–27 МВт. АBB, 2004. 4 с.

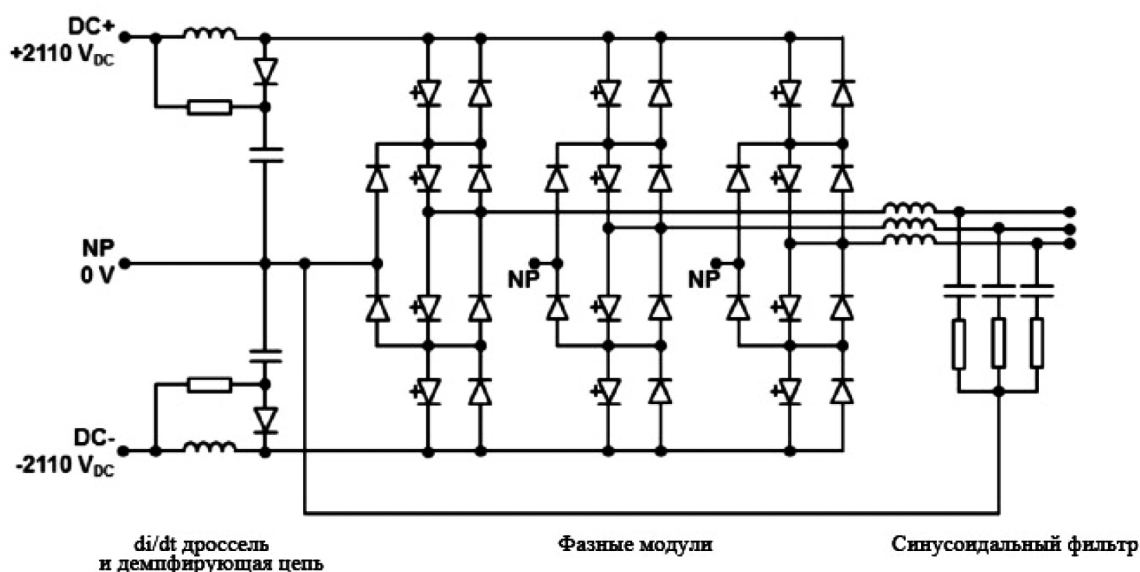


Рис. 3. Трехуровневый АИН на IGCT-тиристорах

Основными элементами АИН (рис. 4) являются:

- три фазных модуля, каждый для отдельной фазы;
- блоки питания драйверов силовых полупроводниковых ключей;
- синусоидальный фильтр;
- интерфейсная карта измерений и управления инвертором INT-Board.

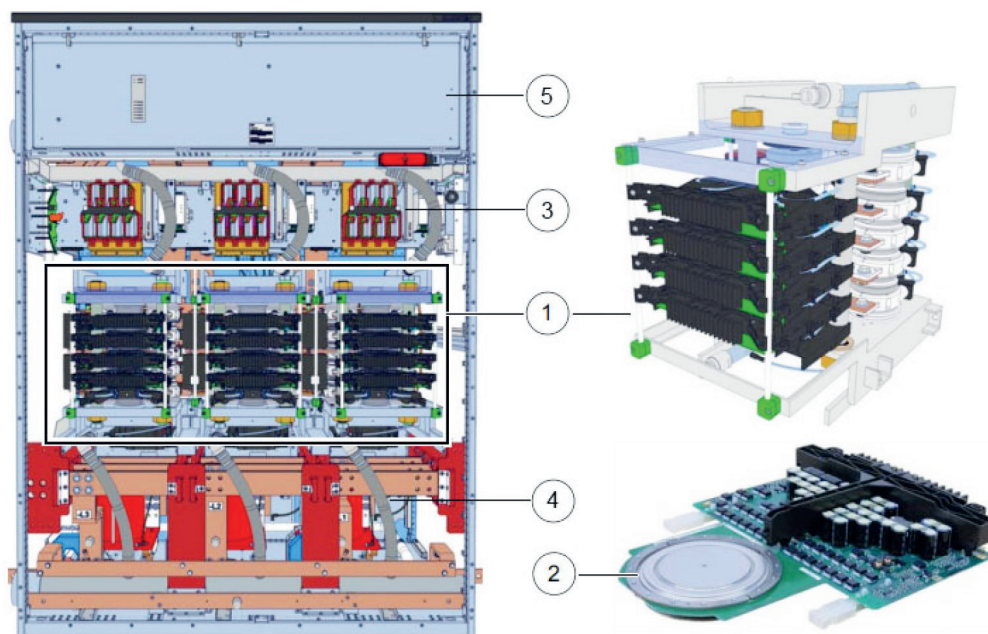


Рис. 4. Модуль АИН ПЧ ACS6000:

- 1 — фазные модули; 2 — IGCT-тиристор; 3 — GUSP блоки питания драйверов IGCT;
4 — водяное охлаждение; 5 — секция платы управления INT-Board

В состав фазного модуля входят четыре ассиметричных силовых полупроводниковых прибора IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления), четыре обратных диода и два диода, подключенных к средней точке. В табл. 2 даны характеристики модели IGCT-тиристора — 5SHY 4045L0004GVC736 производства компании *ABB*.

Таблица 2

Характеристики IGCT-тиристора 5SHY 4045L

Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии	V_{DRM}	4500 В
Максимальный анодный ток	I_{TGM}	4000 А
Ударный неповторяющийся прямой ток	I_{TSM}	$28 \cdot 10^3$ А
Максимальный действующий ток	$I_{T(RMS)}$	2240 А
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии	di/dt_{crit}	200 А/мкс
Пороговое напряжение тиристора	V_{T0}	1,7 В
Динамическое сопротивление	r_T	0,454 мΩ
Выдержка времени включения	$t_{d(on)}$	3,5 мкс (max)
Выдержка времени выключения	$t_{d(off)}$	7 мкс (max)
Энергия включения за один пульс	E_{on}	1,5 Дж (max)

Корпус каждого IGCT-тиристора оснащен тремя светодиодами, индицирующими наличие управляющего сигнала в цепи управления, наличие питания драйвера, неисправность или КЗ полупроводника (мигание третьего светодиода). Команда на включение / выключение тиристора подается на волоконно-оптический разъем-приемник. Разъем-передатчик служит для обратной связи тиристора с интерфейсной картой управления, но в рассматриваемой комплектации не используется. Благодаря тиристорной структуре ток в IGCT приборах нарастает очень быстро. Одна из основных характеристик IGCT-тиристора — критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии di/dt_{crit} (А/мкс). В то же время нельзя утверждать, что ток по структуре полупроводника распространяется равномерно. Наличие паразитных индуктивностей, неравномерность охлаждения, а также некоторые неоднородности структуры полупроводника могут приводить к значительным различиям в температуре тиристора, неравномерности тока в проводящем состоянии и особенно в моменты переключений. Эти факторы оказывают серьезное влияние на проектирование схем с применением IGCT-тириستоров в случаях необходимости их параллельного или последовательного включения.

Для защиты тириستоров от локального перегрева [11], [12] и выхода из строя других элементов цепи необходим ряд схемотехнических решений. Во-первых, для ограничения значений di/dt_{crit} каждый фазный модуль АИН включает два di/dt -дресселя. Во-вторых, дроссели предназначены для ограничения токов КЗ. Индуктивность дросселя можно подобрать такой, чтобы ограничить скорость нарастания тока КЗ в допустимых пределах [13]. Карта фиксирования токов КЗ — VLSCD, подключенная параллельно к каждому дросселю, в случае возникновения аварии подает сигнал по оптоволоконной связи на интерфейсную карту управления инвертором INT-Board, которая без связи с главным контроллером AMC34 при обнаружении токов КЗ останавливает работу ПЧ, размыкает изоляторы ISO1, ISO2 и главный выключатель MCB.

При последовательном соединении IGCT-тиристоров система управления должна обеспечивать одновременность их запираания. Допустимая неодновременность управления — не более 100 нс [13]. Для обеспечения абсолютно одновременного управления IGCT-тиристорами фазного модуля необходимо скомпенсировать все внутренние и внешние допуски, вызванные временными ошибками / задержками в управлении или локальными факторами, например, температурой структуры тиристора [14]. Наличие демпфирующей цепи, входящей в каждый фазный модуль, позволяет исключить возможность несовпадения моментов запираания тиристоров, и следовательно, исключить возможность перегрузки отдельных приборов. Конденсатор этой цепи поглощает все избыточные заряды [15], вызванные незначительными различиями в моментах запираания, тем самым равномерно распределяя напряжение по всем приборам. Для упрощения схемы демпфирующая цепь (см. рис. 3) показана только для одного фазного модуля.

IGCT-тиристор является прибором с односторонней проводимостью. При работе АИН на активно-индуктивную нагрузку, которой являются якорные обмотки ГЭД, ток, обусловленный индуктивностью обмоток, после выключения тиристора протекает через диод в обратном направлении. Наличие обратного диода улучшает условия выключения тиристора [16], поскольку при протекании тока в диоде к тиристорному прикладывается небольшое обратное напряжение. В качестве обратных диодов в комплекте с IGCT-тиристорами эффективно используются диоды быстровосстанавливающегося типа. Характеристики установленных обратных диодов Fast Recovery SSDF 2045L0001 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики обратных быстровосстанавливающихся диодов SSDF 2045L

Повторяющееся обратное импульсное напряжение	V_{RRM}	4500 V
Предельный прямой ток	$I_{F(AV)M}$	1970 A
Ударный неповторяющийся прямой ток	I_{FSM}	$45 \cdot 10^3$ A
Падение напряжения на диоде в открытом состоянии	V_F	4,2 V
Пороговое напряжение диода	V_{FO}	1,56 V
Динамическое сопротивление диода	r_F	0,8 mΩ

Выходное напряжение АИН INU1, 2 представляет собой последовательность двуполярных прямоугольных импульсов высокой частоты. Крутизна фронта определяется частотой переключений IGCT-тириستоров. Прохождение импульса с крутым фронтом вызывает волновые процессы в силовом кабеле, приводя к перенапряжениям [7] на зажимах якорных обмоток ГЭД. Во избежание повреждения изоляции ГЭД импульсами напряжения с высокой скоростью нарастания (du/dt) АИН снабжаются синусоидальными фильтрами.

ПЧ ACS 6000 реализует прямое управление моментом и в рассматриваемой конфигурации построен с замкнутой системой управления с применением энкодеров, выдающих данные через SSI (Synchronous Serial Interface) интерфейс. Коммутацией IGCT-тиристоров АИН напрямую регулируются основные переменные ГЭД: магнитный поток статорных обмоток и вращающий момент. При этом частота вращения ротора ГЭД рассчитывается как в процессе модуляции МПСУ ПЧ из адаптивной модели ГЭД, для которой входными данными являются значения токов и напряжение звена постоянного тока, так и с помощью энкодеров. МПСУ производит вычисления состояния адаптивной модели ГЭД каждые 25 мкс, т. е. 40000 раз в секунду. Таким образом, обратная связь по скорости у ПЧ ACS6000 может строиться без применения энкодеров. Помимо этого возможны ситуации, при которых рассчитанное с помощью энкодеров значение частоты вращения ротора ГЭД после перевода рукояток задатчиков скорости в нулевое положение и поступления ПЧ команды СТОП (Stop Cmd) не достигнет предустановленного минимального значения скорости (параметр 20,03 Zero Speed Limit), которым программа MSM системы управления определяет завершение действий по снижению скорости, остановку (Zero Speed Detection), переводя ПЧ из одного рабочего состояния (ReadyRef — во время работы) в другое (ReadyRun — после остановки).

Из рис. 5, а видно, что при модуляции момент остановки вращения ГЭД определяется командой СТОП и моментом прекращения преобразователем частоты модуляции независимо от текущей частоты вращения. При работе энкодеров (см. рис. 5, б) завершение программы по снижению скорости и перевод ПЧ в следующее рабочее состояние должны произойти при значении частоты вращения двигателя меньше установленного параметра 20,03. В связи с этим для корректной работы ГЭУ заводскими настройками момент определения остановки ГЭД предусмотрен временем снижения скорости и прекращения модуляции. Время участка снижения скорости в МПСУ ПЧ, определяемое параметром Process Stop Ramp, составляет 20 с. Описанная ситуация возможна, например, если винт ГЭД подкручивается течением. В этом случае после команды СТОП, завершения ПЧ модуляции и снижении скорости параметр, определяющий момент остановки, должен быть ак-

тивирован другим способом, иначе программа по снижению скорости ГЭД не завершится, и последующий пуск ГЭД станет невозможным¹. Наиболее доступным выглядит увеличение параметра минимального значения скорости (20,03 Zero Speed Limit).

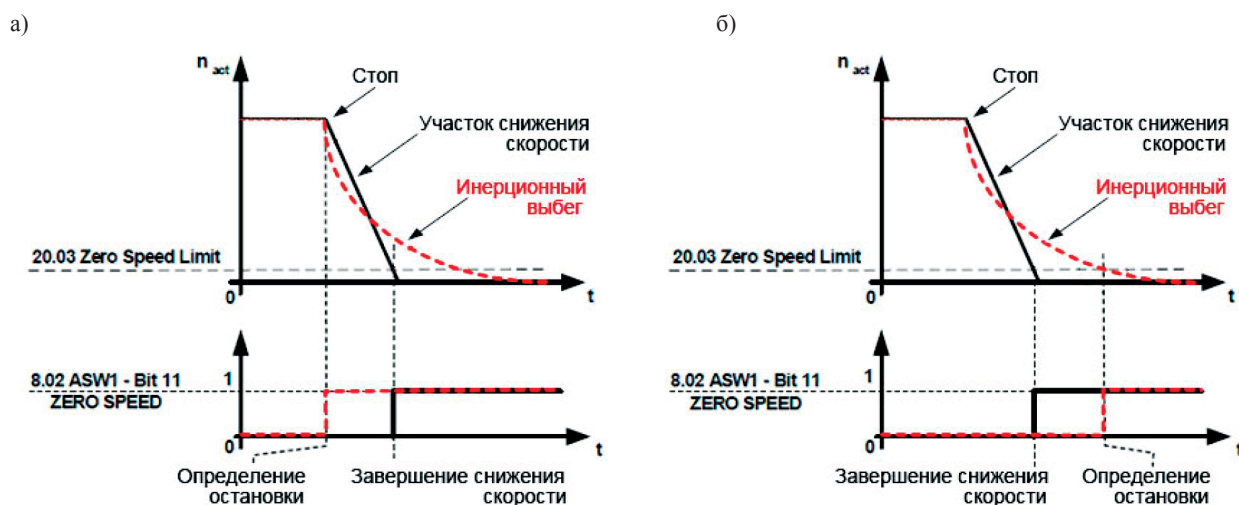


Рис. 5. Определение момента остановки ГЭД при модуляции (а) и при работе энкодеров (б)

В системах DTC и векторного управления помимо создания обратной связи по скорости, датчики применяются для регулирования момента на валу двигателя на низких частотах. Каждый ГЭД оборудован двумя энкодерами. Для режима работы с поддержанием постоянной частоты вращения МПСУ использует данные, полученные от датчиков, а в качестве резервных — данные, рассчитанные при модуляции. При рассогласовании между показаниями МПСУ выдает сигнал о неисправности энкодера (Encoder Mismatch), переходя на данные, получаемые из адаптивной модели ГЭД.

