

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

# **ВЕСТНИК**

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

**Том 12. № 4**

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 4. — 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».

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.



## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ .....627

*Майоров Н. Н., Фетисов В. А.* Применение логистической функции для оценки воздействия внешней среды на морские паромные, круизные линии и морские пассажирские терминалы.....627

*Гарибин П. А., Богатов А. В.* Реновация систем наполнения водой камер судоходных шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского водного пути .....640

*Маликова Т. Е., Тимошек Е. С.* Результаты численной реализации задачи расстановки флота малой судоходной компании .....654

*Колосов М. А., Чинаков П. П.* Гидроперегрузка сорбционного материала на очистных сооружениях многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка».....666

*Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Радченко А. А.* Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах.....672

*Каретников В. В., Менишков А. И., Рудых С. В.* Исследование вопросов разработки алгоритмов функционирования телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов.....683

*Логиновский В. А.* Разработка учебных целей по дисциплине «Оценка риска в мореплавании» на основе классификации Блума .....692

*Ююкин И. В.* Навигационное использование системы e-LORAN в модификации с методом сплайн-функций.....703

*Дыда А. А., Пляшешник К. Н., Пушкарев И. И.* Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных.....716

### ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ .....726

*Исаулова К. Я.* Исследование маршрутов движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории Северного морского пути.....726

*Тезиков А. Л., Ольховик Е. О.* Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути.....734

### СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ .....745

*Цветков Ю. Н., Журавлева К. Е.* Механизм трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки .....745

### СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА.....757

*Матвеев В. Т., Очеретяный В. А., Дологлонян А. В.* Эксплуатация на переменных режимах замкнутых микрогазотурбинных установок с окислителем кислородом для подводной техники.....757

*Ерофеев П. А., Жуков В. А., Черный С. Г.* Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей.....765

Том 12. № 4

2020

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

##### Гл. редактор

**С. О. Барышников**

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

##### Зам. гл. редактора

**А. П. Нырк**

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

##### С. Гуцма

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

##### Г. В. Егоров

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

##### Р. Качиньски

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

##### А. И. Пошивай

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

##### А. Е. Сазонов

д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

##### Р. М. Юсупов

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

##### РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

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

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....775**

<i>Самосейко В. Ф., Гуськов В. О.</i> Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии .....	775
<i>Широков Н. В.</i> Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности генераторов .....	789
<i>Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М.</i> Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии.....	801
<i>Воробьев К. А., Поляков Н. А., Стжелецки Р.</i> Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности .....	812

## CONTENTS

### OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION .....627

*Maivorov N. N., Fetisov V. A.* Application of the logistic function to assess the impact of the environment on sea ferry, cruise lines and marine passenger terminals .....627

*Garibin P. A., Bogatov A. V.* Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1–6 of the Volga-Baltic waterway .....640

*Malikova T. E., Timoshek E. S.* The results of numerical implementation of the task of arranging the fleet of a small shipping company .....654

*Kolosov M. A., Chinakov P. P.* Hydraulic overloading of sorption material at the treatment facilities of the Multipurpose Sea Cargo Complex (MSCC) Bronka.....666

*Kuznetsov A. L., Semenov A. D., Radchenko A. A.* Box selectivity in different container cargo-handling systems .....672

*Karetnikov V. V., Menshikov A. I., Rudikh S. V.* Development of algorithms for a telecommunication automated system for organizing the vessel traffic .....683

*Loginovskiy V. A.* Designing the educational objectives for “Risk assessment in seafaring” course using Bloom’s taxonomy .....692

*Yuyukin I. V.* Navigational use of the e-LORAN system in modification with the spline functions method .....703

*Dyda A. A., Plyasheshnik K. N., Pushkarev I. I.* Developing a model of the dynamics of unmanned vessel on course based on the experimental data .....716

### WATERWAYS AND HYDROGRAPHY .....726

*Isaulova K. Ya.* Research of traffic routes of the large-tonnage vessels in the eastern sector of the Northern Sea Route.....726

*Tezikov A. L., Ol'khovik E. O.* Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area .....734

### SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR .....745

*Tsvetkov Y. N., Zhuravleva K. E.* Friction mechanism of polyamide-6 against tin bronze under the boundary lubrication conditions .....745

### SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES.....757

*Matviienko V. T., Ocheretianyi V. A., Dologlonyan A. V.* Operation at variable modes of closed micro-gas turbine plants with oxidizer-oxygen for underwater equipment .....757

*Erofeev P. A., Zhukov V. A., Chernyi S. G.* Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine.....765

Volume 12. № 4

2020

EDITOR-IN-CHIEF

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

**Deputy Editor-in-Chief**

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

**S. Gutsma**

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

**G. V. Yegorov**

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

**R. Kachin’ski**

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

**A. I. Poshivay**

Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

**A. Ye. Sazonov**

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

**M. Yusupov**

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

**EDITORIAL STAFF:**

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

<b>ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....</b>	<b>775</b>
<i>Samosejko V. F., Guskov V. O.</i> Optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of energy losses.....	775
<i>Shirokov N. V.</i> Preventive protection of autonomous electric power systems from generators reverse power.....	789
<i>Grigoryev A. V., Zaynullin R. R., Malyshev S. M.</i> Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources.....	801
<i>Vorobev K. A., Poliakov N. A., Strzelecki R.</i> Bidirectional power converter system implementation in limited power grid .....	812

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-627-639

## APPLICATION OF THE LOGISTIC FUNCTION TO ASSESS THE IMPACT OF THE ENVIRONMENT ON SEA FERRY, CRUISE LINES AND MARINE PASSENGER TERMINALS

**N. N. Maiorov, V. A. Fetisov**

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

*The market of sea ferry transportation and the market of sea cruises have been investigated as one of the most promising and rapidly developing markets for international sea transportation. It is noted that the development of infrastructure is limited, on the one hand, by the internal processes and resources of each terminal, and on the other hand, by the need to respond to calls from the external environment surrounding the terminals. The size of cruise and ferry ships is increasing and the trend for population mobility continues and even increases. It is emphasized that sea passenger ports are being integrated into the transport systems of cities and regions. The existence of sufficiently developed mathematical forecasting models in the class of polynomial models, probabilistic series and other techniques that do not take into account, to a sufficient extent, the influence of the external environment, is noted. It is noted that the interests of passengers directly influence the sphere of sea passenger transportation. Therefore, the development of research and forecasting methods is relevant. The existing trends for an increase in passenger traffic are considered and the necessary statistical information on the ports and terminals of the Adriatic and Baltic Seas is presented. The developed scheme of interaction between the participants of the cruise market and the mathematical model of the port as a technical system are presented. The logistic function proposed for use in assessing the external environment has been substantiated. To determine the area of its use, a scheme for dividing the strategic and operational levels of functioning for sea passenger ports is given. A new mathematical model is considered and the main equation of the logistic function is derived. The boundary conditions for the applicability of the model are analyzed. The analytical data for the study are selected ship calls at the Passenger Port of St. Petersburg «Marine Facade» in 2019 and planned ship calls in 2020. To simulate the situation, a new consideration of various proportionality coefficients determining the demand for cruise and ferry transportation is proposed. For different values, modeling is performed in the interval of short-term forecasting. Based on the results obtained, the attractiveness conditions of the corresponding cruises and the speed of cruises purchase by passengers are formed. A complete model, taking into account the real timetable of the sea passenger port, is presented.*

*Keywords: marine transport processes, passenger flow, simulation, ferry network, cruise network, marine passenger port, logistics function, Baltic sea, Adriatic sea, ferry line, cruise market.*

### For citation:

Majorov, Nikolaj N., and Vladimir A. Fetisov. "Application of the logistic function to assess the impact of the environment on sea ferry, cruise lines and marine passenger terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 627–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-627-639.

**УДК 65.012.1; 656.072**

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА МОРСКИЕ ПАРОМНЫЕ, КРУИЗНЫЕ ЛИНИИ И МОРСКИЕ ПАССАЖИРСКИЕ ТЕРМИНАЛЫ

**Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов**

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

*Исследован рынок морских паромных перевозок и рынок морских круизов как один из наиболее перспективных и быстроразвивающихся рынков международных морских перевозок. Отмечается, что развитие инфраструктуры ограничивается, с одной стороны, внутренними процессами и ресурсами каждого терминала, а с другой — необходимостью отвечать на вызовы окружающей среды. Размеры круизных и паромных судов увеличиваются, тенденция к мобильности населения сохраняется и даже возрастает. Подчеркивается, что морские пассажирские порты интегрируются в транспортные системы городов и регионов. Отмечается существование достаточно проработанных математических моделей прогнозирования в классе полиномиальных моделей, вероятностных рядов и других методик, которые не учитывают, в досточной мере, влияние внешней среды. Отмечается, что на сферу морских пассажирских перевозок оказывают непосредственное влияние интересы пассажиров. Поэтому разработка методики исследования и прогнозирования является актуальной. Рассматриваются имеющиеся тренды на увеличение пассажиропотоков и представлена необходимая статистическая информация по портам и терминалам Адриатического и Балтийского морей. Представлена разработанная схема взаимодействия участников круизного рынка и математическая модель порта как технической системы. Обоснована логистическая функция, предлагаемая для использования при оценке внешней среды. Для определения области ее использования приводится схема разделения стратегических и оперативных уровней функционирования для морских пассажирских портов. Рассмотрена новая математическая модель и сделан вывод основного уравнения логистической функции. Проанализированы граничные условия применимости модели. Аналитическими данными для проведения исследования были выбраны судозаходы в АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» в 2019 г. и плановые судозаходы в 2020 г. Для моделирования ситуации предложено новое рассмотрение различных коэффициентов пропорциональности, определяющих спрос на круизные и паромные перевозки. При различных значениях выполнено моделирование в интервале краткосрочного прогнозирования. На основе полученных результатов формируются условия привлекательности соответствующих круизов и скорость покупки круизов пассажирами. Приводится полная модель с учетом реального расписания морского пассажирского порта.*

*Ключевые слова: морские транспортные процессы, пассажиропоток, моделирование, паромная сеть, круизная сеть, морской пассажирский порт, логистическая функция, Балтийское море, Адриатическое море, паромная линия, круизный рынок.*

**Для цитирования:**

*Майоров Н. Н. Применение логистической функции для оценки воздействия внешней среды на морские паромные, круизные линии и морские пассажирские терминалы / Н. Н. Майоров, В. А. Фетищев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 627–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-627-639.*

## **Введение (Introduction)**

Рынок морских паромных перевозок и рынок морских круизов является одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся рынков международных морских перевозок. При этом имеет место значительная динамика изменений в маршрутных сетях, интенсивности работы, стратегиях морских компаний для регионов морей, например, Балтийского моря, Адриатического моря и др. В настоящее время начинается развитие рынка пассажирских паромных перевозок на Черном море, наблюдается расширение маршрутных сетей, создание новых паромных компаний. Перевозка паромами в пределах морей на международном рынке является наиболее востребованной, так как позволяет пассажирам быть очень мобильными, путешествовать на собственном транспорте. Распространенность коротких и средних маршрутов определяет интенсивное движение судов, четких график которых поддерживается спросом у пассажиров в регионах. Общее количество паромных линий, например, в Балтийском регионе постоянно растет [1], [2]. Большое количество паромных линий включает внутренние линии, соединяющие части государств с островными территориями, что также способствует расширению рынка перевозок. Так, например, в Адриатическом и Балтийском морях паромные линии связаны с европейским континентом тысячей островов.