Модульная конфигурация ПЧ и применение ГЭД с двумя якорными обмотками повышают надежность ГЭУ. При неисправности одного из АИН или обмотки ГЭД предусмотрен переход на режим работы с одной якорной обмоткой при снижении рабочих показателей² — табл. 4.

Таблица 4

Ограничение рабочих показателей ГЭД при работе с одной обмоткой

Неисправность ГЭУ после звена постоянного тока ПЧ (АИН, ГЭД)	Мощность, %	Момент, %	Скорость, %
	35,4	50	70

Торможение судна осуществляется двумя способами: разворотом винторулевых колонок на 180° и реверсом гребного электродвигателя. При использовании в конфигурации ПЧ на входе активного выпрямителя возможна рекуперация в судовую сеть электроэнергии, вырабатываемой при реверсировании ГЭД. В рассматриваемой комплектации ПЧ возвращаемая энергия рассеивается в виде тепла на внешних тормозных резисторах (табл. 5), подключаемых тормозными IGCT-тиристорами в модуле BCU1 по значению превышения максимального значения напряжения в звене постоянного тока.

Таблица 5

Характеристики тормозных резисторов

Конструкция	Две секции резисторов, соединенных последовательно
Материал резисторов	NiCrMo 25–20–5
Температурный коэффициент сопротивления α (20 °C – 550 °C)	0,000453 / k

¹ User's Manual. Signal and Parameter table. ABB, 2015. 128 с.

² ACS6000 — Drive Backup Control. ABB, 2016. 5 с.

Изменение сопротивления от 20 °С до 550°С	+ 24 %
Сопротивление при 20 °С	2×3,6 Ω
Сопротивление при 550 °С	2×4,464 Ω
Заводская погрешность	+/- 10 %
Максимально допустимый ток	880 А
Рабочий режим	60 МДж/20 с каждые 30 мин
Номинальное рабочее напряжение	2,7 кВ (max 3,2 кВ)
Индуктивность	Менее 240μ Гн на одну секцию резисторов
Тип охлаждения	Водяное

Если реверсирование ГЭД происходит при высокой скорости судна, то для предотвращения повреждения тормозных резисторов система управления ГЭУ выдает команду ПЧ на остановку модуляции и воздействия на ГЭД, обеспечивая снижение скорости за счет свободного вращения винта до безопасного уровня, после чего происходит реверсирование¹. Питание ПЧ ГЭУ происходит через трехобмоточные трансформаторы, вторичные обмотки которых включены по схеме *звезда – треугольник*, сдвинутые в пространстве на 30 эл. град. Номинальное напряжение вторичных обмоток трансформатора 1660 В, 60 Гц.

Применение трансформатора со сдвигом фаз обеспечивает гальваническую развязку между высоковольтной сетью и ПЧ, позволяет реализовать двенадцатипульсный режим выпрямления и существенно снизить гармонические искажения, тем самым улучшая качество напряжения на шинах высоковольтной СЭС. Трансформаторы выполнены по технологии RESIBLOC с воздушным и водяным охлаждением, установлена сигнализация от протечек. Секция возбуждения каждого ПЧ имеет свой собственный понижающий трансформатор ETR1, ETR2 (см. рис. 1).

Защитные функции системы управления ГЭУ. При работе в тяжелых ледовых условиях предусмотрена возможность работы ПЧ и ГЭД с моментом 180 % от $M_{ном}$ в течение 60 с, после чего происходит снижение момента до 100 % на 600 с для охлаждения цепей ПЧ. По истечении периода охлаждения снова доступен 60-секундный режим перегрузки.

Для обеспечения безаварийной работы и предотвращения перегрузок судовой электростанции, согласно ч. XI, разд. 17.14.1 Правил РМРС², система управления (СУ) ГЭУ имеет ряд следующих защитных функций:

- отправка сигнала «достаточности мощности» к автоматизированной системе управления электростанцией (PMS — Power Management System);
- мониторинг состояния автоматических выключателей дизель-генераторов:
 - для внутреннего расчета доступной мощности судовой электростанции средствами ПЧ ACS6000;
 - для обнаружения аварийной остановки генераторов;
 - для расчета значения максимально разрешенного увеличения нагрузки на СЭС;
- мониторинг нагрузки генераторов;
- мониторинг частоты сети судовой электростанции.

Расчет доступной мощности для каждого ГЭД выполняется средствами судовой PMS и собственной МПСУ ПЧ ACS6000. Собственная система расчета мощности предусмотрена в качестве резервной, она повышает надежность ГЭУ, обеспечивая ее работу в случае неисправности судовой системы управления электростанцией.

При аварийном отключении работающего в сети генератора для предотвращения перегрузки оставшихся в работе генераторов СУ ступенчато снижает мощность ГЭУ.

¹ ACS6000 — User's Manual. PCS Functional Description. ABB, 2017. 14 с.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI: Электрическое оборудование. 2016. 96 с.

Любые события в ЕЭЭС, способные повлиять на работоспособность ГЭУ, делятся МПСУ ПЧ на две категории со своим приоритетом и алгоритмом срабатывания защит ПЧ:

1-й приоритет — события, возникающие между основной СЭС и ПЧ. При возникновении аварийных ситуаций размыкается главный выключатель МСВ, якорные обмотки ГЭД отключаются изоляторами ISO1 и ISO2 от АИН, разряжается звено постоянного тока;

2-й приоритет — события, возникающие между ПЧ и ГЭД. Отключаются только обмотки ГЭД. ЗВП не разряжается для возможности быстрого введения в работу после устранения неисправности.

Связь между ПЧ и СЭС осуществляется с помощью протокола GOOSE (общее объектно-ориентированное событие на подстанции), описанного в Стандарте МЭК-61850. В случае неисправности в сети передачи данных для предотвращения перегрузки СЭС работой ГЭУ предусмотрена резервная передача информации о частоте сети.

Выводы (Symmary)

1. Комплектация ЕЭЭС ДГА различной мощности позволяет поддерживать оптимальную загрузку первичных двигателей в наиболее продолжительных режимах работы судна, что положительно сказывается на расходе горюче-смазочных материалов и моторесурсе двигателей.

2. Работа судна во льдах вне подготовленного канала при 90 %-й загрузке всех ДГА сопровождается чрезвычайно сильными вибрациями, оказывающими негативное влияние как на элементы корпуса судна в целом, так и на отдельные механизмы машинного отделения.

3. СУ ГЭУ имеет комплекс защит, направленных на предотвращение перегрузки СЭС и компонентов ПЧ. Тем не менее при работе в тяжелых ледовых условиях наблюдаются аварийные остановки ГЭУ и выход из строя полупроводниковых приборов ПЧ.

4. Применение у ПЧ алгоритмов прямого управления моментом ГЭД позволяет при отклонении с высокой точностью и быстродействием поддерживать заданную частоту и мощность.

Автор выражает благодарность суперинтенданту блока главного инженера ООО «Газпром-нефть Шиппинг» В. Ю. Загорюлько за ценные рекомендации при написании статьи и предоставленную техническую документацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

2. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

3. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

4. Григорьев А. В. Эксплуатация судовых систем электроснабжения / А. В. Григорьев, А. В. Пруссков, Л. А. Лемин. — СПб.: Изд-во ГМА. им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 8 с.

5. Григорьев А. В. Анализ возможности применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 159–165. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-159-165.

6. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, В. Г. Титов, Г. М. Мирясов. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 151 с.

7. Иванов В. С. Электрооборудование морских комплексов / В. В. Романовский, В. Н. Куракин, В. С. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 185 с.
8. Титов М. П. Частотно-регулируемый синхронный электродвигатель / М. П. Титов. — Братск, Изд-во БРИИ, 1998. — 112 с.
9. Малышев В. А. Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В. А. Малышев, В. С. Иванов, В. С. Соловей // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.
10. Wei T. Experimental Evaluation of IGCT Converters with reduced di/dt limiting inductance / T. Wei, Q. Song, J. Li, B. Zhao, Z. Chen, R. Zeng // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). — IEEE, 2018. — Pp. 1710–1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.
11. Nagel A. Characterization of IGCTs for series connected operation / A. Nagel, S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. — IEEE, 2000. — Vol. 3. — Pp. 1923–1929. DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.
12. Линдер С. Силовые полупроводниковые приборы. Ч. I. Основные сведения и область применения / С. Линдер. — ABB Review 4, 2006. — Pp. 38–39.
13. Nagel A. A 24 MVA inverter using IGCT series connection for medium voltage applications // A. Nagel, S. Bernet, P. K. Steimer, O. Apeldoorn // Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference. — 2001. — Vol. 2. — Pp. 867–870.
14. Линдер С. Силовые полупроводниковые приборы. В центре тихой революции / С. Линдер. — ABB Review 4, 2003. — 29 с.
15. Розанов Ю. К. Силовая электроника / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. — М.: Изд-во МЭИ, 2009. — 76 с.

REFERENCES

1. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. “Prospects for the development of electromotive systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
2. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.
3. Egorov, L. E. Komp'yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol'noi sudovoi elektro-energeticheskoi sistemy s propul'sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal'nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admiral S.O. Makarova», 2014.
4. Grigoryev, A. V., A. V. Prussakov, and L. A. Lemin. *Ekspluatatsiya sudovykh sistem jelektrosnabzheniya*. SPb.: Izd-vo GUMRF. im. adm. S. O. Makarova, 2009.
5. Grigoryev, A. V., A. Ju. Vasil'ev, and S. M. Malyshev. “Analysis of capability of using of high-voltage electric power plants for ships with electric propulsion systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(39) (2016): 159–165. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-159-165.
6. Dar'enkova, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.
7. Ivanov, V. S., V. V. Romanovskij, and V. N. Kurakin. *Elektrooborudovanie morskikh kompleksov*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
8. Titov, M. P. *Chastotno-reguliruemyy sinhronnyy jelektrodvigatel*. Bratsk, BrII, 1998.
9. Malyshev, Vladimir Alekseevich, Vladimir Sergeevich Ivanov, and Valery Sergeevich Solovey. “Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.
10. Wei, Tianyu, Qiang Song, Jianguo Li, Biao Zhao, Zhengyu Chen, and Rong Zeng. “Experimental evaluation of IGCT converters with reduced di/dt limiting inductance.” *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2018. 1710–1716. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341248.

11. Nagel, A., S. Bernet, T. Bruckner, P. K. Steimer, and O. Apeldoorn. "Characterization of IGCTs for series connected operation." *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy*. Vol. 3. IEEE, 2000. 1923–1929. DOI: 10.1109/IAS.2000.882141.

12. Linder, S. *Silovye poluprovodnikovye pribory. Chast pervaja: osnovnye svedeniya i oblast primeneniya*. ABB Review 4, 2006.

13. Nagel, A., S. Bernet, P. K. Steimer, and O. Apeldoorn. "A 24 MVA inverter using IGCT series connection for medium voltage applications." *Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference*. Vol. 2. 2001. 867–870.

14. Linder, S. *Silovye poluprovodnikovye pribory. V centre tixoy revolucii*. ABB Review 4, 2003.

15. Rozanov, U. K., M. V. Rjabchickij, and A. A. Kvasnuk. *Silovaja elektronika*. M.: MEI, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колесниченко Виталий Юрьевич —
электромеханик н/т «Штурман Скуратов»
Газпромнефть Шиппинг
199178, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, 3-я линия В.О., д. 62, лит. А
e-mail: ni-hm@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kolesnichenko, Vitalii U. —
Electrical Engineer
Gazpromneft Shipping
62/A V.I. 3rd line, St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: ni-hm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.

Received: January 29, 2019.

THE QUALITY INDICATORS AND OPTIMALITY CRITERION AT THE STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES

A. V. Saushev, E. V. Bova

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

It has been shown that the structural and parametric synthesis is the main way to ensure the working capacity and the set quality level of the automated electric drives (AED) at all stages and phases of their life cycle. At the same time the structural synthesis assumes the selection of the AED construction option, and the parametric synthesis is directed to determination of nominal values of the electric drive internal parameters and the permissible limits of their change at which the electric drive maintains the operating state. It has been established that a set of AED quality indicators formation and synthesizing the optimality criterion are necessary to solve the problems of structural-parametric synthesis. The AED morphological analysis is performed, its structure is defined, it has been shown that in many cases the multi-mass mechanical system of the electric drive can be reduced to a dual-mass calculation scheme. The classification of control and disturbing influences of the AED is considered, and the parameters characterizing its state have been established. The AED quality indicators are analyzed and a conclusion on their use in relation to a problem of structural and parametric synthesis is made. It has been established that the decisive role in selecting the AED structure is provided by the technical and economic indicators, and to solve the problem of parametric synthesis such indicator is the working capacity resource characterizing the AED parametric reliability at limited statistical information on the laws of changes in the parameters of its elements. The optimization methodology in relation to the structural-parametric synthesis of AED based on specially introduced postulates is developed. Based on the obtained results, a conclusion on the necessity to use the working capacity resource at the parametric synthesis of AED, as well as expediency of its application as an objective function at limited information on the laws of changes in the AED internal parameters or its complete absence, is made. It has been shown that the information on the working capacity resource is also necessary for the structural synthesis of AED. Moreover, it can be recommended also as the optimality criterion.

Keywords: automated electric drive, quality indicators, optimality criterions, working capacity resource, structural-parametric synthesis.

For citation:

Saushev, Alexander V., and Elena V. Bova. "The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.2 (2019): 380–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395.