Следует отметить, что основным стимулом развития в Балтийском регионе для паромных перевозок являются порты Финляндии, Эстонии, России и их связи с другими европейскими государствами в регионе. Именно в регионах этих морей сегодня наблюдаются серьезные изменения не только в маршрутных сетях, но и в стратегиях развития и продвижения на рынке паромных услуг.

Ввиду мировых трендов, отражающихся в стремлении терминалов к увеличению пассажиропотока, изменению размеров круизных и паромных судов [3]–[6], [13], а также наблюдающихся изменений интересов пассажиров, происходят изменения в стратегиях планирования и управления, в требованиях к соблюдению норм экологии, требующие использования новых моделей и методов, основанных на учете динамических параметров. К примеру, в настоящее время высокоскоростные паромы, скорость которых превышает 30 уз и более, успешно конкурируют с воздушным транспортом в пассажирских перевозках. На рынок выходят новые, так называемые *круизные паромы*, — тяжелые и комфортабельные суда, обеспечивающие для пассажиров сервис высокого уровня. При системном рассмотрении круизная индустрия находится в прямой зависимости как от интересов пассажиров, интересов политики города и регионов, интересов пассажирских портов и терминалов, так и от интересов компаний-перевозчиков. В настоящее время рост количества пассажиров наблюдается не только в круизах по Средиземному морю, но и в круизах по Балтийскому морю [6], [7].

Согласно данным источников [8], [9], крупнейшая в мире частная круизная компания *MSC Cruises* объявила о планах по созданию нового круизного терминала в порту Майами. Новый терминал позволит обеспечить высокое качество обслуживания пассажиров как при посадке, так и при высадке на круизных лайнерах *MSC Cruises* и значительно расширить присутствие компании в Северной Америке и Карибском бассейне. Компания *MSC Cruises* получила разрешение на проектирование, постройку, эксплуатацию и обслуживание здания, в котором находятся два круизных терминала: AA и AAA, а также два круизных причала. Терминал *MSC Cruises* в Майами сможет принимать два гигантских круизных лайнера одновременно, что позволит компании обслужить поток до 28 000 пассажиров в день.

Согласно официальным источникам, наблюдается значительное увеличение пассажиропотока морских портов и терминалов [7], [10], что также является показателем увеличения интереса к морским паромным перевозкам. Сохраняющаяся тенденция увеличения пассажиропотока (рис. 1, табл. 1) была определена для АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» (далее — Пассажирский порт «Морской фасад») — первого уникального специализированного морского пассажирского порта как в Балтийском регионе, так и в Российской Федерации.

Таблица 1

**Пассажиропоток порта «Пассажирский порт «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург)**

Год	Пассажирооборот (раh)	Год	Пассажирооборот (раh)
2009	490110	2014	947674
2010	698044	2015	964818
2011	807492	2016	912990
2012	822714	2017	995757
2013	965348	2018	1091763
		2019	1104479

При построении изменения пассажиропотока представлен линейный тренд второй степени [11], [12] ввиду линейности характера увеличения пассажиропотока (рис. 1).

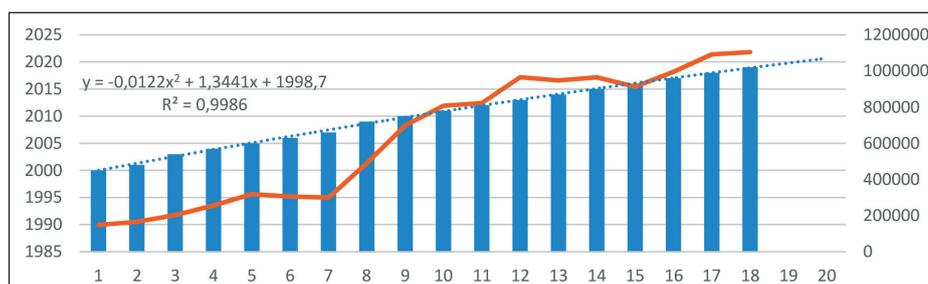


Рис. 1. Увеличение пассажиропотока морских паромных линий в Санкт-Петербурге в 2000–2019 гг.

Основную долю прибыли на данном рынке приносят пассажирские перевозки и перевозки автомобилей, выручка от продажи товаров и услуг, оказываемых в паромных магазинах, ресторанах и т. д. В настоящее время прибыль приносят сопутствующие логистические цифровые сервисы, ускоряющие процессы оформления и покупки туров. Ввиду увеличения пассажиропотока наблюдается увеличение загрузки на портовую инфраструктуру. На пассажирские порты оказывает влияние внешняя среда, под действием которой определяются тенденции к строительству больших круизных и паромных лайнеров нового поколения, а также увеличению длины причалов морских портов и терминалов.

Рассмотрим примеры в сфере завершения строительства новых паромных и круизных судов. Согласно источнику [14], 2019 г. стал рекордным по количеству спущенных на воду круизных лайнеров (введено в строй 24 новых круизных судна). Самым большим лайнером, введенным в эксплуатацию, стал *Costa Smeralda* вместимостью 5224 пассажира. Это первое пассажирское судно, работающее на сжиженном природном газе, является одним из самых экологически чистых в мировой круизной отрасли. Пассажирское судно класса *Meraviglia-plus — Grandiosa MSC*, [14], будет сдано в эксплуатацию в ноябре 2020 г. Вместимость этого судна чуть менее 5000 пассажиров. При этом суда данного класса оснащены современными цифровыми технологиями. Для ускорения регистрации пассажиров американская круизная компания *Royal Caribbean Cruises* вводит на лайнерах технологию распознавания лиц, повышая тем самым безопасность и оперативный мониторинг на судне и обеспечивая оперативный процесс размещения на судне пассажиров.

Модели принятия решений, существующие, например, пять лет назад, требуют в настоящее время внесения определенных изменений, вызванных увеличением интенсивности процессов. Сегодня необходима разработка новых методов планирования и прогнозирования, которые позволят учесть как влияние внешней среды, так и условия влияния пассажиропотока. В предлагаемом исследовании рассмотрен новый метод планирования и прогнозирования с использованием логистической функции и включением переменных, определяющих как заинтересованность пассажиров определенным круизом.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Построение математической модели процессов морского пассажирского порта как технической системы.* Морской пассажирский терминал является уникальным транспортным объектом — точкой сходимости как наземных маршрутов, так и маршрутной сети компаний перевозчиков. Наиболее важной и сложной задачей является оптимизация процессов в морском пассажирском порту или терминале, оперативное управление, планирование и прогнозирование развития для качественного принятия решений по модернизации инфраструктуры и сохранению уровня прибыльности. Ввиду широкого спектра социально-экономических, транспортных и инфраструктурных, технических вопросов, а также вопросов организации работы, эффективного управления и учета влияния окружающей среды необходимо разрабатывать новые модели и методы на основе системного многокритериального анализа.

Морская терминальная система находится под влиянием окружающей среды и мировой геополитической ситуации, что значительно усложняет разработку долговременной эффективной системы принятия решений по эффективному управлению и стратегическому долгосрочному прогнозированию. Морской пассажирский порт является непрерывной системой, в которой формируется расписание судозаходов порта, при этом возможные задержки и запаздывания обуславливают стохастичность данной системы. Математическую модель процессов морского пассажирского порта как технической системы [15] можно представить в виде обобщенных стохастических дифференциальных уравнений второго порядка:

$$F^*(Y, \dot{Y}, \ddot{Y}, \Lambda, t) = 0, \quad (1)$$

где при  $t = 0$   $Y(0), \dot{Y}(0)$  — векторы начальный условий;  $t \in [0, T]$  — некоторый интервал времени;  $F^*$  — вещественная нелинейная вектор-функция своих аргументов;  $F^* = (F_1^*, \dots, F_n^*)$ ,  $Y = (y_1, \dots, y_n)$ ,  $\dot{Y}, \ddot{Y}$  — векторы фазовых координат и их производных первого и второго порядка (функций времени),  $X = (x_1, \dots, x_n)$  — вектор параметров случайных величин;  $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  — вектор возмущающих воздействий на систему.

Вектор возмущающих воздействий на систему можно представить в виде следующих функций: ценовая политика, сезонность, интерес населения, конкуренция между компаниями и терминалами на рынке, наличие логистических информационных сервисов, транспортная доступность терминала. Теоретически к возмущающим воздействиям можно отнести любой процесс, оказывающий непосредственное влияние на систему «морской пассажирский порт – круизная или паромная компания». Активным элементом данной системы является пассажир с его целевыми установками, от поведения и выбора которого будет напрямую зависеть организация работы всей системы перевозок. При этом поведение пассажиров сложно описать с помощью классических уравнений. Если на микроуровне поведение пассажира можно описать определенными моделями, такими как модели для транспортных и пассажирских потоков, предложенные *H. Greenberg, B. D. Greenshields, C. F. Daganzo* [16]–[18], модель притягивающих сил, модели систем массового обслуживания, модели на основе клеточных автоматов, то для решения задачи оценки на макроуровне необходим новый подход в связи с расширением мотивации для путешествий пассажиров (смена места жительства, трудовая миграция, поездка в другой регион (страну) на срок более года, посещение друзей и близких и др.).

Для решения вопросов планирования и стратегического позиционирования морского пассажирского порта в регионе необходимо использовать модели и методы прогнозирования. В данной работе выполнено исследование позиционирования морского пассажирского порта на основе круговых диаграмм связей *CircosGraph* [19]. При этом управление морским портом должно предусматривать изучение и анализ тенденций и трендов. С учетом необходимости прогнозирования представим схему границ задач прогнозирования для морского пассажирского порта (рис. 2).