УДК 658.512

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

А. В. Саушев, Е. В. Бова

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

Показано, что структурно-параметрический синтез является основным способом обеспечения работоспособности и заданного уровня качества автоматизированных электроприводов (АЭП) на всех этапах и стадиях их жизненного цикла. При этом структурный синтез предполагает выбор варианта построения АЭП, а параметрический синтез направлен на определение номинальных значений внутренних параметров электропривода и допустимых пределов их изменения, при которых электропривод сохраняет работоспособное состояние. Установлено, что для решения задач структурно-параметрического синтеза необходимо сформировать совокупность показателей качества АЭП и синтезировать

критерий оптимальности. Выполнен морфологический анализ АЭП, определена его структура, показано, что во многих случаях многомассовая механическая система электропривода может быть приведена к двухмассовой расчетной схеме. Рассмотрена классификация управляющих и возмущающих воздействий АЭП, установлены параметры, характеризующие его состояние. Проанализированы показатели качества АЭП и сделан вывод по их использованию применительно к задаче структурно-параметрического синтеза. Установлено, что определяющую роль при выборе структуры АЭП оказывают технико-экономические показатели, а для решения задачи параметрического синтеза таким показателем является запас работоспособности, характеризующий параметрическую надежность АЭП при ограниченной статистической информации о законах изменения параметров его элементов. Разработана методология оптимизации применительно к структурно-параметрическому синтезу АЭП, основанная на специально введенных постулатах. На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости использования запаса работоспособности при параметрическом синтезе АЭП, а также о целесообразности его применения в качестве целевой функции при ограниченной информации о законах изменения внутренних параметров АЭП или ее полном отсутствии. Показано, что информация о запасе работоспособности необходима также для структурного синтеза АЭП. При этом его можно рекомендовать и в качестве критерия оптимальности.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, показатели качества, критерии оптимальности, запас работоспособности, структурно-параметрический синтез.

Для цитирования:

Саушев А. В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 380–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395.

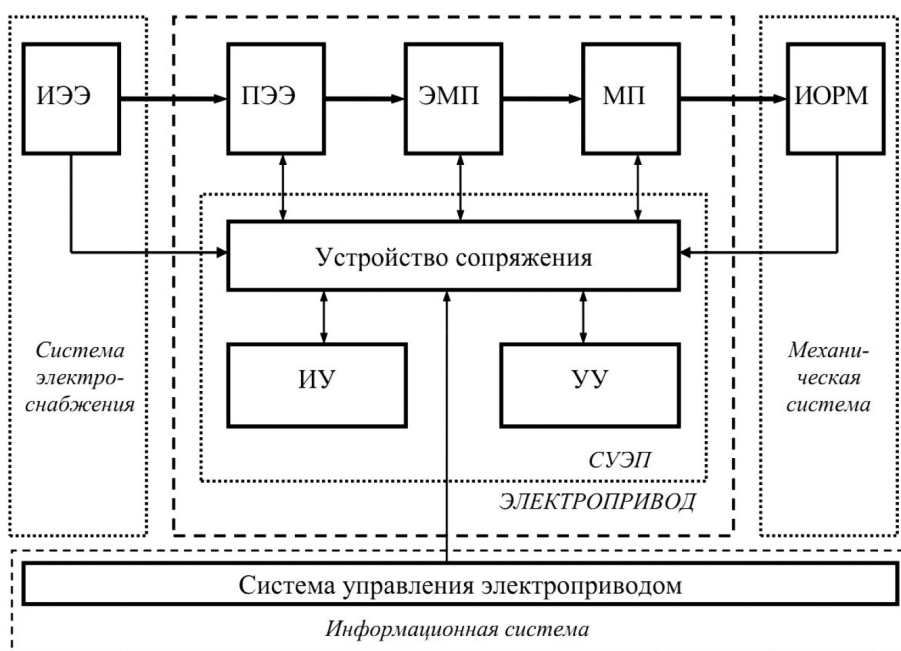
Введение (Introduction)

Структурно-параметрический синтез является основным способом обеспечения работоспособности и заданного уровня качества автоматизированных электроприводов (АЭП) на всех этапах и стадиях их жизненного цикла. При этом структурный синтез предполагает выбор варианта построения АЭП, а параметрический синтез направлен на определение номинальных значений внутренних параметров электропривода и допустимых пределов изменения этих параметров, при которых электропривод сохраняет работоспособное состояние. Для решения этих задач необходимо сформировать критерий оптимальности, который, как показывает анализ источников [1]–[4], отличается сложностью и неоднозначностью. Для построения критерия оптимальности необходимо сформировать совокупность показателей качества АЭП и каким-либо способом решить задачу векторной (многокритериальной) оптимизации. Это обусловлено тем, что показатели качества АЭП по своей природе являются противоречивыми. Улучшение значений одних показателей, например, за счет выбора другого варианта решения, приводит к ухудшению значений других показателей качества. При выборе показателей качества на этапе параметрического синтеза АЭП достаточно часто рассматривают лишь показатели назначения, причем, как правило, во внимание принимают лишь динамические показатели — время переходного процесса и максимальное перерегулирование [5]. В работах [2], [6] применительно к электротехническим системам и электроприводу показано, что решение задачи параметрической оптимизации должно обязательно учитывать показатели надежности. Более того, эти показатели во многих случаях целесообразно использовать в качестве целевой функции.

Так как критерии имеют противоречивый характер и их экстремальные значения не могут быть реализованы одновременно, принимаемое решение должно обеспечивать некоторое компромиссное сочетание всех показателей качества. При этом следует иметь в виду, что улучшение энергетических показателей АЭП можно обеспечить путем разработки эффективных алгоритмов управления, учитывающих оптимальные конструктивные и режимные параметры электропривода, полученные в результате многокритериальной оптимизации. Кроме того, необходимо отметить, что в настоящее время в технической литературе отсутствует подробный анализ показателей качества АЭП, которые следует рассматривать при решении задач оптимального структурного

Целью работы является морфологический анализ АЭП и, как следствие, формирование множества показателей качества, которые должны учитываться при решении задачи структурно-параметрического синтеза АЭП в условиях ограниченной статистической информации о законах изменения их внутренних параметров и математических форм записи, а также анализ возможных способов формирования целевой функции, необходимой для решения задачи структурно-параметрического синтеза АЭП в условиях многокритериальности.

Электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение исполнительного органа рабочей машины (ИОРМ) и управления этим движением. Элементами электропривода являются: преобразователь электрической энергии (ПЭЭ), электромеханический преобразователь (ЭМП), механический преобразователь (МП) и система управления электропривода (СУЭП), состоящая из устройства сопряжения, информационного устройства (ИУ) и устройства управления (УУ) — рис. 1. В качестве ПЭЭ в современном автоматизированном электроприводе (АЭП), как правило, применяется частотный преобразователь. Наиболее распространенным электромеханическим преобразователем является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Вместе с тем в последние годы для общепромышленного и судового электропривода все чаще применяются вентильно-индукторные машины с постоянными магнитами и другие конструкции синхронных электрических машин, наиболее перспективными среди которых являются реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.



382

На рис. 1, кроме элементов электропривода, показаны: источник электрической энергии (ИЭЭ), исполнительный орган рабочей машины (ИОРМ) и система управления электроприводом, которая является внешней по отношению к электроприводу системой более высокого иерархического уровня. Под механической системой электропривода будем понимать систему, состоящую из механического преобразователя (передаточное устройство), рабочей машины и элементов сопряжения вращающихся валов (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема механической системы электропривода

Приведенные на этом рисунке переменные, соответственно, обозначают: $M_{вд}$, $M_{рм}$, $M_{ио}$ — моменты, соответственно, на валу электродвигателя, рабочей машины, исполнительного органа; $\omega_{вд}$, $\omega_{рм}$, $\omega_{ио}$ — угловые скорости вала электродвигателя, рабочей машины, исполнительного органа; $F_{ио}$, $v_{ио}$ — соответственно усилие и линейная скорость исполнительного органа.

Анализ производственных механизмов показывает, что при определенных допущениях они имеют общие динамические свойства и во многих случаях многомассовая механическая система электропривода может быть приведена к двухмассовой расчетной схеме. При выполнении операций приведения следует использовать разработанный одним из авторов [7] точный метод перехода от полной расчетной схемы механической системы к эквивалентной расчетной схеме. При этом точность вычисления эквивалентных параметров двухмассовой механической системы (моменты инерции — J_1 , J_2 , коэффициент жесткости упругой связи — c_{12} , коэффициенты демпфирования вращающихся масс — β_1 , β_2 , коэффициент демпфирования упругой связи — β_{12}) повышается до 20 % относительно упрощенного классического подхода.

При решении задач структурно-параметрического синтеза АЭП следует рассматривать как динамические системы, т. е. системы, находящиеся в каждый момент времени в одном из возможных состояний и способные переходить из одного состояния в другое по внешним и внутренним причинам. Эти причины обусловлены воздействиями внешней среды, которые будем называть *входными воздействиями на электропривод и внутренними возмущениями в элементах АЭП*. Среди входных воздействий можно выделить задающие $u(t)$ и возмущающие $V(t)$ воздействия.

Задающие воздействия можно разделить на управляющие, характеризующие рабочие режимы работы АЭП, и тестовые. Управляющие воздействия могут быть координатными, параметрическими и структурными. Они также могут быть рабочими и аварийными. Рабочие воздействия имеют место в рабочих режимах функционирования АЭП и его элементов. Эти воздействия заранее известны и определяются техническими требованиями к электроприводу. Аварийные воздействия являются вынужденными и направлены на сохранение работоспособного или частично работоспособного состояния АЭП. Тестовые воздействия имеют место в режимах наладки и технического диагностирования АЭП и его элементов. Они, как правило, по своим параметрам отличаются от рабочих воздействий и, по своей сути, являются координатными воздействиями. При этом АЭП или его элементы на время технического диагностирования выводятся из эксплуатации.

Координатными управляющими воздействиями являются принудительные изменения переменных состояния в виде напряжения питания, подводимого к элементам АЭП от источника электрической энергии, и напряжения, задающего сигналы управления на входах СУЭП.

Параметрическими управляющими воздействиями являются специально предусмотренные вариации параметров элементов АЭП, включая не только параметры комплектующих элементов, но и конструктивные параметры, задающие их геометрические размеры и отношения.

Структурными управляющими воздействиями являются любые целенаправленные изменения структуры АЭП и рабочей машины. К ним, например, относятся: изменения структуры регуляторов СУЭП, необходимые для обеспечения заданных динамических свойств АЭП (рабочее

воздействии); отключения части электродвигателей в многодвигательном электроприводе с целью экономии электрической энергии (рабочее воздействие); отключения некоторых элементов рабочей машины (потребителей электрической энергии) для обеспечения частично работоспособного состояния многодвигательного АЭП в случае невозможности формирования заданной активной мощности из-за отказа электродвигателя или передаточного устройства (аварийное воздействие).

Возмущающие воздействия, действующие на АЭП, являются случайными и не зависят от человека-оператора в случае автоматизированного управления или от задающей программы при автоматическом управлении. Возмущающие воздействия могут быть координатными, параметрическими и режимными.

Координатные возмущения, называемые также *помехами*, или *случайными входными сигналами*, обусловлены влиянием силовых полей других систем, например, системы электроснабжения. Для АЭП к ним можно отнести различные наводки и гальванические связи по питанию. По своей физической природе задающие воздействия и помехи являются фазовыми переменными и для АЭП они представляют собой токи, напряжения, мощности, движущие моменты и силы.

Параметрические возмущения обусловлены изменением физических характеристик элементов АЭП. Они являются следствием действия различных дестабилизирующих факторов внешней среды, природа которых случайна. К ним, например, относятся температура, влажность, запыленность, вибрация, солнечная и проникающая радиация.

Режимные возмущения определяются параметрами переменных состояния механической системы электропривода во всех заданных режимах его работы. Этими переменными являются моменты сопротивления рабочей машины и передаточного устройства, которые можно разделить на активные и реактивные моменты. Будем считать, что электромагнитный момент электродвигателя является движущим. Этот случай является наиболее распространенным на практике. Активными моментами сопротивления при этом являются момент сопротивления рабочей машины и упругие моменты в упругих элементах многомассовой механической системы электропривода. Реактивными моментами сопротивления являются моменты трения в упругих связях и во вращающихся массах механической системы. Эти моменты определяют нагрузку на электропривод.

Воздействия АЭП на внешнюю среду будем называть *реакциями системы* (выходными переменными АЭП) и обозначать их множество через вектор $\mathbf{y}(t)$, а выходные переменные элементов АЭП обозначать как $\mathbf{Z}(t)$. По своей физической природе выходные переменные являются переменными состояния. К ним, например, относится угловая скорость электропривода, а также напряжение на выходе регуляторов СУЭП и электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем.

Состояние АЭП в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором (вектором) параметров. К ним относятся:

– входные параметры: $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_g, \dots, u_e)$, характеризующие задающие воздействия $\mathbf{u}(t)$ и наблюдаемые на входах АЭП;

– внешние параметры: $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_p, \dots, v_f)$, характеризующие возмущающие воздействия, действующие на АЭП;

– внутренние параметры: $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$, характеризующие состояние комплектующих элементов АЭП и их конструктивные характеристики. Поскольку эти параметры определяют материально-структурное состояние электропривода [8], их также называют *первичными параметрами*. Параметрами комплектующих элементов АЭП являются сопротивления резисторов, индуктивности катушек, емкости конденсаторов, массы, моменты инерции, жесткости упругих связей, коэффициенты демпфирования, а также функции от этих параметров, имеющие определенный физический (коэффициенты усиления, постоянные времени, коэффициенты соотношения масс);

– внутренние параметры $\mathbf{u}^v = (u_1^v, u_2^v, \dots, u_i^v, \dots, u_e^v)$, $\mathbf{Z}^v = (Z_1^v, Z_2^v, \dots, Z_j^v, \dots, Z_c^v)$, характеризующие, соответственно, переменные состояния на входах и выходах электротехнических, электромеханических и механических устройств, входящих как элементы $v = \overline{1, h}$, h — количество элементов в составе АЭП;

– выходные параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, характеризующие свойства АЭП, интересующие потребителя. Это параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_d)$, $d = c \cdot v$ АЭП и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность системы. Эти параметры обычно являются показателями качества АЭП.