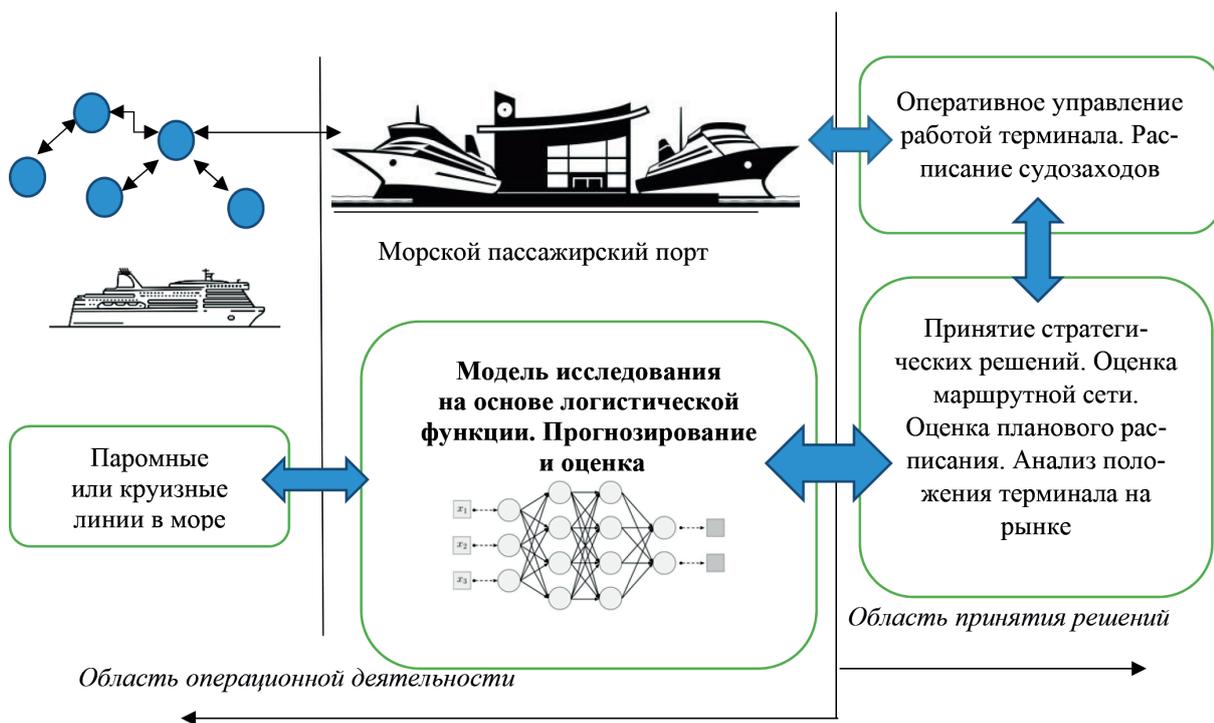


Рис. 2. Использование логистической функции для прогнозирования работы на основе концептуальной модели исследования

В статье авторов [4] представлена специальная модель для прогнозирования нового паромного или круизного маршрута [20], [21] между различными портами в границах моря. Для определения динамики пассажиропотока руководителем или лицом, принимающим решение, в данной работе предлагается использовать логистическую функцию. Это позволит связать характеристики региона, определить спрос на паромные и круизные маршруты, а также время и активность пассажиров для выбора соответствующего существующего круиза или нового круиза из существующего списка маршрутов из терминала.

*Модель исследования выбора круизов со стороны общества на основе логистической функции.* На основе системной точки зрения процессы создания туристического круизного продукта можно представить в виде организации следующих мероприятий:

- самого круизного тура;
- комфортного пребывания пассажира на борту;
- берегового обслуживания туриста в терминалах и околопортовой инфраструктурой;
- сервисного обеспечения пассажира как на борту судна, так и при прохождении терминала.

На основе существующего прямого влияния внешней среды на систему морских пассажирских терминалов необходимо разработать методику по учету такого влияния. Если рассматривать текущие состояния системы, то они будут формироваться из следующих переменных:

$$X_{i+1}(t) = X_0(t) \pm \lambda(t), t = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

где  $X_{i+1}(t)$  — новое состояние портовой системы;  $X_0(t)$  — некоторое начальное состояние, принятое за эталонное лицом, принимающим решение;  $\pm \lambda(t)$  — учет фактора влияния внешней среды, как положительного так и отрицательного.

Рынок морских пассажирских перевозок организован таким образом, что пользователю (будущему пассажиру) выгоднее заблаговременно забронировать тур. По мере приближения к дате начала тура цена за каюту будет возрастать. Тем самым рынок стимулирует пассажиров заранее принимать решение, что оказывает влияние на загрузенность круизного судна и организацию непосредственно самого круиза. В случае, если на круиз было продано незначительное количество мест, то компания-перевозчик зачастую предлагает каюту на другой тур, который начинается раньше, либо на схожий тур, где процент заполнения круизного судна больше.

Для учета влияния внешней среды предлагается использовать аналитическую модель на основе логистической функции. Фактически логистическая функция, или логистическая кривая [22], представляет собой моделирующую кривую роста вероятности некоторого события по мере изменения управляющих параметров, которыми могут быть как факторы риска, так и стратегия продвижения круизных услуг на рынке. Логистическая кривая относится к S-образным кривым [15]. Вероятность  $P$  следует трактовать как достижения желаемых параметров, к примеру, заполнение паромного судна, формирование условий для открытия новых паромных направлений.

Предположим, что в некоторый момент времени от круизной компании начинает поступать измененная информация о новом круизе в отношении запланированного судном захода в морской пассажирский терминал. Круиз будет осуществлен только в случае достижения порога как минимум безубыточности маршрута. Начальная стадия роста соответствует экспоненциальной функции, так как количество заинтересованных лиц, которые выбрали данный круиз, увеличивается. Затем, по мере насыщения, рост уменьшается и требуется использование дополнительных рыночных механизмов для привлечения новых потенциальных пассажиров.

Простейшую логистическую функцию представим следующим соотношением:

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}, \quad (3)$$

где  $P(t)$  — искомая зависимость от функции времени;  $t$  — время, равное времени продажи тура.

Ситуация моделирования информации о круизе выглядит следующим образом. Пусть известна заданная вместимость круизного или паромного судна. Данная величина является постоянной и к этому числу должна стремиться функция. В некоторый заданный момент времени начинает формироваться информация о маршруте и круизное судно появляется в расписании порта. В каждый момент времени сегмент пользователей, осведомленных о круизе, может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned}
 &t_1 : N - x_1; \quad t_2 : (N - x_1) - x_2; \quad t_3 : ((N - x_1) - x_2) - x_3; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &t_n : ((N - x_{j-1}) - x_{j-2}) - x_{j-3} - \dots - x_{j-N}); \\
 &F(N - x_j) \rightarrow \max_t, \quad t \in [t_0, t_s].
 \end{aligned} \tag{4}$$

Функция  $F(N - x_j)$  является некоторой целевой функцией, которая стремится к максимуму по времени, что означает наибольшую скорость продажи билетов на круиз и его заполнение. Интервал времени устанавливается лицом, принимающим решение. Обычно за начальный момент времени можно принять получение информации о новом круизе. В этом случае скорость распределения информации о круизе можно представить следующей системой уравнений с учетом преобразований:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= kx(N - x_1); \quad \frac{dx}{x(N - x)} = kdt; \quad \int \frac{dx}{x(N - x)} = \int kdt; \quad \frac{1}{N} \ln \frac{x}{N - x} = kt + C; \\
 \frac{x}{N - x} &= e^{Nkt+C}; \quad x(t) = \frac{N}{1 + Ee^{-Nkt}},
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $E$  — переменная, отражающая характер кривых распределения информации,  $E = (\alpha - 1)$ ;  $\alpha$  — степень общения пользователей друг с другом (по умолчанию принимаем  $\alpha > 0$ ).

Логистическая функция является зависимой от многих факторов, поэтому необходимо ее исследовать отдельно как функцию времени  $\alpha(t)$ . Тогда получим искомое уравнение логистической функции о распределении информации о новом круизе в виде

$$X(t) = \frac{N}{1 + (\alpha - 1)e^{-Nkt}}. \tag{6}$$

При решении логистической функции для возможности создания заключения по круизу не будем рассматривать значения, представленные в отрицательной плоскости. В рассмотрение принимаются только значения  $X(t) > 0$ . В зависимости от значения константы изменяется характер роста осведомленности общества о круизе на первых стадиях, но, рано или поздно, при любом  $\alpha = \text{const}$  логистическая функция достигает заданного уровня насыщения, что соответствует уровню продажи круизных туров. Пассажиры в полном объеме придут в терминал в заданное время.

*Исходные данные для моделирования и решения задачи прогноза заинтересованности круизом или паромным маршрутом со стороны общества.* Согласно статистическим данным [10], в АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад», в настоящее время наблюдается значительное увеличение пассажиропотока и интенсивности круизных судов, по сравнению с 2016–2017 гг. Для формирования условий исследования эффективности применения логистической функции для морского пассажирского терминала за основу следует выбрать интенсивность круизных линий. На основе анализа расписаний судовых заходов за 2019 г. была определена пассажироместимость (табл. 2). На основании этих данных можно исследовать загруженность терминала, планировать его работу и, по возможности, оптимизировать ее. Выполним выборку различных круизных и паромных судов, включая плановые графики судовых заходов на 2020 г. (табл. 2, рис. 3). В мае 2020 г. состоялось плановое открытие круиза на новом круизном судне Sky Princess.

**Список круизных судов, заходивших  
в АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» в навигацию 2019 г.**

Круизное судно	Причалы	Прибытие – Отправление	Пассажировместимость
AIDAprima	7	8:00 08.10.2019 – 20:00 08.10.2019	3400
Princess Anastasia	3	8:00 26.09.2019 – 18:00 27.09.2019	2500
Viking Jupiter	7	7:00 25.09.2019 – 18:00 26.09.2019	944
Sky Princess	7	6:30 01.05.2020 – 18:00 02.05.2020	4402



AIDAprima



Princess Maria



Viking Jupiter



Sky Princess

*Рис. 3. Морские круизные суда и паромы, заходящие  
в «Пассажирский порт «Морской Фасад» с сентября по октябрь 2019 г.  
(из открытого источника [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com))*

*Результаты моделирования оценки круиза на основе логистической функции.* Объектом исследования на основании логистической функции является моделирование различных сценариев заполнения круизного судна, выбора круиза пассажирами. На основании моделирования были получены следующие графики. Временной период принимается одинаковым для фиксации различной скорости реакции общества, но круизный продукт. Теоретически используются одинаковые условия и постоянная экономическая ситуация на интервале кратковременного планирования.

Для оценки активности пассажиров необходимо выбрать интервалы для коэффициента пропорциональности  $K = \{0,1; 0,3; 0,4; 0,7; 0,9; 1\}$ . Предлагается ввести коэффициенты из табл. 3.

Таблица 3

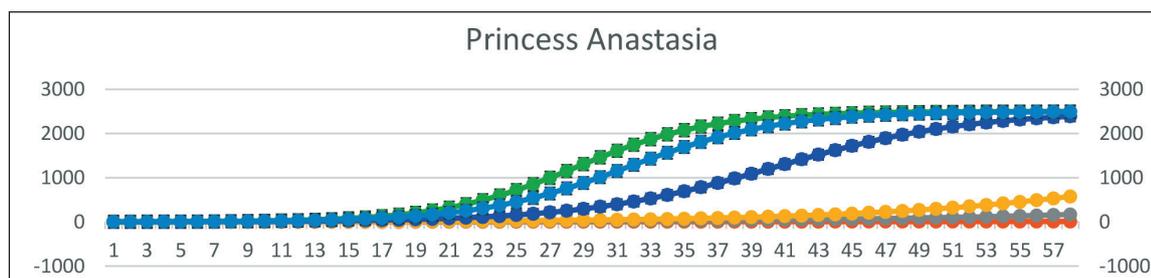
**Соответствие коэффициентов пропорциональности характеристики среды общества**

Диапазон изменений	Характеристика распределения информации в обществе. Характеристика стратегии поведения на рынке
$K \in [0-0,4]$	Информация о новом круизе распространяется медленно, без особых скачков в продвижении информации. Общество не очень заинтересовано в круизах или паромных перевозках
$K \in [0,4-0,6]$	Информация распространяется равномерно, также без особых скачков. За равные промежутки времени одинаковое количество новых круизных пакетов. В социуме имеется большое количество людей, заинтересованных в круизном продукте
$K \in [0,6-1]$	Круиз вызовет большую заинтересованность. Билеты на круиз будут проданы достаточно быстро. В обществе многие люди заинтересованы в круизном продукте

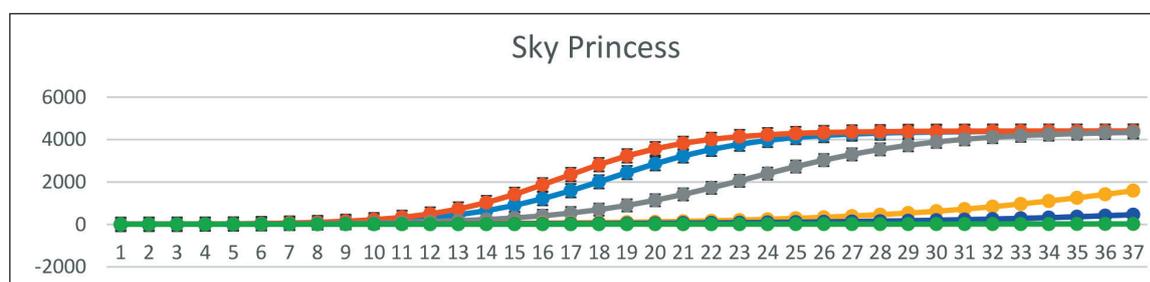
Получены следующие результаты моделирования:

1. Для паромного судна Princess Anastasia (рис. 4, а).
2. Для круизного судна Sky Princess (рис. 4, б)
3. Для круизного судна Viking Jupiter (рис. 4, в).

а)



б)



в)

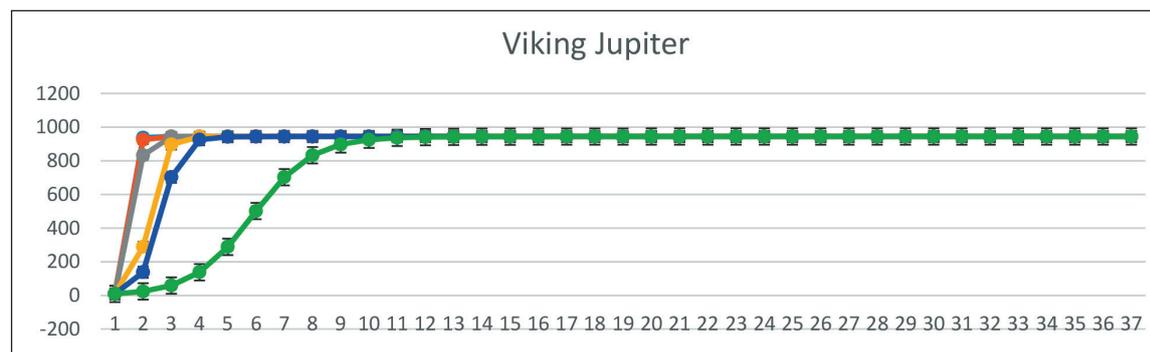


Рис. 4. Моделирование ситуации выбора паромного судна пассажирами и его заполнения при различных коэффициентах пропорциональности и оценки внешней среды:  
 а — круизное судно Princess Anastasia; б — круизное судно Sky Princess;  
 в — круизное судно Viking Jupiter

Рассмотрим, например, ситуацию, рассмотренную в официальном источнике [23], возникшую компании Norwegian Cruise Line, отменившей все круизные туры. Для туристов компанией предложены следующие варианты:

1. Сертификат Future Cruise Credit в размере 125 % возмещения стоимости проезда в виде будущего круиза. Кредит, который может быть применен к любому будущему круизу до 31 декабря 2022 г.

2. Туристам, не желающим использовать сертификат Future Cruise Credit, гарантирован возврат средств 100 % оплаченного тарифа в течение 90 дней после заполнения формы соответствующего запроса.

Подобные ситуации с отменой круизов можно достаточно оперативно включить в принятие решений по корректировке загрузки морского пассажирского порта. Если процесс выбора круиза представить в виде дискретной функции [24], выбрать отдельные дискретные значения, т. е. произвести фиксацию заполнения круизного судна в отдельные моменты времени, то можно определить скорость данного процесса, его динамику (рис. 5).

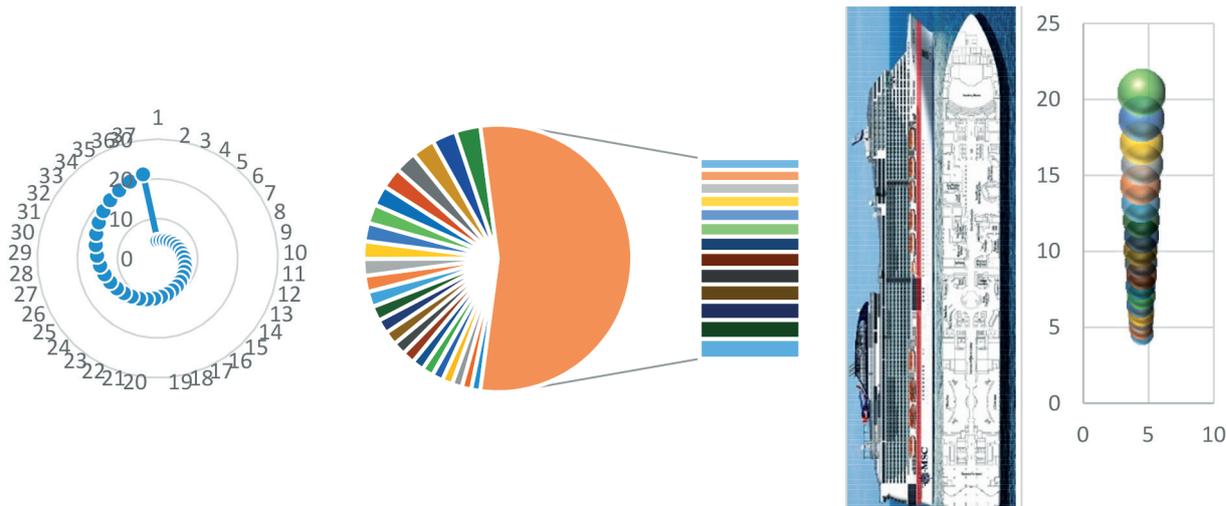


Рис. 5. Определение на основе логистической функции скорости заполнения круизного судна для круизного судна Sky Princess

### Обсуждение (Discussion)

Необходимо отметить междисциплинарность возникшей проблемы, для решения которой потребовалось знание математических моделей и методов, особенностей рынка морских паромных перевозок, а также необходимость оценки инфраструктуры морского пассажирского порта, оценки мобильности и заинтересованности потенциальных пассажиров. С практической точки зрения имеет место большая сложность оценки влияния внешней среды, достаточно сложно спрогнозировать поведение общества и оценить выбор того или иного маршрута. Для привлечения пассажиров паромные и круизные компании используют различные маркетинговые и информационные приемы, которые относятся к экономическим задачам, однако данные модели не позволяют оценить процесс в динамике, а также описать и представить физическую сторону процесса. Даже анализируя опросные листы, к примеру, после круиза достаточно сложно спрогнозировать и определить, что данный маршрут будет иметь повторную привлекательность для пассажира. Поэтому необходимо переходить к области динамических моделей и функционального анализа процессов.

На основании проведенного исследования и моделирования выбранных круизов, можно сделать следующие выводы:

1. Круиз на судне Viking Jupite пользуется большим спросом. Круизный маршрут состоится, и при повторном выходе на рынок будет также пользоваться популярностью у пассажиров.

2. Ввиду большого количества пассажиров, желающих совершить круизные путешествия на судах Sky Princess и Princess Anastasia, необходимые документы заполняются в течение более продолжительного времени. При этом возникает вероятность негативного влияния внешней среды, при которой заполнение круизных судов будет неполным. В данном случае возникает вопрос об экономической эффективности маршрута.

3. Аналитические исследования производилось при одинаковых условиях, переменных и факторах влияния внешней среды.

Таким образом, актуальной в настоящее время является задача разработки новых моделей, которые необходимо использовать как независимо, так и в процессе принятия решений. Поэтому использование логистической функции является одним из возможных путей решения данной проблемы.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При прогнозировании и выводе нового круизного маршрута можно определить степень популярности у маршрута.

2. Поскольку результат представляет собой функцию времени, можно выполнить мониторинг и определить, в какой момент времени сколько потенциальных человек забронировало маршрут.

3. На основании логистической функции распределения информации в среде можно выбирать стратегии продвижения круизного продукта на рынке.