Среди множества внутренних параметров X можно выделить подмножества целевых параметров $X_{\text{ц}} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$, $n < N$, определяющие достижение поставленной цели, оказывая заметное влияние на выходные параметры АЭП, и настраиваемых параметров $X_{\text{н}} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_q)$, $q \leq n$, которыми обычно являются коэффициенты усиления и постоянные времени СУЭП.

Математическая модель, описывающая динамические свойства АЭП, может быть представлена уравнением

$$Y = F(X, u, Z, V, t), \quad (1)$$

где F — оператор связи, определяющий форму взаимосвязи параметров и переменных АЭП.

Показатели качества электроприводов. В соответствии с системным анализом и данными работы [8] будем различать три основных разновидности качества: материально-структурное, функциональное и потенциальное системное. В первом случае АЭП рассматривают как систему со сложным внутренним строением; во втором случае — как элемент этой системы; в третьем — как элемент с потенциальными возможностями «включения» в различные окружающие его системы, удовлетворяющий требованиям этих систем. В отличие от первых двух разновидностей качества, наблюдаемых в системе через свойства материалов ее комплектующих элементов и параметры рабочих процессов, третья разновидность качества является системной и в АЭП присутствует в них лишь как признак системы. Потенциальные системные качества АЭП непосредственному наблюдению недоступны и рассматриваются лишь при решении отдельных задач структурно-параметрического синтеза. Внутри каждой разновидности качества можно выделить группы показателей [8]. Функциональные показатели АЭП можно разделить на технико-экономические: назначения, надежности, экономичности, и эргатические: эргономические, эстетические и экологические показатели безопасности.

Для структурно-параметрического синтеза основными показателями качества, определяющими выбор целевой функции при оптимизации АЭП, являются технико-экономические показатели. Следуя методологии параметрического управления состоянием электротехнических систем [8], эти показатели необходимо исследовать на всех стадиях и этапах жизненного цикла электропривода и его элементов. При этом можно выделить координатное, параметрическое и структурное управление, а АЭП представить в виде «черного ящика» (рис. 3) с указанными ранее параметрами и показателями качества.

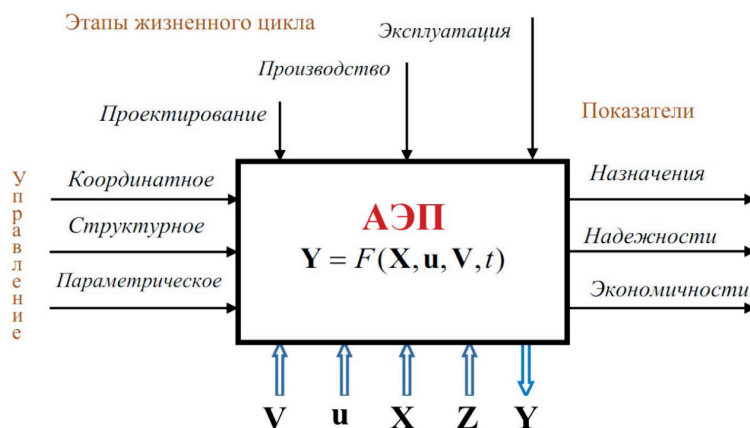


Рис. 3. Модель электропривода в процессе структурно-параметрического управления состоянием

Показатели назначения. Данные показатели характеризуют динамические и статические свойства АЭП, определяющие основные функции, для выполнения которых он предназначен. Можно выделить четыре группы динамических показателей, которые также называют критериями качества. Эти показатели характеризуют динамические свойства АЭП.

К первой группе относятся показатели, в той или иной степени используемые для оценки качества сигнал рассогласования в различных типовых режимах работы электропривода. Эту группу составляют *критерии точности*. Точность, характеризующая установившийся режим работы АЭП, однозначно оценивается величиной ошибки, равной разности между требуемым и действительным значениями управляемого сигнала: $u^0(t) = u(t) - Z(t)$.

Типовыми режимами, определяющими законы изменения во времени входного сигнала или возмущающего воздействия, обычно являются: *режим скачка* — неизменность управляющего и возмущающих воздействий; *режим движения с постоянной скоростью* — изменение входного сигнала во времени по линейному закону; *режим движения с постоянным ускорением* — изменение входного сигнала по параболическому закону; *режим движения по синусоидальному закону*. В первых трех режимах установившееся значение сигнала рассогласования системы управления определяется применением к его изображению по Лапласу предельной теоремы перехода, что связано с порядком астатизма передаточной функции разомкнутой системы $W_p(p)$:

$$u_{уст}^0 = \lim_{t \rightarrow \infty} u^0(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pu^0(p) \quad (2)$$

где $u^0(s) = W_3(p)u(p)$; $W_3(p) = (1 + W_p(p))^{-1}$ — передаточная функция замкнутой системы по сигналу рассогласования; $u(p)$ — изображение по Лапласу задающего воздействия.

При гармоническом входном сигнале точность системы управления АЭП может быть оценена по амплитуде сигнала рассогласования:

$$u_{max}^0 = \frac{u_{max}}{|W_p(j\omega_k)|} = \frac{u_{max}}{A(\omega_k)}, \quad (3)$$

где $A(\omega_k)$ — амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы при частоте $\omega = \omega_k$.

Ко второй группе относятся показатели, характеризующие устойчивость работы АЭП. Для оценки устойчивости во временной области обычно применяются следующие показатели: перерегулирование $\sigma = (Z_{max} - Z_0) \cdot 100/Z_0$, %, где Z_{max} и Z_0 — соответственно максимальное и начальное значения сигналов рассогласования; и число колебаний $N_k = T_p/N_k$, наблюдаемое за время регулирования T_p , где T_k — расстояние по временной оси переходного процесса $Z(t)$ между смежными максимумами, обычно $N_k \in [1; 4]$. Для оценки устойчивости СУЭП в частотной области вводятся понятия запаса устойчивости по амплитуде и фазе. Одной из частых оценок качества является показатель колебательности, т. е. отношение максимального значения амплитудной частотной характеристики замкнутой системы к значению амплитудной характеристики при $\omega = 0$: $M_{max} = A_{max}(\omega)/A(0)$. Для системы управления АЭП, у которой $A(0) = 1$, $M_{max} = |W_3(j\omega)|_{max} = \left| \frac{W_p(j\omega)}{1 + W_p(j\omega)} \right|_{max}$. Чем меньше запас устойчивости, тем больше склонность системы управления к колебаниям.

К третьей группе относятся показатели, характеризующие быстродействие АЭП. Для оценки быстродействия по виду переходной характеристики $h(t) = Z(t)/Z(\infty)$ используют следующие временные показатели качества:

– длительность переходного процесса t_n , равная промежутку времени от момента приложения скачкообразно входного воздействия до момента, когда выходной сигнал $Z(t)$ будет отличаться от установившегося значения $Z(\infty)$ не более чем на заданную малую постоянную времени Δ , представляющую собой допустимую статическую ошибку, т. е. $|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta$; как правило, $\Delta = (1-5)$ % от скачка сигнала на входе СУЭП;

– время запаздывания t_3 , равное отрезку времени, заключенному между моментом приложения скачкообразного входного сигнала и моментом, в который осредненная выходная величина становится равной половине ее установившегося значения;

– время нарастания t_n , равное отрезку времени, заключенному между точкой пересечения оси времени с касательной к кривой переходной характеристики в точке $a = 0,5h(\infty)$ и абсциссой точки пересечения этой касательной с горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся значению $h = h(\infty)$;

– время установления t_y , т. е. время достижения переходной характеристикой первого максимума;

– частоту колебания f_k , близкую по значению к резонансной частоте замкнутой системы.

Для оценки быстродействия по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы управления АЭП используют следующие показатели качества:

– резонансную частоту ω_0 , соответствующую пику амплитудно-частотной характеристики;

– частоту ω_n , соответствующую полосе пропускания замкнутой системы и определяемой из условия $A(\omega_n) = 1/\sqrt{2}$;

– частоту среза ω_{cp} , соответствующую условию $A(\omega_{cp}) = 1$;

– эквивалентную частоту замкнутой системы ω_s , определяемую по формуле

$$\omega_s = \int_0^{\infty} |W_3(j\omega)|^2 d\omega = \int_0^{\infty} A^2(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Частотные показатели качества, характеризующие быстродействие АЭП, могут быть также определены по соответствующим частотным характеристикам ее разомкнутой системы, что существенно проще. Это обстоятельство является одним из преимуществ использования частотных показателей качества по сравнению с временными показателями. В ряде случаев требуется сопоставить между собой частотные и временные показатели, однако такая связь очень сложна и в общем виде может быть определена только для простейших структур АЭП.

К четвертой группе показателей качества относятся комплексные критерии, дающие оценку некоторых обобщенных свойств АЭП, учитывающих точность, запас устойчивости и быстродействие. Обычно это достигается при помощи некоторых интегральных показателей, определяющих свойства кривой переходного процесса, а также на основе критерия минимума колебательности инерционных масс. В первом случае суть анализа качества АЭП заключается в сравнении линейной или квадратичной интегральной оценки с минимальной возможной величиной. Удобство интегральных оценок состоит в том, что они дают единый числовой критерий качества. Недостатком является то, что одному и тому же значению интегральной оценки могут соответствовать разные формы переходного процесса, что приводит к неопределенности при решении задач структурно-параметрического синтеза. Во втором случае для оценки демпфирующих свойств АЭП используются прямые и косвенные показатели. Из прямых показателей наибольшее распространение получили логарифмический декремент затухания и коэффициент резонансного усиления, который определяется амплитудой большего резонансного пика амплитудно-частотной характеристики электропривода. Этот показатель является наиболее эффективным при изучении режимов с периодическими механическими возмущениями. Из косвенных показателей наиболее распространен коэффициент электромеханической связи, который непосредственно характеризует эту связь и дает оценочные представления о демпфирующих свойствах АЭП.

К показателям, определяющим статические свойства АЭП, относятся показатели, характеризующие производительность электропривода, его массогабаритные и регулировочные свойства. В простейшем виде показатель производительности характеризует максимальное перемещение за заданный промежуток времени. На практике эта задача обычно формулируется как необходимость обеспечения избытка мощности, с помощью которого можно реализовать заданное перемещение за минимальное время. Производительность напрямую зависит от динамических свойств системы управления движением ИОРМ. Для повышения производительности следует усовершенствовать механические конструкции технологических установок, а также использовать высокодинамичные электроприводные системы, что позволит обеспечить возможность получения высоких скоростей движения ИОРМ.

Важнейшими показателями, характеризующими регулировочные свойства АЭП, являются диапазон регулирования скорости и плавность регулирования [9]. Для интегральной характеристики как динамических, так и статических свойств АЭП можно использовать показатель качества функционирования электропривода, под которым понимают степень его приспособленности к выполнению поставленной задачи. Этот показатель выражает меру полезности электропривода. Для его определения необходим анализ результатов применения АЭП по назначению.

В процессе эксплуатации АЭП изменяются состояния, в которых он находится. В каждом состоянии АЭП может выполнять заданные функции с определенным уровнем качества [8]. Количественное значение показателя качества функционирования $\xi(t_i)$ зависит от состояния электропривода в момент времени t_i и в общем случае от всех предшествующих состояний, т. е. от траектории эволюции состояния электропривода. По возможности следует учитывать случайные факторы и рассматривать $\xi(t_i)$ как случайный процесс. Объективно существует наибольшее значение показателя качества функционирования $E_0 = \text{const}$, соответствующее «идеальному» АЭП (например, в случае, когда все его внутренние параметры являются номинальными). Случайная функция $\xi(t_i)/E_0$, принимающая значения в диапазоне $[0,1]$, определяет относительное значение показателя качества функционирования АЭП.

Можно выделить показатели качества функционирования двух видов: мгновенные и интервальные. *Мгновенные показатели* являются характеристиками случайной величины $\xi(t_i)$ — значения случайной функции $\xi(t)$ при $t = t_i$. Полной характеристикой $\xi(t_i)$ является закон распределения. Однако для практических приложений можно пользоваться первыми двумя моментами этой случайной величины — математическим ожиданием и дисперсией. *Интервальные показатели* качества функционирования относятся к интервалу времени или наработки $[0, t]$. При этом каждой v -й траектории $\xi_v(t)$ эволюции АЭП в течение времени или наработки t будет соответствовать некоторый результат, характеризующий полезность его использования для решения поставленной задачи, т. е. выходной эффект. Таким образом, результат эксплуатации АЭП в течение времени $[0, t]$ можно оценить с помощью функционала $\Phi[\xi_v(t)]$ от реализаций процесса функционирования электропривода. Интервальными показателями качества функционирования АЭП в течение времени или наработки $[0, t]$ могут быть математическое ожидание выходного эффекта (средний выходной эффект) и среднее квадратическое отклонение выходного эффекта, характеризующее «интервальный риск». Рассмотренные возможные показатели назначения АЭП определяют большое разнообразие показателей назначения его элементов.

Показатели надежности. Для АЭП и их элементов важнейшими свойствами, составляющими надежность, являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Показатели этих свойств хорошо известны. Вместе с тем для обеспечения параметрической надежности АЭП вопрос выбора показателей остается недостаточно изученным. Одной из последних работ на эту тему является публикация [6], в которой отмечается, что применительно к задаче параметрического синтеза важнейшими свойствами являются безотказность и долговечность, а в качестве показателя при ограниченной информации о законах распределения управляемых параметров следует использовать запас работоспособности. Под запасом работоспособности электропривода понимается степень приближения вектора фактического состояния АЭП к его предельно допустимому значению. Множество предельно допустимых значений этого вектора определяется границей области работоспособности электропривода. Степень приближения вектора фактического состояния АЭП задается расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки этой области. В работе [6] доказано, что для разных законов распределения выходных параметров максимизация минимального запаса работоспособности дает близкую к максимальному значению вероятность безотказной работы электротехнической системы. Данный вывод в полной мере относится и к АЭП.

Экономические показатели. Эти показатели играют важную роль при решении задачи структурно-параметрического синтеза АЭП. К ним можно отнести показатели энергетической эффективности и показатели, непосредственно характеризующие стоимость АЭП и затраты на его эксплуатацию. Энергетические показатели объединяются в следующие группы:

– показатели, характеризующие режимы работы электромеханического преобразователя как потребителя электрической энергии. К ним относятся активная, реактивная и полная мощности, потребляемые от силового преобразователя электрической энергии;

– показатели, характеризующие результат электромеханического преобразования подводимой энергии. К ним относятся механическая мощность, момент и угловая скорость;

– показатели, являющиеся мерой эффективности и экономичности преобразования энергии двигателем. К ним относятся мощность потерь в элементах электродвигателя, коэффициенты мощности и полезного действия.