4. Можно выполнить моделирование различных состояний экономической системы региона.

5. Появляется возможность определения активности населения и его заинтересованности в новых круизных и паромных маршрутах.

6. На основании планового расписания судозаходов, можно внести корректировку с условием возможной отмены круиза.

7. Предложенным методом можно оценить эффективность логистических сервисов в сфере круизных и паромных перевозок.

8. Использование данного метода позволяет оценить влияние внешней среды на систему морских пассажирских портов и паромных компаний. На основе рассмотренной модели можно вносить корректировки в систему принятия решений, достигая при этом большей достоверности. Представленная модель справедлива для микро-, макро- и мезоуровней транспортного планирования, что подтверждено полученными результатами моделирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майоров Н. Н.* Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе Балтийского моря / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.

2. Baltic LINes: Shipping in the Baltic Sea – Past, present and future developments relevant for Maritime Spatial Planning. Project Report I. — 2016. — 35 p.

3. Cruise Europe. Port Handbook. — 2018 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cruiseeurope.com/> (дата обращения: 15.03.2020).

4. *Krile S.* Optimization Approach in Multi-stop Routing of Small Islands / S. Krile // *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*. — 2018. — Nr. 54 (126). — Pp. 9–16. DOI: 10.17402/28.

5. *Mascaraque-Ramírez C.* Management of a Ferry Construction Project Using a Production-Oriented Design Methodology / C. Mascaraque-Ramírez, L. Para-González, P. Marco-Jornet // *Journal of Ship Production and Design*. — 2019. — Vol. 35. — Is. 4. — Pp. 309–316.

6. 2020 Cruise Industry 101 [Электронный ресурс]. — Режим доступа <https://www.cruiseindustrynews.com/pdf> (дата обращения: 15.03.2020).

7. Passengers transported to/from main ports - Croatia - quarterly data [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=mar\\_pa\\_qm\\_hr&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=mar_pa_qm_hr&lang=en) (дата обращения: 01.04.2020).

8. MSC Cruises объявила о планах строительства нового круизного терминала в порту Майами [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cruiseluxe.ru/news/12135/> (дата обращения: 15.04.2020).

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

10. Passenger Port of Saint-Petersburg “Marine Façade” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portspb.ru/> (дата обращения: 16.04.2020).

11. *Maivorov N. N.* Improvement of the quality of the sea passenger terminal based on methods of forecasting / N. N. Maivorov, V. A. Fetisov // *NAŠE MORE: znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo*. — 2018. — Vol. 65. — No. 3. — Pp. 135–140. DOI: 10.17818/NM/2018/3.1.

12. *Wheelwright S.* Forecasting: methods and applications / S. Wheelwright, S. Makridakis, R. J. Hyndman. — John Wiley & Sons, 1998. — 656 p.

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

14. 11 круизных трендов 2019 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа <https://inflatcruises.com/ru/news/view/news-cruise-trends-2019> (дата обращения: 10.02.2020).

15. Сольнищев Р. И. Модели и методы принятия проектных решений / Р. И. Сольнищев. — СПб.: ЛЭТИ, 2010. — 68 с.
16. Helbing D. Social force model for pedestrian dynamics / D. Helbing, P. Molnar // *Physical review E*. — 1995. — Vol. 51. — Is. 5. — Pp. 4282–4286. DOI:10.1103/PhysRevE.51.4282.
17. Ronald N. Pedestrian modelling: A comparative study using agent-based cellular automata / N. Ronald, M. Kirley // *International Conference on Computational Science*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. — С. 248–255. DOI: 10.1007/11758532\_35.
18. Vassalos D. A mesoscopic model for passenger evacuation in a virtual ship-sea environment and performance-based evaluation / D. Vassalos, H. Kim, G. Christiansen, J. Majumder // *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. — Springer Netherlands, 2002. — Pp. 369–391.
19. Майоров Н. Н. Планирование работы морского пассажирского терминала на основе исследования интенсивностей заходов круизных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2019. — № 3. — С. 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.
20. Song D. W. Maritime logistics: a complete guide to effective shipping and port management / D. W. Song, P. Panayides. — Kogan Page, 2012. — 344 p.
21. Mulder J. Methods for strategic liner shipping network design / J. Mulder, R. Dekker // *European Journal of Operational Research*. — 2014. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 367–377. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.041.
22. Rzadkowski G. A new approach to the logistic function with some applications / G. Rzadkowski, I. Głazewska, K. Sawińska // *Foundations of Management*. — 2014. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 57–70.
23. News of Norwegian Cruise Line [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cruiseluxe.ru/news/12261/> (дата обращения: 15.04.2020).
24. Майоров Н. Н. Моделирование состояний морского терминала на основе дискретизации процессов / Н. Н. Майоров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-20-29.

## REFERENCES

1. Maiorov, Nikolai N. “Forecasting of the evolution of sea passenger terminals and network of ferry lines in the region of the Baltic sea”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.
2. *Baltic LINES: Shipping in the Baltic Sea – Past, present and future developments relevant for Maritime Spatial Planning*. Project Report I. 2016.
3. *Cruise Europe. Port Handbook*. 2018. Web. 15 Mar. 2020 <<http://www.cruiseeurope.com/>>.
4. Krile, Srećko. “Optimization approach in multi-stop routing of small islands.” *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* 54(126) (2018): 9–16. DOI: 10.17402/28.
5. Mascaraque-Ramírez, Carlos, Lorena Para-González, and Paloma Marco-Jornet. “Management of a Ferry Construction Project Using a Production-Oriented Design Methodology.” *Journal of Ship Production and Design* 35.4 (2019): 309–316.
6. 2020 Cruise Industry 101. Web. 15 Mar. 2020 <<https://www.cruiseindustrynews.com/pdf/>>.
7. Passengers transported to/from main ports - Croatia - quarterly data. Web. 1 Apr. 2020 <[http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=mar\\_pa\\_qm\\_hr&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=mar_pa_qm_hr&lang=en)>.
8. MSC Cruises ob»yavila o planakh stroitel'stva novogo kruiznogo terminala v portu Maiami. Web. 15 Apr. 2020 <<http://www.cruiseluxe.ru/news/12135/>>.
9. Barron, Paul, and Ana Bartolome Greenwood. “Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market.” *Tourism in Marine Environments* 3.2 (2006): 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.
10. Passenger Port of Saint-Petersburg “Marine Façade”. Web. 16 Apr. 2020 <<https://www.portspb.ru/>>.
11. Maiorov, N. N., and V. A. Fetisov. “Improvement of the quality of the sea passenger terminal based on methods of forecasting.” *NAŠE MORE: znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo* 65.3 (2018): 135–140. DOI: 10.17818/NM/2018/3.1.
12. Wheelwright, Steven, Spyros Makridakis, and Rob J. Hyndman. *Forecasting: methods and applications*. John Wiley & Sons, 1998.
13. Agarwal, Richa, and Özlem Ergun. “Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping.” *Transportation Science* 42.2 (2008): 175–196. DOI: 10.1287/trsc.1070.0205.

14. 11 cruise trends of 2019. Web. 10 Feb. 2020 <<https://inflatcruises.com/ru/news/view/news-cruise-trends-2019>>.
15. Sol'nitsev, R. I. *Modeli i metody prinyatiya proektnykh reshenii*. SPb.: LETI, 2010.
16. Helbing, Dirk, and Peter Molnar. "Social force model for pedestrian dynamics." *Physical review E* 51.5 (1995): 4282–4286. DOI:10.1103/PhysRevE.51.4282.
17. Ronald, Nicole, and Michael Kirley. "Pedestrian modelling: A comparative study using agent-based cellular automata." *International Conference on Computational Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. 248–255. DOI: 10.1007/11758532\_35.
18. Vassalos, D., H. Kim, G. Christiansen, and J. Majumder. "A mesoscopic model for passenger evacuation in a virtual ship-sea environment and performance-based evaluation." *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer Netherlands, 2002. Pp. 369–391.
19. Maiorov, Nikolai Nikolaevich, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Planning work of maritime passenger terminals in terms of intensity of cruise ships calls." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2019): 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.
20. Song, Dong-Wook, and Photis Panayides. *Maritime logistics: a complete guide to effective shipping and port management*. Kogan Page, 2012.
21. Mulder, Judith, and Rommert Dekker. "Methods for strategic liner shipping network design." *European Journal of Operational Research* 235.2 (2014): 367–377. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.041.
22. Rzakowski, Grzegorz, Iwona Głażewska, and Katarzyna Sawińska. "A new approach to the logistic function with some applications." *Foundations of Management* 6.1 (2014): 57–70.
23. News of Norwegian Cruise Line. Web. 15 Apr. 2020 <<http://www.cruiseluxe.ru/news/12261/>>.
24. Maiorov, Nikolai N. "Simulation of states of the marine terminal on the basis of discretization of processes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-20-29.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

**Фетисов Владимир Андреевич** — доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» 190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А e-mail: [Fetl@aanet.ru](mailto:Fetl@aanet.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

**Fetisov, Vladimir A.** — Dr. of Technical Sciences, professor Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation 67/A Bol'shaya Morskaya Str., St. Petersburg, 190000, Russian Federation e-mail: [Fetl@aanet.ru](mailto:Fetl@aanet.ru)

Статья поступила в редакцию 12 июня 2020 г.  
 Received: June 12, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653

## RENOVATION OF WATER FILLING SYSTEMS FOR THE CHAMBERS OF SHIPPING LOCKS № 1–6 OF THE VOLGA-BALTIC WATERWAY

**P. A. Garibin<sup>1</sup>, A. V. Bogatov<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — FBI «Administration of the Volga-Baltic basin of inland waterways», St. Petersburg, Russian Federation

*The development of solutions to increase the capacity of locks № 1–6 of the Federal budget institution «Administration of the Volga-Baltic basin of inland waterways» by changing the parameters of the operated locks corresponds to the priorities and goals of the development of inland water transport of the Russian Federation. The actual problem of increasing the capacity of navigable locks on the Volga-Baltic waterway section of the mouth of the Vytegra River - White Lake, is considered in the paper. Proposals for renovation of shipping locks chambers for simultaneous passage of two large-tonnage vessels with a cargo capacity of about 5000 tons are given. Based on the analysis of the developed options for increasing throughput, the comparative effectiveness of possible solutions to increase the useful dimensions of the chambers without disrupting the existing natural and technical system is evaluated. The analysis of the currently operated systems for filling the chambers of the Volga-Kama basin locks with water and the dimensions of the chambers used in them for passage of large-tonnage design vessels is carried out. To intensify cargo transportation, it is proposed to dispose of non-gallery head systems for filling the lock chambers with water and use simple power distribution systems with side water supply to the middle of the chamber. The main problems of implementing changes in the type of system for filling the lock chambers without decommissioning the structure are identified. It is proposed to supply water to the chambers via large-diameter pipelines. At the same time, water intake will be made from approach channels outside the location of the upper head, which will also reduce the time of ship passage. Depending on the type of chamber – dock or split-bottom, water is supplied directly to the chamber in a concentrated way with a width distribution, or distributed over the area using longitudinal distribution galleries.*

*Keywords: ship pass, large-tonnage vessels, chamber dimensions, navigable locks, system of filling the chamber with water.*

### For citation:

Garibin, Pavel A., and Aleksandr V. Bogatov. "Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1-6 of the Volga-Baltic waterway." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.