В работе [10] применительно к асинхронному электроприводу приводятся следующие критерии оценки его эффективности.

$$1. F_1 = \int_0^T (U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta}) dt \rightarrow \min \text{ — энергия, поступающая из сети к обмоткам электродвигателя в Дж.}$$

ля в Дж.

$$2. F_2 = \int_0^T P_{\text{мех}}(t) dt = \int_0^T M(t) \omega(t) dt \rightarrow \max \text{ — энергия, затрачиваемая на совершение полезной работы электродвигателя в Дж.}$$

боты электродвигателя в Дж.

$$3. F_3 = T_{Wm} = \frac{2W_m}{(U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta})} \rightarrow \min \text{ — постоянная преобразования магнитной энергии в с;}$$

$$4. F_4 = \frac{M(t)\omega(t)}{M(t)\omega(t) + \sum P_{\Delta}} \rightarrow \max \text{ — энергетический КПД в о.е.}$$

$$5. F_5 = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|} \rightarrow \max \text{ — критерий, оценивающий электрическое преобразование энергии в о.е.}$$

энергии в о.е.

$$6. F_6 = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|} \rightarrow \max \text{ — критерий, оценивающий механическое преобразование энергии, о.е.}$$

гии, о.е.

$$7. F_7 = \frac{|W(S)|}{\varphi} \rightarrow \min \text{ — удельный расход энергии в Дж/рад.}$$

$$8. F_8 = (\vec{I}_s \vec{\Psi}_s + \vec{I}_R \vec{\Psi}_R) \rightarrow \min \text{ — критерий, учитывающий энергию магнитной системы в Н·м.}$$

$$9. F_9 = \int_0^T (\vec{I}_s^2 R_s + \vec{I}_{sr}^2 R_r) dt \rightarrow \min \text{ — энергия на компенсацию активных потерь в Дж.}$$

$$10. F_{10} = \int_0^T (M(\omega) - M_{\text{ст}}(\omega))^2 dt \rightarrow \min \text{ — степень близости механических характеристик в Н·м.}$$

Между приведенными критериями объективно существует корреляционная зависимость. При использовании методов компонентного анализа можно сократить количество критериальных энергетических оценок. В работе [11] рассматривается обобщенный критерий энергетической эффективности без учета других показателей качества.

Критерии оптимальности электроприводов. Критерии оптимальности применительно к электроприводу рассматривались в работах [1]–[4], [8], [10], [11]. Среди авторов работ существует понимание того, что задача является сложной, многокритериальной. Вместе с тем при рассмотрении возможных способов решения этой задачи не сделан должный акцент на методологических аспектах построения целевой функции.

Анализ библиографических источников показывает, что в настоящее время известны следующие основные подходы к решению задачи:

1. Выбирается один, наиболее важный из множества исходных показателей качества, для которого определяется его максимально или минимально возможное значение при ограничениях, установленных для значений других показателей качества. Примером может служить настройка СУЭП на технический оптимум, при которой оптимизируемым показателем является время переходного процесса, а на максимальное перерегулирование накладывается ограничение. Показатели надежности и экономичности в этом случае вообще не рассматриваются [5].

2. Строится обобщенный показатель качества в виде аддитивной¹, или мультипликативной [4], [11] функции от значений других показателей качества и весовых коэффициентов, определяющих важность каждого показателя. Например, в работе [4] для решения задачи параметрического синтеза предложена следующая целевая функция (обобщенный критерий качества):

$$\bar{Y}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^m \bar{Y}_i \right)^{1/m}, \quad (5)$$

где $m = 4$ — количество показателей качества в составе критерия, включающего следующие нормированные показатели: быстродействия $\bar{Y}_1$, точности $\bar{Y}_2$, параметрической грубости $\bar{Y}_3$ и энергетических затрат на управление $\bar{Y}_4$.

При этом в функции (6) показателем быстродействия является время нарастания переходной характеристики; показателем точности $\bar{Y}_2$ — средний модуль относительного отклонения выходной координаты системы на заданном интервале времени; показателем робастности $\bar{Y}_3$ — средний модуль отклонения переходной характеристики АЭП при вариации параметров СУЭП относительно расчетных значений за время переходного процесса; показателем энергетических затрат на управление $\bar{Y}_4$ — пиковое значение тока электродвигателя, которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части АЭП.

Данный подход является субъективным и имеет известные ограничения. Кроме того, как показано в работах [3]–[5], он может привести к грубым ошибкам [8].

3. В целях оптимизации используется метод Соболя – Статникова, который предполагает построение множества Парето-оптимальных решений, и поиск оптимального варианта на основе зондирования пространства управляемых параметров АЭП методом статистического моделирования. Для этой цели используется процедура синтеза псевдослучайных точек путем построения ЛПТ-последовательностей [1], [10]. Данный подход отличается объективностью, но на практике не позволяет получить единственное решение;

4. В качестве критерия оптимальности при параметрическом синтезе СУЭП используется запас работоспособности, который максимизируется. Такой подход гарантирует получение Парето-оптимального решения и отличается объективностью выбора оптимальных значений первичных параметров СУЭП [2], [6], [8]. Выполненный анализ показателей качества электропривода позволяет распространить данный подход на структурно-параметрический синтез АЭП.

Результаты (Results)

Сформируем базовые основы методологии оптимизации применительно к структурно-параметрическому синтезу АЭП. На рис. 4 приведена структурная схема предлагаемой методологии выбора целевой функции для структурного и параметрического синтеза АЭП, в основе которой аксиоматический принцип. Введем в рассмотрение постулаты, являющиеся базисом этой методологии [8].

Постулат 1. Основопологающим постулатом методологии является констатация того, что любой АЭП характеризуется двумя обобщенными параметрами: эффективностью (полезностью) и затратами (платой за полезность). Этот постулат логически вытекает из фундаментального философского закона диалектического единства противоположностей, применимого к любому объекту исследования. Следствиями постулата являются формулировки двух критериев оценки АЭП: эффективности (Э) и цены (Ц). Критерий цены (КЦ) характеризует АЭП значением параметра Ц при фиксированном значении параметра Э, а критерий эффективности (КЭ) — значением параметра Э при фиксированном значении параметра Ц.

¹ РТМ 212.0106–81. Расчет и выбор электрооборудования гидротехнических сооружений. М.: Транспорт, 1983. 64 с.

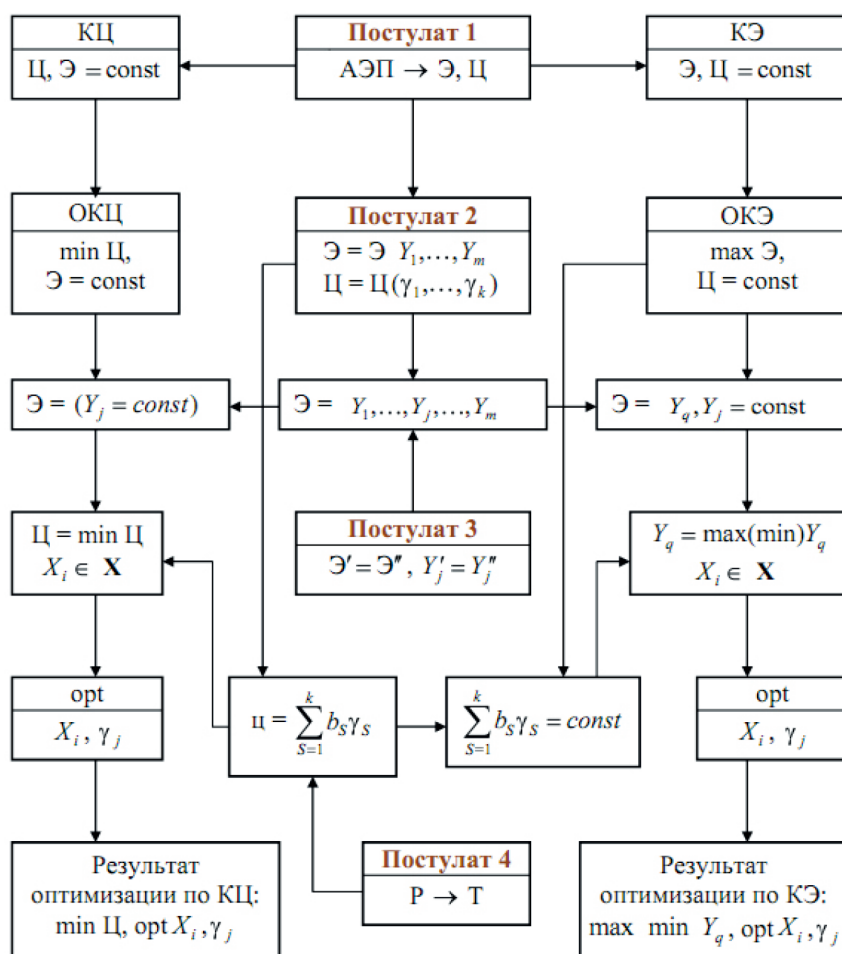


Рис. 4. Структурная схема методологии структурно-параметрического синтеза АЭП

Постулат 2. Обобщенные параметры АЭП могут быть представлены в виде функциональных зависимостей от его внешних (выходных) и ресурсных параметров: $\mathcal{E} = \mathcal{E}(Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, $\mathcal{C} = \mathcal{C}(\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_k)$. Под ресурсными параметрами понимаются такие параметры АЭП, которые характеризуют потребление различных ресурсов при его создании и эксплуатации. Ресурсами являются материалы и средства, расходуемые при проектировании, изготовлении и техническом обслуживании АЭП (конструкционные материалы, обрабатывающие механизмы, контрольно-диагностическая аппаратура), носители электроэнергии, рабочее время проектировщиков, изготовителей и обслуживающего персонала и т. п. Эти параметры определяют величину затрат, обозначенных обобщенным параметром $\mathcal{C}$.

Постулат 3. Два варианта решения задачи структурно-параметрического синтеза АЭП полагаются равноэффективными ($\mathcal{E}' = \mathcal{E}''$) в том случае, когда равны попарно их соответствующие выходные параметры ($Y'_j = Y''_j$). На основе этого постулата функция $\mathcal{E} = \mathcal{E}(Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$ конкретизируется в форме вектора.

Постулат 4. Ресурсы АЭП тождественны товарам. Причем любой товар как экономическая категория имеет цену, и она может быть установлена. Следствием постулата является конкретизация функции $\mathcal{C} = \mathcal{C}(\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_k)$ в форме $\mathcal{C} = \sum_{s=1}^k b_s \gamma_s$, где b_s — стоимость (цена) единицы ресурса (товара) γ_s .

Полученная формула записи функции цены, по своей сути, принципиально отличается от похожей по форме аддитивной функции записи обобщенного показателя качества, которую вводят с целью скаляризации векторной оценки при оптимизации различных технических систем.

Задача оптимизации критерия цены (ОКЦ) налагает на обобщенный параметр Ξ условие его постоянства ($\Xi = \text{const}$). Единственно возможным способом удовлетворить это требование является фиксирование всех выходных параметров АЭП. При этом эффективность можно представить в следующем виде:

$$\Xi = (Y_j = \text{const}), \quad j = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Задание фиксированных значений $Y_j = \text{const}, j = \overline{1, m}$ есть создание вполне определенных, фиксированных потребительских свойств АЭП. Таким образом, в выражении (6) зафиксировано не что иное как требования потребителя, преследуемая им цель. При этом данное выражение и, следовательно, методология оптимизации, инвариантны относительно величины фиксированного значения цели АЭП и определяют лишь форму ее задания. Именно в логическом обосновании формы задания цели АЭП состоит истинный смысл и значение выражения (6). Тем самым запрещается любой произвол в этом отношении [8].

Задача оптимизации критерия эффективности (ОКЭ) предполагает нахождение его максимума. Но эффективность в виде Ξ представляет собой вектор, а операция оптимизации вектора не имеет смысла. Единственным логически возможным способом разрешения этого противоречия является фиксация всех компонент вектора кроме одного, который и подлежит максимизации. В этом случае обобщенный параметр Ξ приобретает форму

$$\Xi = (Y_q, Y_j = \text{const}), \quad j = \overline{1, m}, j \neq q, \quad (7)$$

где q — нефиксированный выходной параметр АЭП.

Выражение (7) накладывает на выходной параметр $Y_j, j \neq q$, только требование фиксированности, но оставляет свободу в выборе конкретных значений.

Полученный вывод позволяет для решения задач параметрического и структурного синтеза использовать запас работоспособности АЭП или выбрать один, определяющий для данного электропривода показатель (критерий), который следует оптимизировать. Например, для электроприводов циклического действия при решении задачи структурного синтеза в качестве критерия может быть выбран показатель минимума колебательности инерционных масс или критерий минимума габарита и мощности электродвигателя. При этом на запас работоспособности вводится ограничение, которое при оптимизации обязательно должно быть выполнено. Такой подход показал свою эффективность при решении задачи параметрического синтеза электропривода двухстворчатых ворот шлюза [12]. При выборе ограничений на значения оставшихся показателей качества предлагается использовать критерий равенства, целевая функция которого строится по принципу минимакса или максимина [8].

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что АЭП является сложной электромеханической системой, которая характеризуется разнообразными и противоречивыми по своей природе показателями качества. Задача структурно-параметрического синтеза АЭП является задачей векторной или многокритериальной оптимизации [8], [10], для решения которой необходим поиск компромиссного варианта, учитывающего в той или иной степени важность и значение каждого показателя. Вместе с тем следует учитывать технологические особенности каждого конкретного АЭП и условия его функционирования.

Для решения задачи структурного синтеза АЭП в качестве целевой функции, как правило, используется один из технико-экономических показателей, а на значения остальных показателей накладываются ограничения. Показатели надежности в большинстве случаев во внимание не принимаются. Предложенный в РТМ 212.0106–81 подход, основанный на построении обобщенного показателя качества в виде аддитивной функции, учитывает показатели надежности, но не может быть рекомендован к применению вследствие субъективности самой целевой функции.

В работах [2], [6], [8] показано, что для решения задачи параметрического синтеза электротехнических систем, включая электропривод, целесообразно в качестве целевой функции выбирать запас работоспособности. Установлено, что при ограниченной информации о свойствах первичных параметров АЭП или при полном отсутствии такой информации запас работоспособности в полной мере характеризует вероятность безотказной работы электропривода. Применение этого показателя в качестве целевой функции позволяет получить и положительный социальный аспект, который выражается в снижении стрессовых ситуаций для персонала, связанных с отказами элементов АЭП и необходимостью принятия мер по их ликвидации.

Рассмотренная в статье методология оптимизации АЭП предполагает возможность использования запаса работоспособности в качестве целевой функции для решения задач структурного и параметрического синтеза, что предполагает необходимость построения областей работоспособности и вычисление запаса работоспособности для каждого исследуемого варианта электропривода. В качестве целевой функции, согласно предложенной методологии оптимизации, может быть выбран любой технико-экономический показатель. При этом необходимым условием является задание требуемого уровня запаса работоспособности, который в этом случае будет являться ограничением при выборе варианта решения или оптимальных значений первичных параметров АЭП.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Структурно-параметрический синтез АЭП является задачей векторной, или многокритериальной оптимизации. Необходимым условием для ее решения является обязательный учет показателей надежности и, прежде всего, запаса работоспособности АЭП.
2. На первом этапе структурного синтеза следует использовать безусловный критерий оптимальности [8], который позволяет сформировать множество Парето-оптимальных решений.
3. При решении задачи параметрического синтеза АЭП в качестве целевой функции в большинстве случаев рекомендуется выбирать запас работоспособности. Получаемое при этом решение является единственным и обеспечивает выполнение всех условий работоспособности. При этом автоматически учитываются показатели назначения АЭП, стоимость его изготовления, а также чувствительность и возможные изменения выходных параметров, связанные с вариациями первичных параметров в процессе изготовления, хранения и эксплуатации электропривода.
4. Информация о запасе работоспособности в процессе эксплуатации АЭП позволяет с высокой достоверностью решать задачи контроля и прогнозирования состояния его элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязев М. В. Многокритериальная оптимизация управления двухмассовой электромеханической системы / М. В. Грязев, О. А. Кузнецова, В. А. Сушкин // Электротехнические системы и комплексы. — 2013. — № 21. — С. 60–70.
2. Saushev A. V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary / A. V. Saushev, E. V. Bova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 327. — Is. 5. — Pp. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
3. Селиванов В. А. Критерии оптимизации и необходимость построения параметрических систем электропривода / В. А. Селиванов // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2011. — № 1 (30). — С. 120–124.
4. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин, В. В. Аполлонский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 2. — С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026.

5. Сташинов Ю. П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 / Ю. П. Сташинов // *Электротехника*. — 2016. — № 1. — С. 2–7.
6. Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Г. Л. Демидова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
7. Саушев А. В. Математическое описание многомассовых механических систем электропривода / А. В. Саушев // *Электричество*. — 2013. — № 3. — С. 27–33.
8. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем: монография / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
9. Храмшин В. Р. Разработка тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими показателями / В. Р. Храмшин, А. А. Лукин // *Тинчуринские чтения: Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции: в 4 т.* — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2010. — С. 72–73.
10. Кузнецова О. А. Многокритериальная оптимизация электромеханических систем с асинхронным двигателем / О. А. Кузнецова // *Приводная техника*. — 2010. — № 6. — С. 20–26.
11. Локарев В. И. Оптимизация асинхронного электропривода на основе обобщенного критерия энергетической эффективности / В. И. Локарев // *Электромашиностроение и электрооборудование*. — 2006. — № 66. — С. 305–306.
12. Саушев А. В. Моделирование и оптимизация режимов работы электропривода двухстворчатых ворот шлюза / А. В. Саушев, В. А. Шошмин // *Гидротехническое строительство*. — 2009. — № 10. — С. 40–44.

REFERENCES

1. Gryazev, M. V., O. A. Kuznetsova, and V.A. Sushkin. “Multicriterion optimization management of electromechanic system with two masses.” *Electrotechnical Systems and Complexes* 21 (2013): 60–70.
2. Saushev, A. V., and E.V. Bova. “Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. No. 5. IOP Publishing, 2018. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
3. Selivanov, V. A. “The criteria for the optimization and the necessity for the construction of electric drive parametric systems.” *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* 1(30) (2011): 120–124.
4. Anisimov, A. A., S. V. Tararykin, and V. V. Apolonsky. “Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems.” *Vestnik IGEU* 2 (2016): 21–26.
5. Stashinov, Y. P. “On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1.” *Russian Electrical Engineering* 87.1 (2016). DOI: 10.3103/S1068371216010107.
6. Saushev, Alexander V., Elena V. Bova, and Galina L. Demidova. “Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
7. Saushev, A. V. “Matematicheskoe opisanie mnogomassovykh mekhanicheskikh sistem elektroprivoda.” *Elektrichestvo* 3 (2013): 27–33.
8. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
9. Khrumshin, V. R., and A. A. Lukin. “Razrabotka tiristornykh elektroprivodov s dvukhzonnym regulirovaniem skorosti s uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami.” *Tinchurinskie chteniya: Materialy докладов V Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii: v 4 t.* Kazan’: Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2010. 72–73.
10. Kuznetsova, O. A. “Mnogokriterial’naya optimizatsiya elektromekhanicheskikh sistem s asinkhronnym dvigatelem.” *Privodnaya tekhnika* 6 (2010): 20–26.
11. Lokarev, V. I. “Optimization of the asynchronous electric drive on the basis of the generalized criterion of power efficiency.” *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* 66 (2006): 305–306.
12. Saushev, A. V., and V. A. Shoshmin. “Modelirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty elektroprivoda dvukhstvorchatykh vorot shlyuza.” *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 10 (2009): 40–44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Бова Елена Владимировна —

доцент

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev, Alexander V. —

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: saushev@bk.ru,

SaushevAV@gumrf.ru

Bova, Elena V. —

Associate 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

Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

Received: March 20, 2019.

WARNING CONTROL OF SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM IN CASE OF THE POWER SOURCES FAILURE

N. V. Shirokov

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

The methods aimed at solving the problem of accident-free operation of ship's electric power systems are developed in the paper. It has been shown that the modern control means do not solve this problem in most cases, associated with the failure of electric power sources. For these purposes, the methods and algorithms that provide warning control of the system, based on the prediction of the current situation development in the ship's power supply, its technical condition, as well as the technical condition of generator sets are proposed in the paper. It has been shown that in this case, it is advisable to use additional restrictions on the vectors of input parameters at describing the area of system working capacity. A control method based on the segmentation of the system working capacity area is proposed in the paper, the definition of a truncated (internal) area of its proper functioning is given. The warning control is considered as a process of forming an impact on the ship's power system, as a result of which, after the protection has been activated, its technical condition will belong to the truncated area of proper functioning. The variants of generator sets failures associated with the output beyond the maximum permissible values of the internal parameters are considered, the features of the proposed method application for each of the cases are revealed. It has been shown that the development of the warning control systems is constrained by an insufficient level of methods development and limited use of the technical diagnostics means for the ship's electric power systems. In this regard, a control method based on using the indirect signs of the inoperable system state is proposed. It is offered to launch the emergency diesel generator not only at the moment of the vessel blackout, but also proactively, upon the occurrence of events directly threatening to develop into an emergency. The assumption on the feasibility of the proposed approaches application at creating the self-adjusting and self-organizing integrated systems of ship control is made in the paper. The algorithms for the practical implementation of the method of warning control of the ship's electric power system during the transition to the inoperable state of individual generator units are presented.

Keywords: electric power system, emergency, warning control, prediction of the current situation, segmentation of working capacity area.

For citation:

Shirokov, Nikolaj V. "Warning control of ship's electric power system in case of the power sources failure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

УДК 621.316:658.58

ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ ОТКАЗЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Н. В. Широков

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

Статья посвящена разработке методов, направленных на решение задачи безаварийной эксплуатации судовых электроэнергетических систем. Показано, что современные средства управления не решают эту проблему в большинстве случаев, связанных с отказами источников электроэнергии. Для этих целей предложены способы и алгоритмы, обеспечивающие предупредительное управление системой, исходя из прогнозирования развития текущей ситуации в электроснабжении судна, ее технического состояния, а также и технического состояния генераторных агрегатов. Показано, что в этом случае, при описании области работоспособности системы, целесообразно использовать дополнительные ограничения

по вектору входных параметров. В статье предложен метод управления, основанный на сегментации области работоспособности системы, дано определение усеченной (внутренней) области ее правильного функционирования. Рассматривается предупредительное управление как процесс формирования воздействия на судовую электроэнергетическую систему, в результате которого, после срабатывания защиты, ее техническое состояние будет принадлежать усеченной области правильного функционирования. Рассмотрены варианты отказов генераторных агрегатов, связанные с выходом за предельно допустимые величины значений внутренних параметров, раскрыты особенности применения предложенного подхода для каждого из случаев. Показано, что развитие систем предупредительного управления сдерживается недостаточным уровнем разработки методов и ограниченным использованием средств технического диагностирования судовых электроэнергетических систем. В этой связи предложен способ управления, основанный на использовании косвенных признаков неработоспособного состояния системы. Предложено осуществлять запуск аварийного дизель-генератора не только в момент обесточивания, но и превентивно, при наступлении событий, непосредственно угрожающих перерастанием в аварийную ситуацию. В работе сделано предположение о целесообразности применения рассмотренных подходов при создании самонастраивающихся и самоорганизующихся комплексных систем управления судном. Приведены алгоритмы практической реализации метода предупредительного управления судовой электроэнергетической системой при переходе в неработоспособное состояние отдельных генераторных агрегатов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, аварийная ситуация, предупредительное управление, прогнозирование текущей ситуации, сегментация области работоспособности.

Для цитирования:

Широков Н. В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

Введение (Introduction)

Средства управления (СУ) судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) решают ответственные задачи по обеспечению генерации электроэнергии в функции нагрузки бортовой сети. При этом при эксплуатации в нормальных условиях для судов с классом автоматизации Российского морского регистра судоходства не ниже AUT3, операции, связанные с запуском и остановкой резервного генераторного агрегата (ГА), его синхронизацией с сетью, включением на параллельную работу, распределением нагрузок и поддержанием частоты сети полностью автоматизированы. Качественное обеспечение этих процессов зависит от технического состояния СЭЭС, которое в процессе функционирования отображается векторами контролируемых параметров [1], к которым относятся:

$\bar{U} = (u_1, \dots, u_c, \dots, u_e)$ — вектор входных параметров, задающий смену режимов работы, в данном случае формирует управляющее воздействие на систему. Этот вектор, определяемый параметрами нагрузки СЭЭС, может быть представлен как $\bar{P} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_e)$, где p_j — величина нагрузки, создаваемая при работе j -го потребителя электроэнергии в данный момент времени;

$\bar{V} = (v_1, \dots, v_g, \dots, v_f)$ — вектор внешних воздействий, характеризующий свойства окружающей среды (например, температуру, атмосферное давление и влажность), а также вибрацию и радиацию;

$\bar{X} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$ — вектор параметров, определяющий техническое состояние элементов СЭЭС. К этим параметрам для рассматриваемой задачи можно отнести такую переменную состояния, как мощность, генерируемая соответствующим ГА в данный момент времени.

$\bar{Z}^v = (Z_1^v, \dots, Z_r^v, \dots, Z_p^v)$ — вектор, характеризующий переменные состояния на выходах элементов функциональных блоков СЭЭС: напряжение возбуждения генератора, давление смазочного масла и температуру охлаждающей жидкости дизеля.

Векторы параметров $\bar{X}$ и фазовых переменных $\bar{Z}$ совместно образуют множество внутренних параметров СЭЭС;

$\bar{Y} = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_m)$ — вектор выходных параметров, характеризующий потребительские свойства системы, представляющие собой следующие показатели качества ее функционирования: величина генерируемого напряжения, мощность, частота напряжения, динамическая устойчивость и диапазон допустимых изменений этих параметров.

В процессе эксплуатации параметры СЭЭС постоянно меняются, и ее техническое состояние может принимать различные значения, важнейшим из которых является работоспособность системы. В соответствии с ГОСТ 27.002–2015, под работоспособным будем понимать такое состояние СЭЭС, при котором значения всех параметров, определяющих ее способность выполнять заданные функции, соответствуют всем требованиям, установленным в документации. При этом в указанном документе определены номинальные величины и представлены пределы отклонения контролируемых параметров для системы, находящейся в работоспособном состоянии. Если какой-либо из контролируемых параметров отклонился от заданного значения за допустимые пределы, то возникают нештатные ситуации, которые могут привести к потере работоспособности СЭЭС и к аварийной ситуации на судне. Для работы СУ в нештатных режимах дополнениями от 01.05.1997 г. к ГОСТу 19176–85 определены следующие виды управления: прогностическое, предупредительное, противоаварийное и аварийное. Так как основным приводным двигателем ГА на большинстве современных судов является дизель, для примера охарактеризуем каждый вид управления применительно к СЭЭС, оснащенной дизель-генераторными агрегатами (ДГ).

Аварийным называют управление техническими средствами корабля или судна во время аварии, т. е. относительно СЭЭС, во время исчезновения напряжения на шинах ГРЩ. При этом система не выполняет возложенных на нее функций: электроэнергия не генерируется, происходит нарушение допустимых пределов выходных параметров $\bar{Y}$, СЭЭС неработоспособна. Согласно общепринятому алгоритму, в это время запускается аварийный ДГ и один или сразу все резервные ГА, готовые к пуску.

Противоаварийным называют такое управление, при котором внутренние или выходные параметры системы достигли своих предельных величин. В этом случае действия СУ направлены на то, чтобы прекратить дальнейшее развитие аварийной ситуации и по возможности уменьшить последствия аварии, предотвратить более серьезные отказы техники, судна в целом, гибель членов экипажа. Этот вид управления часто называют *защитой*. Он характеризуется выходом параметров ГА за предельно допустимые или критические значения аварийно-предупредительной сигнализации (АПС). Примером таких событий может служить снижение ниже допустимого значения давления смазочного масла дизеля или перегрузка агрегата. В первом случае отключают неработоспособный ГА, во втором — малоответственные потребители электроэнергии (МОП), а если этого не достаточно, то и сам ГА.