УДК 656.628

## РЕНОВАЦИЯ СИСТЕМ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОЙ КАМЕР СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ № 1–6 ВОЛГО-БАЛТИЙСКОГО ВОДНОГО ПУТИ

**П. А. Гарибин<sup>1</sup>, А. В. Богатов<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — ФБУ «Администрация «Волго-Балт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Отмечается, что разработка решений по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 Федерального бюджетного учреждения «Администрация Волго-Балтийского бассейна внутренних водных путей» за счет изменения параметров эксплуатируемых шлюзов соответствует приоритетам и целям развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации. В работе рассмотрена актуальная проблема повышения пропускной способности судоходных шлюзов на участке Волго-Балтийского водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро. Сформулированы предложения по реновации камер судоходных шлюзов для пропуска одновременно двух крупнотоннажных судов грузоподъемностью около 5000 т. На основании анализа разрабатываемых вариантов повышения пропускной способности выполнена оценка сравнительной эффективности возможных решений по увеличению полезных габаритов камер без нарушения*

существующей природно-технической системы. Проведен анализ эксплуатируемых в настоящее время систем наполнения водой камер шлюзов Волжско-Камского бассейна и используемых в них габаритов камер при пропуске расчетных судов большой грузоподъемности. Для интенсификации грузовых перевозок предложено утилизировать безгалерейные головные системы наполнения камер шлюзов водой и использовать простые распределительные системы питания с боковым подводом воды в середину камеры. Обозначены основные проблемы по реализации изменения типа системы наполнения камер шлюзов без вывода сооружения из эксплуатации. Предлагается осуществлять подвод воды к камерам по трубопроводам большого диаметра. При этом забор воды будет производиться из подходящих каналов вне расположения верхней головы, что позволит также сократить время судопропуска с учетом того, что в зависимости от типа камеры: доковая или с разрезным днищем, вода подается непосредственно в камеру сосредоточенно с распределением по ширине или распределяется по площади с помощью продольных распределительных галерей.

*Ключевые слова:* судопропуск, крупнотоннажные суда, габариты камеры, судходные шлюзы, система наполнения камеры водой.

**Для цитирования:**

Гарибин П. А. Реновация систем наполнения водой камер судходных шлюзов № 1-6 Волго-Балтийского водного пути / П. А. Гарибин, А. В. Богатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.

### **Введение (Introduction)**

Участок северного склона Волго-Балтийского водного пути (ВБВП) [1], [2], образованный лестницей шлюзов № 1–6, является одной из наиболее загруженных транспортом подсистем Единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации. На отрезке водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро в наиболее интенсивные периоды навигации наблюдается скопление до 180 судов, при этом время прохождения участка Анненский мост – Онежское озеро составляет 34 ч, не считая продолжительности стоянки судов в Белом Озере, составляющей от двух до пяти суток. При этом среднее нормативное время прохода данного участка составляет 17 ч [3]. Недостаточная пропускная способность шлюзованных участков водного пути приводит в настоящее время как к снижению конкурентной способности речных перевозок, так и к повышению риска возникновения аварийных ситуаций. Проведенные многочисленные исследования показали, что с точки зрения совершенствования управленческой составляющей и оптимизации процессов шлюзования возможности повышения пропускной способности практически исчерпаны и для решения проблемы необходима всесторонняя модернизация судопропускных гидросооружений.

Разработка предложений по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» за счет изменения параметров эксплуатируемых судопропускных сооружений соответствует приоритетам и целям развития внутреннего водного транспорта РФ<sup>1, 2</sup>. Мероприятия по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 ВБВП основаны на анализе структуры флота с учетом обновления парка судов, обеспечивающих в первую очередь за счет роста тоннажа повышение безопасности судоходства, энергоэффективность и экологичность перевозки грузов по водным путям [4]. Одним из важнейших этапов проектирования судходных шлюзов является определение полезных и необходимых для безопасного размещения расчетного судна габаритов камеры и выбор типа системы питания (наполнение – опорожнение).

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Судходные шлюзы № 1–6 Северного склона Волго-Балтийского канала 1964 г. постройки (табл. 1) являются средненапорными, одноканальными, однокамерными с головной системой питания. Наполнение камер водой — безгалерейное с использованием плоских подъемно-опускных ворот верхней головы. Опорожнение происходит через короткие обходные водопроводные галереи в нижней голове.

<sup>1</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р).

<sup>2</sup> Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р).

Таблица 1

**Характеристики судоходных шлюзов  
Вытегорского района гидросооружений и судоходства**

Шлюз	Конструкция, полезные габариты камеры*, м	Расчетный напор, м	Длина камеры гашения и успокоительного участка, м	Полная длина камеры, м	Объем сливной призмы, тыс. м <sup>3</sup>
	$l_{c,ef} \times b_{c,ef} \times h_l$	$H_d$	$l_{кг} + l_{уу}$	$l_c$	$W_l$
1. Вытегорский гидроузел (шлюз № 1)	с разрезным днищем 268,93 × 17,86 × 4,10	13,10	14,0+6,0	288,93	67,6/62,0
2. Белоусовский гидроузел (шлюз № 2)	с разрезным днищем 268,02 × 17,86 × 4,40	12,75	14,0+6,0	288,02	65,6/62,0
3. Новинкинский гидроузел (шлюз № 3)	с разрезным днищем 268,11 × 17,86 × 3,68	12,90	14,0+6,0	288,11	66,4/62,0
4. Новинкинский гидроузел (шлюз № 4)	доковая 267,25 × 17,95 × 4,02	12,00	14,0 + 6,0	287,25	61,9/62,0
5. Десятинский гидроузел (шлюз № 5)	доковая 267,23 × 17,97 × 4,00	12,75	14,0 + 6,0	287,23	65,8/62,0
6. Десятинский гидроузел (шлюз № 6)	с разрезным днищем 263,60 × 17,82 × 4,08	16,70	18,5 + 6,0	288,10	85,7/99,0

\* <http://www.morflot.ru/files/files/перечень%20СГТС%28%29.pdf>.

Актуальность рассматриваемого в предлагаемом исследовании вопроса существовала практически с того момента, когда в 1964 г. завершились строительные работы по реконструкции ВБВП под расчетное судно «Волго-Балт» грузоподъемностью 2700 т. За прошедший 56-летний период эксплуатации на ВБВП изменился состав транспортного флота и габариты максимальных судов (табл. 2). Установлено, что за период 1997–2020 гг. количество судов грузоподъемностью 5000–5500 т составляет в среднем 40 % от транзитного флота и их удельный вес увеличивается.

Таблица 2

**Габаритные размерения эксплуатируемых судов**

Тип (проект)	Длина, м	Ширина, м	Дедвейт, т
1. Волго-Нефть (пр. 1577)	132,6	16,9	5011
2. Волга-Флот (пр. 05074Т)	138,7	16,7	5212
3. Волжский (пр. 05074)	138,4/107,4	16,7	5130/3888
4. Танкер (пр. RST25)	139,9	16,6	5132
5. Танкер (пр. RST27)	140,85	16,7	5378
6. Сухогруз (пр. RSD44)	139,99	16,8	5439
7. Сухогруз (пр. RSD49)	136,95	16,5	4518
8. Балтийский (пр. 781)	96,0	13,0	2122
9. Беломорский (пр. Фин.1000/800)	79,8	11,3	1071,6
10. Окский (пр. 559Б)	85,04	15,03	1760
11. Морской (пр. 1814двт)	90,3	12,3	1804
12. Короленко (пр. 646)	65,2	12,0	170
13. Мег (пр. 10523, 0121)	81,3	11,6	2300
14. Шестая пятилетка (пр. 576, 576А)	93,8	13,22	2104
15. СТ-700 (пр. 2760)	67,06	8,37	722,6
16. СТК (пр. 326)	81,9	11,8	2187
17. Ладога (пр. 787)	82,5	11,4	2075
18. Волго-Балт (пр. 2-95/AR)	113,9	13,0	3474
19. Волго-Дон (пр. 1565)	105,85	16,7	4000

Однако, как видно из данных, приведенных в табл. 1 и 2, совместное шлюзование крупногабаритных судов некоторых типов (№ 1–7) невозможно ввиду недостаточной полезной длины

камеры существующих шлюзов. Увеличение времени судопропуска через шлюзы вызывает значительные простои флота и требует изыскания новых резервов, способных увеличить пропускную способность системы и оптимизировать непроизводительные затраты флота. С целью обоснования необходимости внесения изменений в конструкцию судоходных шлюзов следует принимать во внимание не только структуру флота, обеспечивающего прохождение судов через судоходные шлюзы, но и структуру перевозимых грузов, так как нефтеналивные и сухогрузные суда имеют наибольшую длину.

Основу транзитного грузопотока по ВБВП составляют экспортные грузы, в основном наливные, в направлении на Балтику, большая часть которых перевозится судами грузоподъемностью около 5000 т (см. табл. 1 и 2). Среднегодовое, за период 1996–2017 гг., количество прохода судов грузоподъемностью 5000 т в створе шлюза № 1 составляет 2120 ед. Среднее время оборотного рейса для танкерного флота, работающего на ВБВП, составляет 10–12 дней. Таким образом, с учетом ранее изложенного, количество судов грузоподъемностью 5000 т, осуществляющих перевозки по ВБВП, в среднем составляет  $2120 / (200 / (10 \cdot 2)) = 53$  ед., где 200 дней — средняя плановая продолжительность навигационного периода.