Предупредительным называют управление, осуществляемое по предупредительным сигналам отклонения параметров от их номинального значения. В этом случае ТС СЭЭС опасно приблизилось к неработоспособному состоянию или система уже неработоспособна, но имеется возможность таким образом воздействовать на ее параметры, чтобы исключить возникновение аварийной ситуации. На современных судах практически единственным способом предупредительного управления СЭЭС является запуск резервного ГА при превышении нагрузки на работающие агрегаты, например, свыше 80 % от их номинального значения или в случае отклонения их первичных параметров за пределы допусков, называемых *некритическими значениями АПС*.

Прогностическое управление предполагает при принятии решений использование результатов прогнозирования развития процессов, протекающих в СЭЭС, осуществляемого по результатам диагностирования ее элементов. В современных СУ таким примером может служить запуск ГА при обесточивании сети, при котором на агрегаты, отключенные защитой от короткого замыкания, сигнал на запуск не подается.

Функциональный анализ способов управления СЭЭС судов и кораблей отечественной и зарубежной постройки, выполненный с начала 1970-х гг. до настоящего времени, показал следующее:

1. Противоаварийное управление СЭЭС в большинстве случаев не способно предупредить аварийную ситуацию на судне, а может только облегчить ее последствия. Серьезным недостатком существующего способа управления является то, что отключение МОП и самих ГА происходит после того, как перегрузка уже наступила, а также без учета режима работы самой СЭЭС в целом. При этом защита Майера практически не учитывает возможность ее эффективного применения

в случае отключения хотя бы одного из работающих ГА от сети. Это объясняется тем, что нагрузка отключаемых МОП обычно составляет около 10 % от номинальной мощности одного ГА, а в случае аварийного отключения одного из двух параллельно работающих ГА нагрузка на работоспособный агрегат увеличивается практически вдвое, что в большинстве случаев приводит к остановке первичного двигателя, обесточиванию судна и потере его управляемости. К столь же негативным результатам приводит, например, отказ топливной системы одного из ГА и переход его в двигательный режим. В этом случае не только нагрузка полностью переходит на работающий источник электроэнергии, но его еще нагружает и обратная мощность, потребляемая неработоспособным ГА в течение времени задержки на отключение, что в большинстве случаев также приводит к возникновению аварийной ситуации на судне.

2. Запуск резервного ГА требует определенного времени на реализацию ($T_{\text{зап}}$), в течение которого процесс изменения контролируемого параметра от уровня некритической АПС до его предельно допустимого значения не прекращается ($T_{\text{кр}}$), и если окажется, что выполняется условие $T_{\text{кр}} < T_{\text{зап}}$, то наступит аварийная ситуация, которая часто сопровождается обесточиванием судна.

3. Набор параметров, при которых формируется сигнал запуска резервного агрегата, крайне ограничен и не менялся в течение нескольких десятилетий.

4. Запуск аварийного дизель генератора (АДГ) производится только после обесточивания судна, что никак не способствует предупреждению развития аварийной ситуации.

5. Недостаточное развитие методов и средств технического диагностирования СЭЭС не позволяет эффективно разрабатывать методы прогностического и предупредительного управления, и только их широкое применение может позволить избежать ситуаций, при которых происходит обесточивание судна при отказе одного или нескольких работающих ГА.

В этой связи направление исследований, нацеленных на создание СУ СЭЭС, обеспечивающих бесперебойное снабжение бортовой сети электроэнергией требуемого качества даже в условиях отказа нескольких источников электроэнергии, приобретает особую актуальность. Для решения поставленной задачи целесообразно выполнить следующее:

– разработать методы и средства управления техническим состоянием СЭЭС в процессе функционирования;

– разработать методы и технические средства для осуществления предупредительного управления СЭЭС исходя из результатов прогнозирования развития текущей ситуации в электроснабжении судна, технического состояния как самой системы в целом, так и ее функциональных блоков;

– в случае отказа хотя бы одного из работающих ГА необходимо формировать управляющее воздействие на структурную или параметрическую адаптацию СЭЭС к данному событию с целью предотвращения аварийной ситуации на судне.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Ввиду большой сложности СЭЭС как объекта диагностирования и отсутствия статистических данных об отказах, применение вероятностных подходов к решению задач управления сопряжено с низкой достоверностью получаемых результатов и нецелесообразно для использования [2]. В этом случае весьма перспективным является воспользоваться информацией об условиях работоспособности СЭЭС, которые могут быть заданы в виде следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} \bar{Y}_{i \min} \leq \bar{Y}_i = F_i(\bar{X}) \leq \bar{Y}_{i \max}, & i = \overline{1, m}; \\ \bar{Z}_{r \min}^v \leq \bar{Z}_r^v = F_r^v(\bar{X}) \leq \bar{Z}_{r \max}^v, & r = \overline{1, p}; \\ \bar{X}_{k \min} \leq \bar{X}_k = F_k(\bar{X}) \leq \bar{X}_{k \max}, & k = \overline{1, n}; \\ \bar{U}_{c \min} \leq \bar{U}_c = F_c(\bar{X}) \leq \bar{U}_{c \max}, & c = \overline{1, e}; \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{Y}_{i \min}$, $\bar{Y}_{i \max}$, $\bar{Z}_{r \min}^v$, $\bar{Z}_{r \max}^v$, $\bar{X}_{k \min}$, $\bar{X}_{k \max}$, $\bar{U}_{c \min}$, $\bar{U}_{c \max}$ — минимально и максимально допустимые значения соответствующих параметров в данный момент времени; $F_i(\bar{X})$, $F_r^v(\bar{X})$, $F_k(\bar{X})$ — операторы связи внутренних параметров $\{\bar{X}\}$ СЭЭС с ее выходными $\{\bar{Y}\}$, внутренними $\{\bar{Z}\}$ и входными $\{\bar{U}\}$ параметрами.

В источнике [1] рассмотрены условия работоспособности объекта, состоящие из трех неравенств. Это объясняется тем, что они были предложены, в первую очередь, для решения задач параметрического синтеза. В этом случае сразу предполагалось, что на систему подают только допустимые внешние сигналы и считают, что она будет работать в заданных условиях окружающей среды [3]. Для решения задачи управления ТС СЭЭС в реальном режиме времени считаем целесообразным представление условий ее работоспособности в виде системы из четырех неравенств. Поясним сказанное на примере. Допустим, что на судне параллельно работают два ГА, и предположим, что все условия (1) выполняются, СЭЭС находится в работоспособном состоянии. Если в это время произойдет скачек нагрузки, она резко увеличится и превысит, например, 150 % от номинальной величины, то оба дизеля остановятся, произойдет обесточивание судна, хотя на момент подачи недопустимого управляющего сигнала три первых неравенства системы (1) выполнялись.

Как показано в источнике [1], первое неравенство системы (1) задает допусковую область $D_y = \bigcap_{i=1}^m D_i$ и соответствует внешнему условию работоспособности. В пространстве параметров $\{\bar{X}\}$ она может быть описана как отображение $\Phi_{yx} : D_y \rightarrow M_y, M_y = \bigcap_{i=1}^m M_i$.

Второе неравенство в системе неравенств (1) задает допусковую область $D_z = \bigcap_{r=1}^p D_r$ и соответствует внутреннему условию работоспособности. В пространстве параметров $\{\bar{X}\}$ она может быть определена в виде отображения $\Phi_{zx} : D_z \rightarrow M_z$, причем $M_z = \bigcap_{r=1}^p M_r$.

В соответствии с Правилами РМРС, мощности, вырабатываемые каждым из ГА при параллельной работе, не должны отличаться более чем на 15 % от номинальной мощности наибольшего из работающих ГА, т. е. на внутренние параметры накладывается ограничение: $|x_k - x_g| \leq 0,15x_{\text{ном}}$. Это неравенство задает допусковую область P_x . Множество внутренних параметров, образованное пересечением области P_x и области D_x , которая, как показано в источнике [1], в евклидовом пространстве имеет форму бруса, определяет допусковую область B_x , задающую ограничения на параметры $\{\bar{X}\}$ в системе неравенств (1).

В выражении (1) четвертое неравенство определяет допусковую область $D_u = \bigcap_{c=1}^e D_c$ пространства управляющих воздействий. Допусковая область имеет вид e -мерного многогранника евклидова пространства R^e . При этом с каждым ограничением $D_c = D_{c \min} \bigcap D_{c \max}$, определяемым четвертым неравенством при $c = \overline{1, e}$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n параметров $\{\bar{X}\}$, соотносится область M_c . Это соответствие можно записать в виде отображения $\Phi_{ux} : D_u \rightarrow M_u$. При этом $M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c$.

Физический смысл четвертого неравенства состоит в том, что СЭЭС может выполнять свои функции только при том условии, что область M_u принадлежит области M_y . При этом мощность, генерируемая системой в установившемся режиме, будет равна нагрузке, т. е. можно записать в виде $M_u \subseteq M_y \Rightarrow \bar{Y} = \bar{U}$.

Множество H , определяемое как пересечение областей B_x, M_y, M_z, M_u , образует область работоспособности СЭЭС:

$$H = B_x \bigcap M_y \bigcap M_z \bigcap M_u. \quad (2)$$

Это более узкое, чем в источниках [1], [3], представление области работоспособности, которое характеризует нахождение системы в работоспособном и рабочем состоянии одновременно, что особенно важно для решения задач предупредительного управления СЭЭС.

Учитывая определения работоспособного состояния системы и состояния ее правильного функционирования в соответствии с ГОСТом 27.002–89, область работоспособности можно представить как пересечение областей правильного функционирования системы $H = \bigcap_{j=1}^q w_j$ где w_j — об-

ласть правильного функционирования СЭЭС; q — количество областей правильного функционирования. Для описания области работоспособности разработаны подходы, подробно описанные в научной литературе. К ним относятся: метод последовательного перебора граничных точек [1], [4], метод матричного поиска [5], [6], метод сужающихся областей [7], метод отсекающих моделей [8]. Эти методы напрямую или с некоторой модернизацией можно использовать и для построения областей w_j . Представим процесс работы СЭЭС как совокупность всех возможных режимов производства электроэнергии, определяемых, например, количеством и составом работающих ГА, и каждому режиму поставим в соответствие область w_j . Тогда количество областей правильного функционирования, образующих область работоспособности, окажется конечным. Так, для СЭЭС с тремя ГА число $q = 7$. В этом случае можно говорить о разбиении области H на несколько сегментов, каждому из которых будет соответствовать своя область w_j . Процесс разбиения области H на отдельные сегменты, имеющие однородные признаки, соответствующие, например, состоянию правильного функционирования системы, назовем *сегментацией области работоспособности*. Области w_j^q , получаемые в результате процесса сегментации, назовем *усеченными*, или *внутренними областями правильного функционирования*.

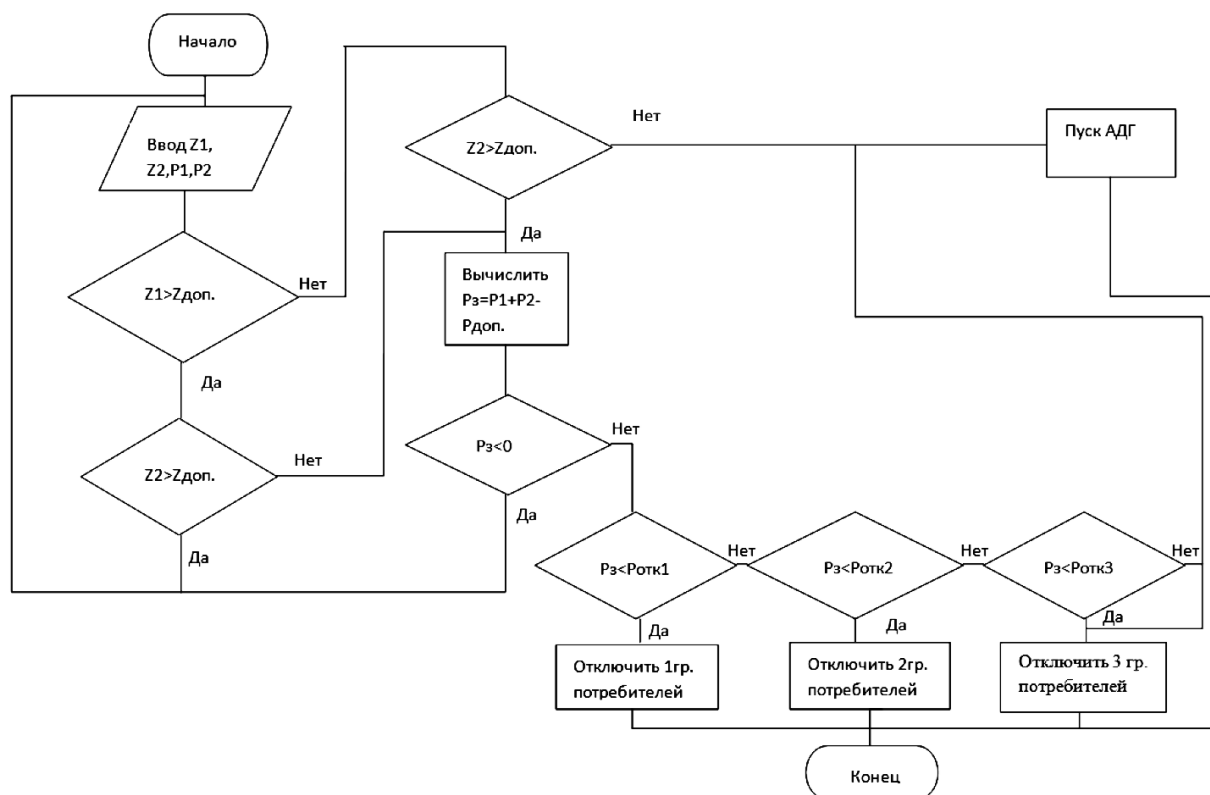
В настоящее время в рамках теории распознавания образов активно развиваются методы сегментации различных пространств в медицине [9], [10], экономике [11], [12], [13], а также при анализе видеоинформации [14], [15], [16], но методы сегментации области работоспособности в данном контексте до сих пор нигде не описаны. Разработки в этом направлении в рамках настоящей работы не рассматриваются. При этом $\forall w_j^q \in H$, $H = \bigcup_{j=1}^q w_j^q$, $j = \overline{1, q}$. Тогда можно дать следующее определение предупредительного управления системы. *Предупредительное управление* — это процесс формирования такого воздействия на СЭЭС, в результате которого ТС системы после срабатывания защиты будет принадлежать усеченной области правильного функционирования $w_j^q \in H$. Задача технического прогнозирования в этом случае сводится к необходимости определения режима, в котором будет работать СЭЭС после срабатывания устройств защиты, и к идентификации данного управляющего воздействия. Практическая реализация предложенного подхода в отдельных случаях приводит к простым и эффективным решениям.

Результаты (Results)

Рассмотрим режим работы СЭЭС в составе двух одинаковых дизель-генераторов: ГА1 и ГА2, нагруженных на 70 и 80 % от номинальной мощности: $P_1 = 0,7P_{\text{ном}}$, $P_2 = 0,8P_{\text{ном}}$. Предположим, что в процессе эксплуатации на ГА2 один из внутренних параметров — z_r , например, давление смазочного масла, вышел за пределы допуска некритической АПС. В этом случае представляется возможным прогнозировать режим работы, в котором окажется СЭЭС в случае превышения сигналом z_r значения критической АПС и аварийного отключения ГА2. Так как останется включенным на шины только ГА1, то следует проанализировать его ТС на принадлежность усеченной области правильного функционирования w_1^3 . Если эта область не построена и ее нет в памяти СУ, то обратим внимание на то, что все внутренние и выходные параметры ГА1 — в заданных пределах и при заданных внешних условиях. Для выполнения условия (2) необходимо проверить его ТС на принадлежность только области управляющих воздействий M_u , которая в случае одного агрегата вырождается в отрезок прямой, ограниченный допустимым значением мощности $P_{\text{доп1}}$ для случая работы ГА1. На рисунке представлена блок-схема алгоритма, реализующего данный способ, описанный в источнике [17].

По команде *Начало* осуществляют ввод текущих данных, а именно величин давления смазочного масла первого и второго ГА (z_1 , z_2) и нагрузки каждого из агрегатов (P_1 , P_2). Затем показатели давления сравниваются с минимально допустимыми величинами. Если z_1 или z_2 выходят за пределы допуска, то сравнивают суммарную нагрузку ($P_{\text{сум}}$) с допустимым ее значением на один ГА ($P_{\text{доп}}$). Если окажется, что $P_{\text{сум}} \geq P_{\text{доп}}$, выбирают группу потребителей, отключение которых позволит СЭЭС выполнять свои функции с требуемыми показателями качества после аварийного

отключения одного из ГА, и отключают этих потребителей от сети. Таким образом, используя результаты технического диагностирования ГА и прогнозируя развитие ситуации, на этапе предупредительного управления было принято решение, реализация которого позволила избежать аварии СЭЭС путем перевода ее в состояние правильного функционирования. При этом была осуществлена прогностическая структурная адаптация системы к отказу одного из ГА. Классические способы управления СЭЭС в нештатных режимах работы, применяемые до настоящего времени, приводят к обесточиванию и аварийной ситуации, которая может явиться причиной гибели судна и членов экипажа. Конечно, такое простое решение проблемы обусловлено характером неисправности, связанным с постепенным, по крайней мере, в течение 1–2 с изменением контролируемого параметра ГА от допустимого до его предельного значения. При этом не только СЭЭС, но и сам неработоспособный ГА работает с заданными показателями качества, т. е. первое и второе неравенства в системе (1) в это время остаются верными.



Блок-схема алгоритма отключения групп потребителей

При наступлении неисправности, связанной с отказом системы наддува или топливной системы дизеля, выполнение предложенной процедуры управления ТС осложняется отсутствием хорошо проработанных и апробированных высокоэффективных диагностических признаков. При этом следует отметить, что нарушения в подаче воздуха в дизель приводят к его остановке и могут явиться причиной возникновения аварийной ситуации на судне в течение десятых долей секунды. Современные системы управления диагностируют такого рода отказы посредством контроля момента перехода агрегата в двигательный режим работы с нахождением в этом состоянии в течение сравнительно длительного периода времени, который обычно колеблется в течение 2–6 с. В этом случае сеть дополнительно нагружается обратной мощностью, которую потребляет неработоспособный ГА, что дополнительно ухудшает ситуацию, и в случае даже относительно низкой, примерно 50 % от номинальной, величины первоначальной нагрузки может привести к аварии в СЭЭС. Данный подход характеризуется недопустимой для управления продолжительностью диагностирования. Это определяется тем, что в каждой СЭЭС протекают энергетические процессы, при которых не только отказавший, но также и хотя бы один из работающих

и работоспособных ГА на некоторое время переходит в двигательный режим работы. Именно поэтому такого рода отказы крайне редко купируются защитой. В данном случае целесообразным является применение косвенных методов суть которых состоит в следующем:

- в области работоспособности системы H выделяют сегменты, которые характеризуются наличием подобных энергетических процессов, т. е. определяют соответствующие усеченные области правильного функционирования: $W_j^n = \bigcup_{j=1}^n w_j^n$, $j = \overline{1, n}$ где n — количество таких сегментов;

- определяют момент перехода ГА в двигательный режим;
- в пространстве параметров (1) определяют точку S , соответствующую ТС СЭЭС в данный момент времени;

- проверяют выполнение условия $S \notin W_j^n$, и если оно выполняется, отключают ГА от сети без выдержки времени.

В источниках [18] и [19] предложена практическая реализация данного подхода для несамостоятельного кранового судна, где таковыми выступают области правильного функционирования w_1^n и w_2^n , характеризующиеся наличием процессов включения дополнительного ГА на параллельную работу и рекуперативного торможения в момент опускания груза. Для более сложных СЭЭС таких усеченных областей правильного функционирования будет существенно больше.

На блок-схеме алгоритма, представленного на рисунке (с. 402), показано, что при одновременном отклонении внутренних параметров ГА1 и ГА2 за пределы допуска и в случае, если отключение групп потребителей окажется неэффективным, формируют сигнал на запуск АДГ. Это тоже предупредительное управление, только аварийным источником электроэнергии. В отличие от традиционных решений, когда обычно стремятся сократить время запуска АДГ, предлагается формировать команду управления не при обесточивании судна, а несколько раньше, по особым предупредительным сигналам. В случае, если СУ не обеспечит корректную работу СЭЭС в штатных режимах эксплуатации и средства защиты не предотвратят наступление обесточивания, превентивный запуск АДГ обеспечит питанием всех аварийных потребителей электроэнергии. При этом переход на аварийное электроснабжение происходит мгновенно при исчезновении напряжения на шинах ГРЩ, т. е. судно не теряет ход и управление. Устройство, реализующее данный подход, испытано в натурных условиях и в течение времени подконтрольной эксплуатации показало свою высокую эффективность.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее часто обесточивание судов связано с перегрузкой их ДГ. Предложенные подходы позволяют таким образом изменить входные параметры системы, что в случае отказа даже нескольких агрегатов она окажется в состоянии правильного функционирования. На практике это должно привести к сокращению числа аварийных ситуаций в СЭЭС. Разработанные методы предупредительного управления могут быть использованы при создании комплексных СУ техническими средствами судна, самонастраивающихся и самоорганизующихся систем.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. СУ современных судов не обеспечивают в полной мере безаварийную эксплуатацию СЭЭС в штатных режимах работы, вызванных отказом хотя бы одного из ГА.
2. Для решения задачи безаварийной эксплуатации СЭЭС обосновано использование методов предупредительного управления, осуществляемого посредством перевода ТС системы в момент отказа ее источников электроэнергии в режим правильного функционирования.
3. Разработанные алгоритмы предупредительного управления позволяют сравнительно просто избежать аварии в СЭЭС при переходе в неработоспособное состояние одного или нескольких ГА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А. В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156.
2. Абрамов О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2011. — № 2 (28). — С. 4–15.
3. Saushev A. V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary / A. V. Saushev, E. V. Bova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 327. — Is. 5. — Pp. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
4. Катыева Я. В. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катыева, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
5. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
6. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
7. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
8. Павлюк Г. П. Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей / Г. П. Павлюк, В. А. Шихин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2010. — № 10. — С. 39–45.
9. Ерусланов Р. В. Сегментация изображений органов брюшинного пространства по компьютерным томографическим изображениям на основе функции уровня / Р. В. Ерусланов, М. Н. Орехова, В. Н. Дубровин // Компьютерная оптика. — 2015. — Т. 39. — № 4. — С. 592–599. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-592-599.
10. Rahim M. S. M. 3D bones segmentation based on CT images visualization / M. S. M. Rahim, A. Norouzi, A. Rehman, T. Saba // Biomedical Research. — 2017. — Vol. 28. — Is. 8. — Pp. 3641–3644.
11. Цой М. Е. Построение сегментации на основе модифицированного RFM анализа для повышения лояльности потребителей / М. Е. Цой, В. Ю. Щеколдин, М. Н. Лежнина // Российское предпринимательство. — 2017. — Т. 18. — № 21. — С. 3113–3134. DOI: 10.18334/rp.18.21.38506.
12. Жук Е. С. Позиционирование компаний на заре эпохи маркетинговой кастомизации / Е. С. Жук // Российское предпринимательство. — 2014. — № 18 (264). — С. 184–196.
13. Guadros A. J. Customer segmentation model based on value generation for marketing strategies formulation / A. J. Guadros, V. E. Domingues // Estudios Gerenciales. — 2014. — Vol. 30. — Is. 130. — Pp. 25–30. DOI: 10.1016/j.estger.2014.02.005.
14. Чочиа П. А. Сегментация изображений на основе анализа расстояний в пространстве / П. А. Чочиа // Автометрия. — 2014. — Т. 50. — № 6. — С. 97–110.
15. Khan M. W. A Survey: Image Segmentation Techniques / M.W. Khan // International Journal of Future Computer and Communication. — 2014. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 89–93. DOI: 10.7763/IJFCC.2014.V3.274.
16. Hu X. Improved fuzzy c-means algorithm of the image segmentation / X. Hu, L. Li // Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2015. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 1–5. DOI: 10.11648/j.jeee.20150301.11.
17. Пат. 2623106 Российская Федерация, МПК H02J 3/24, H02H 7/85. Способ автоматической разгрузки параллельно работающих генераторных агрегатов / Н.В. Широков; заяв. и патентобл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2016118975; заявл. 16.05.2016; опубл. 22.06.2017, Бюл. № 18. — 8 с.
18. Пат. 2666792 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ и устройство защиты сети автономной электростанции / Н. В. Широков; заяв. и патентобл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2017126361; заявл. 21.07.2017; опубл. 12.09.2018, Бюл. № 26. — 12 с.
19. Пат. 2653706 Российская Федерация, МПК H02H 3/12, H02J 3/38. Способ защиты сети автономной электростанции. / Н. В. Широков; заяв. и патентобл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2017117363; заявл. 18.05.2017; опубл. 14.05.2018, Бюл. № 14. — 10 с.

REFERENCES

1. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. "Diagnosing of the condition of electro-technical systems in space of parameters of their elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

2. Abramov, O. V. "Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya sistem otvetstvennogo naznacheniya." *Informatika i sistemy upravleniya* 2(28) (2011): 4–15.
3. Saushev, A. V., and E. V. Bova. "Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. No. 5. IOP Publishing, 2018. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
4. Katueva, Ya. V., and D. A. Nazarov. "The Methods of Parametric Synthesis Based on Grid Representation of a Region of Acceptability." *Information Technologies* 21.9 (2015): 651–656.
5. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh sistem*. SPb.: Politekhnik, 2013.
6. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob»ektov vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
7. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admission of multiple parameter systems." *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.
8. Pavljuk, G. P., and V. A. Shikhin. "Statistical Approach for the Regions of Required Control Quality Construction: the Cut-off Models Method." *Mechatronics, automation, control* 10 (2010): 39–45.
9. Eruslanov, R. V., M. N. Orehova, and V. N. Dubrovin. "Retroperitoneal space organ segmentation from CT images based on the level set function." *Computer Optics* 39.4 (2015): 592–599. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-592-599.
10. Rahim, M. S. M., A. Norouzi, A. Rehman, and T. Saba. "3D bones segmentation based on CT images visualization." *Biomedical Research* 28.8 (2017): 3641–3644.
11. Tsoy, M. E., V. Yu. Shchekoldin, and M. N. Lezhnina. "Building segmentation on the basis of modified RFM analysis to increase customer loyalty." *Russian journal of Entrepreneurship* 18.21 (2017): 3113–3134. DOI: 10.18334/rp.18.21.38506.
12. Zhuk, Ye. S. "Positioning of companies at the dawn of the era of marketing customization." *Russian journal of Entrepreneurship* 18(264) (2014): 184–196.
13. Cuadros, Alvaro Julio, and Victoria Eugenia Domínguez. "Customer segmentation model based on value generation for marketing strategies formulation." *Estudios Gerenciales* 30.130 (2014): 25–30. DOI: 10.1016./j.est.2014.02.005.
14. Chochia, P. A. "Image segmentation based on the analysis of distances in an attribute space." *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 50.6 (2014): 613–624. DOI: 10.3103/S8756699014060107.
15. Khan, Muhammad Waseem. "A survey: Image segmentation techniques." *International Journal of Future Computer and Communication* 3.2 (2014): 89–93. DOI: 10.7763/IJFCC.2014.V3.274.
16. Hu, Xuegang, and Lei Li. "Improved fuzzy c-means algorithm for image segmentation." *Journal of Electrical and Electronic Engineering* 3.1 (2015): 1–5. DOI: 10.11648/j.jeee.20150301.11.
17. Shirokov, N. V. RU 2 623 106 C1, IPC H 02 J 3/24, H 02 H 7/85. Sposob avtomaticheskoy razgruzki jelektrotekhnicheskoy sistemi s parallelno rabotajushimi generatormi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 22 June 2017.
18. Shirokov, N. V. RU 2 666 792 C1, IPC H 02 H 3/08. Sposob i ustroystvo zashiti seti avtonomnoy jelektrostantsii. Russian Federation, assignee. Publ. 12 Sep. 2018.
19. Shirokov, N. V. RU 2 653 706 C1, IPC H 02 H 3/12, H 02J 3/38. Sposob zashiti seti avtonomnoy jelektrostantsii. Russian Federation, assignee. Publ. 14 May 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.
Received: February 25, 2019.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 11. № 2

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.04.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 500 экз. Заказ № 295/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7