С учетом тенденции роста тоннажа и обновления флота, обеспечивающих повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок водным транспортом основной акцент в анализе статистических данных эксплуатационных показателей по судопропуску сделан на оценке количества пропущенных судов грузоподъемностью 5000 т (далее по тексту — г/п 5000 т) и количестве их одиночных шлюзований. Установлено, что совместное шлюзование двух крупногабаритных судов позволит существенно увеличить пропускную способность шлюзов. При этом следует отметить, что все построенные крупногабаритные шлюзы Единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации, рассчитываемые на пропуск (по длине) именно двух судов грузоподъемностью около 5000 т типа «Волго-Дон», имеют полезную длину камеры  $l_{c,ef} = 290$  м, что соответствовало требованиям нормативных документов [4].

Анализируя основные факторы, оказывающие негативное влияние на эффективность работы флота, видно, что главным из них является время судопропуска, которое может быть разложено на две составляющие:

- *машинную составляющую*, зависящую от времени работы механизмов по открытию и закрытию ворот, наполнению и опорожнению камеры шлюза;
- *движенческую составляющую*, зависящую от времени входа и выхода судов из камеры.

Для шлюзов ВБВП машинная составляющая занимает примерно 31–36 % времени судопропуска (рис. 1) и, по сути, без изменения системы питания водой камеры шлюза изменяться не может, поскольку определяется скоростью маневрирования воротами и затворами, а также величиной допустимой гидродинамической силы, действующей на шлюзующиеся суда.

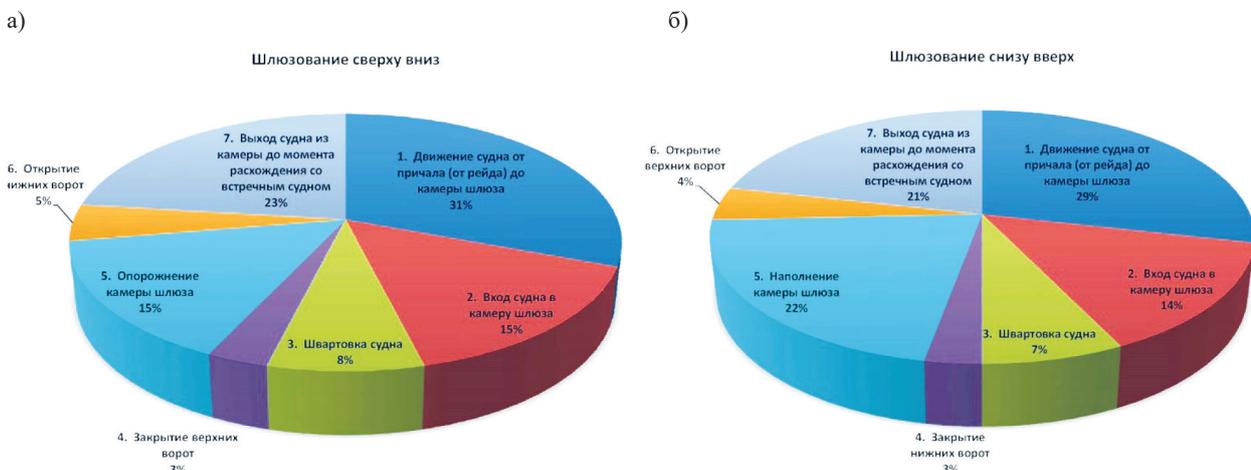


Рис. 1. Диаграммы составляющих времени судопропуска через шлюзы № 1–6 Волго-Балтийского водного пути: а — шлюзование сверху вниз; б — шлюзование снизу вверх

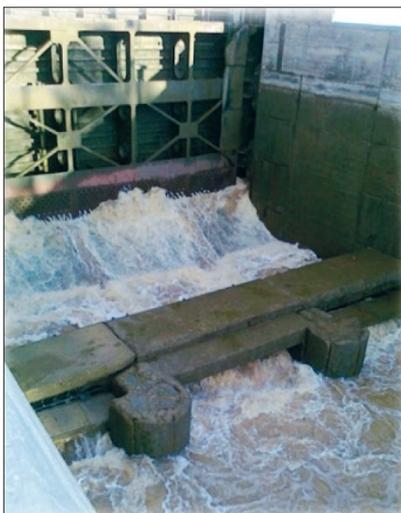
Применительно к северному склону ВБВП для шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» имеем:  $h_l = 4,2$  м;  $l_{c,ef} = 270$  м;  $H_d = 13,0 - 17,5$  м (см. табл. 1). В процессе эксплуатации существующих шлюзов ВБВП с головной системой наполнения (рис. 2) было установлено [2], что в гидравлическом отношении они запроектированы нераационально, поскольку не обеспечивают безопасных условий стоянки шлюзуемых судов в камере, в особенности крупнотоннажных.

По данным натурных исследований, продольная составляющая гидродинамической силы, действующая при наполнении камер на суда типа «Волго-Дон», в 2,0–3,0 раза превышает нормативное значение силы  $P_{пр}$ , кН [5]:

$$P_{пр} = 1,4\sqrt[3]{W} \quad (0,3\sqrt[3]{W}), \quad (1)$$

где  $W$  — водоизмещение в полном грузу расчетного одиночного судна, кН (тс).

а)



б)

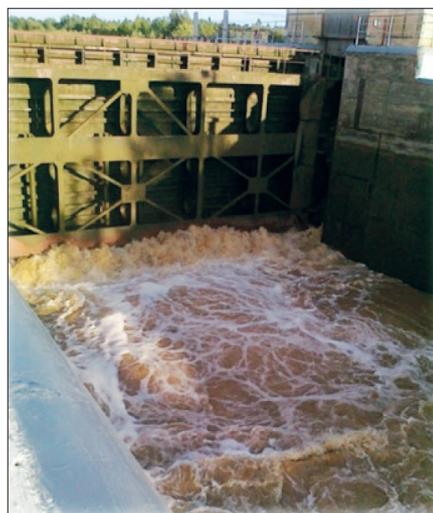


Рис. 2. Головная безгалерейная система наполнения камер шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского водного пути:

а — начальный момент наполнения, истечение из-под щита;  
б — наполнение камеры, истечение под уровень воды в камере

Это обусловлено тем, что в качестве системы наполнения водой камер шлюзов ВБВП реализован вариант безгалерейного наполнения камеры с использованием подъемно-опускных плоских ворот и устройством гасителей, а в качестве расчетного судна рассматривалось судно типа «Волго-Балт» грузоподъемностью 3000 т. Теоретические исследования по определению параметров водопропускных отверстий, образуемых стенкой падения и экраном, а также экраном и днищем головы, расстояния до балочной решетки и других размеров элементов системы наполнения не проводились.

На основании результатов лабораторных исследований была разработана приближенная методика определения размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер шлюзов водой. При этом выбор типа головной системы питания был проведен неоднозначно, так как не во всех случаях выполнялись рекомендуемые действующими при проектировании и актуализированными в настоящее время нормативными документами<sup>1</sup> условия:

$$l_{c,ef} H_d < 2000 \quad \text{и} \quad \frac{H_d}{h_l} < 2. \quad (2)$$

Следует отметить, что использование головных безгалерейных систем наполнения требует наличия камер гашения энергии потока воды и успокоительного участка определенной дли-

<sup>1</sup> Свод правил СП 101.13330.2012 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения». Актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87. М., 2012. 69 с.

ны, которые нельзя использовать для стоянки судов. Зона успокоительного участка у шлюзов № 1–6 ВБВП составляет 6,0 м, длина камеры гашения — 14,0–18,5 м (см. табл. 2).

### Результаты (Results)

В процессе выполнения работы [3] были выполнены расчетные исследования оптимизации судопотока за счет увеличения полезной длины камер существующих шлюзов. Выполнено сравнение целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов в сопоставлении с вариантом строительства вторых ниток шлюзов, определены основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные показатели увеличения полезной длины камеры шлюза без вывода сооружения из эксплуатации. Рекомендуемой областью применения являются все однокамерные судоходные шлюзы Единой глубоководной системы Европейской части РФ.

По расчетам судопропускной способности одного шлюза при удлиненной камере [4] (возможности постановки в кильватер двух судов г/п 5000 т), шлюз сможет пропустить судов г/п 5000 т на 53 % больше, чем с существующей камерой. При этом в среднем за навигацию происходит 20–25 % одиночных шлюзований. Увеличение полезной длины камер шлюзов способствует возможности более рациональной расстановки в камере прочих грузовых и служебно-вспомогательных судов.

По экспертной оценке, общее повышение пропускной способности шлюзов ВБВП № 1–6 за счет увеличения полезной длины их камер (рис. 3) может составить до 10–15 % и достичь примерно судопропускной способности шлюза Шекснинского гидроузла № 8 на каждом шлюзе. Реализация данного варианта позволит увеличить пропускную способность по тоннажу флота в среднем на 6 млн т по отношению к максимальной фактической величине за наиболее напряженный период 2008–2014 гг.

Практически увеличение (рис. 3, а) полезной длины камеры шлюза возможно осуществить путем демонтажа старых и пристройки новых нижних голов с перестановкой на них механического оборудования с существующих или с установкой нового [3]. Однако для реализации данного варианта в межнавигационный период необходимо выполнить значительный объем строительно-монтажных работ, включая реконструкцию пульта управления и перенос автомобильного переезда через шлюз. За счет увеличения сливной призмы несколько увеличивается время наполнения и опорожнения камеры шлюза водой. Варианты реновации по схемам, представленным на рис. 3, б и г, являются конструктивно наименее целесообразными из всех возможных вариантов.

Согласно данным источника [4], альтернативным вариантом увеличения полезной длины камеры является переход от головной системы питания водой камер существующих шлюзов к простой распределительной, с боковой подачей воды (рис. 3, д). При этом отпадает необходимость наличия камеры гашения и успокоительного участка, протяженность которых увеличивает длину камеры по сравнению с полезной длиной для шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» на 20–25 м. Увеличение  $l_{c,ef}^* = l_{c,ef} + \Delta_{л}$  ( $l_{c,ef}^*$  — новая длина см. рис 3, д) произойдет за счет включения в нее участка стоянки судна на успокоительном участке и длины демонтируемой камеры гашения. При данной схеме реновации вся инфраструктура шлюза: механическое и электрическое оборудование, пульт управления, мостовой переезд, сохраняется без изменения. Основные затраты приходятся на строительство бокового подвода воды, который может быть построен превентивно, не оказывая влияния на судопропуск. Следует отметить, что реновация шлюза по схеме, приведенной на рис. 3, д, позволяет сохранить в неприкосновенности образовавшуюся после строительства шлюзов природно-техническую систему, формирование которой и все геоэкологические изменения происходили на протяжении последних 56 лет. Объем сливной призмы, расходуемой на шлюзование, останется неизменным, а время наполнения камеры водой может быть сокращено на 20–30 % за счет использования более совершенной распределительной системы питания.

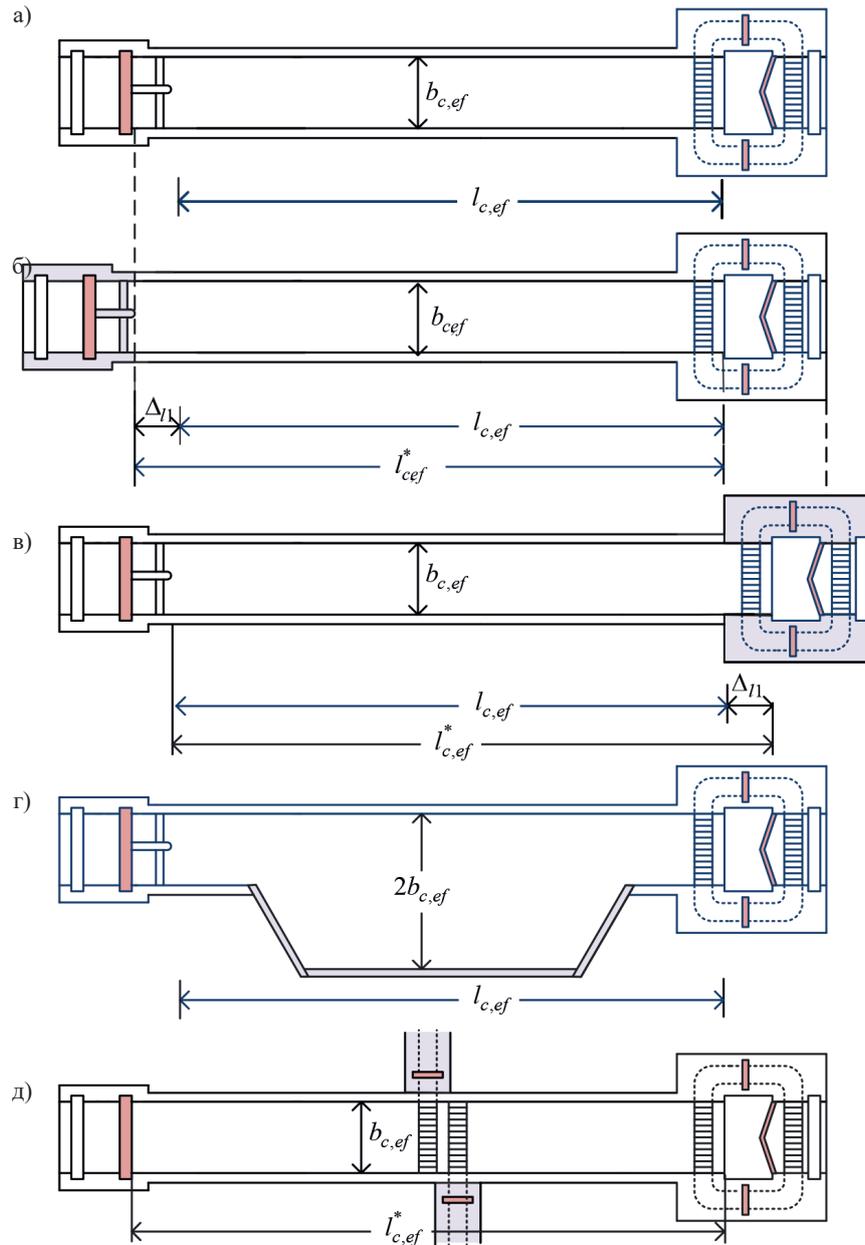


Рис. 3. Принципиальные схемы увеличения полезной длины (ширины) камеры эксплуатируемого шлюза для пропуска двух крупнотоннажных судов г/п 5000–5500 т одновременно:  
 а — эксплуатируемый типовой шлюз № 1–6 ФБУ «Администрация «Волго-Балт» с безгалерейной головной системой наполнения и полезными габаритами  $l_{c,ef}$ ,  $b_{c,ef}$ ;  
 б — вариант увеличения полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса верхней головы в верхний бьеф на величину  $\Delta l_1$ ;  
 в — вариант увеличения полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса нижней головы в нижний бьеф на величину  $\Delta l_1$ ;  
 г — вариант увеличения полезной ширины камеры для шлюзования крупнотоннажных судов в два пьжа без изменения типа системы питания;  
 д — вариант увеличения полезной длины камеры за счет изменения типа системы питания

Рассмотрим более подробно определение системы наполнения водой камеры реконструируемого шлюза. Для судна массой  $M$ , удерживаемого в камере упругими связями при продольном перемещении  $x$ , можно написать следующее уравнение движения:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + cx = P(t), \quad (3)$$

где  $x$  — перемещение судна вдоль оси шлюза (по оси  $x$ );  $\alpha$  — коэффициент сопротивления воды;  $c$  — коэффициент жесткости связей;  $P(t)$  — продольная гидродинамическая сила.

Анализ уравнения движения судна в камере шлюза при ее наполнении показывает, что определяющим воздействием является волновая составляющая продольной гидродинамической силы [6], которая прямо пропорционально зависит от продольного уклона воды  $i$ .

Продольная (вдоль оси камеры) составляющая гидродинамического усилия  $P_{пр}$ , действующего на судно, принимается пропорциональной уклону водной поверхности в камере  $i$  и водоизмещению судна  $W_s$ :

$$P_{пр}^{max} = iW_s. \quad (4)$$

Продольный уклон водной  $i$  поверхности может быть определен по зависимости

$$i = \frac{\left(\frac{dQ}{dt}\right)_0 a_c}{g(\omega_c - \omega_s)}, \quad (5)$$

где  $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_0$  — приращение расхода воды поступающей в камеру в начале процесса наполнения;  $a_c$  — коэффициент, характеризующий качество системы питания и определяемый экспериментом (значение  $a_c$  может меняться в широких пределах: от единицы для головных систем питания до 0,05 для наиболее совершенных эквивалентных систем);  $\omega_s$  — площадь смоченного миделевого сечения судна или состава судов;  $\omega_c$  — площадь живого поперечного сечения камеры в момент начала процесса наполнения;  $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  — ускорение силы тяжести.

Таким образом, зависимость (4) для любого типа системы питания может быть представлена в виде

$$P_{пр}^{max} = \frac{W_s \left(\frac{dQ}{dt}\right)_0 a_c}{g(\omega_c - \omega_s)}. \quad (6)$$

Условием выбора типа системы питания служит неравенство

$$P_{пр}^{max} < P_{ш}^{доп}, \quad (7)$$

где  $P_{ш}^{доп}$  — допустимое натяжение в зачаливающих судно тросах, т.

В настоящее время нормативной является зависимость, полученная профессором А. В. Михайловым [7] на основе натурных исследований:

$$\frac{P_{ш}^{доп}}{W_s} = \frac{1}{n_{доп}}, \quad (8)$$

где  $n_{доп} = 3,3W_s^{2/3}$ .

Обобщенная методика выбора типа системы питания, разработанная на основе комплексных лабораторных исследований, была предложена профессором Б. Д. Качановским в монографии «Гидравлика судоходных шлюзов» (М.; Л.: Речиздат, 1951). В соответствии с приведенной в этом издании методикой уравнение (8), после ряда преобразований, можно представить в следующем виде:

$$\frac{P_{пр}^{max}}{W_s} = \frac{1}{n_{max}} = A_0 A_c^{max}; \quad (9)$$

$$\frac{P_{ш}^{доп}}{W_s} = \frac{1}{n_{доп}} = A_0 A_c^{доп}, \quad (10)$$

а условие выбора типа системы питания (7) можно переписать в виде

$$A_c^{max} < A_c^{доп}. \quad (11)$$

В выражениях (9)–(11) приняты следующие условные обозначения:  $A_c^{\max}$  и  $A_c^{\text{доп}}$  — коэффициенты, соответственно, для максимального и допустимого воздействий, характерных для конкретной системы питания;  $A_0$  — безразмерный коэффициент, в котором сгруппированы все параметры шлюза, не зависящие от типа системы питания и являющиеся исходными данными.

Безразмерный коэффициент определяется по формуле

$$A_0 = \frac{2\Omega_c H_d}{g(\omega_c - \omega_s)T^2}, \quad (12)$$

где  $\Omega_c = (b_{c,ef} + l_{c,ef})b_{c,ef}$  — площадь зеркала камеры;  $T$  — время наполнения (опорожнения) камеры.

Допустимое значение коэффициента определяется с использованием формул (8) и (12):

$$A_c^{\text{доп}} = \frac{1}{n_{\text{доп}} A_0}. \quad (13)$$

Условие выбора системы питания (11) реализуется при помощи вспомогательных расчетных графиков (рис. 4). Время наполнения (опорожнения) камеры шлюза  $T$ , мин, в формуле (12) на предварительных стадиях проектирования следует определять по зависимости

$$T = \alpha \sqrt[3]{H_d \cdot l_{c,ef} \cdot b_{c,ef}}, \quad (14)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от типа системы питания шлюза ( $\alpha = 0,27$  — для головных систем питания,  $\alpha = 0,19$  — для распределительных систем питания).

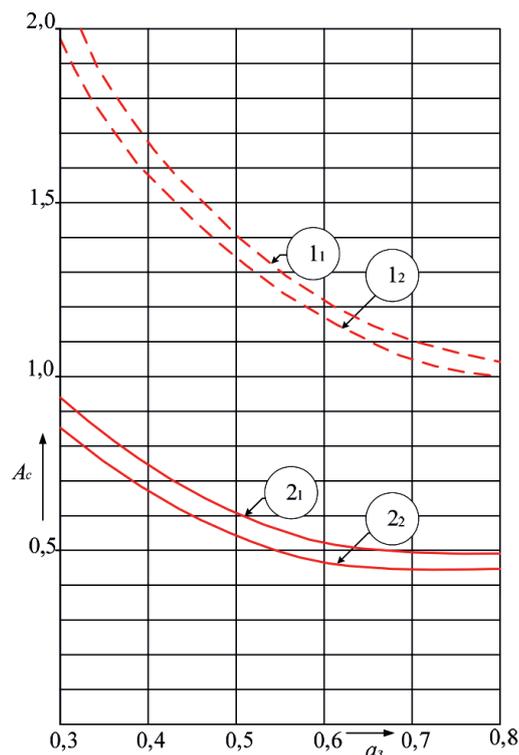


Рис. 4. Графики зависимости  $A_c = f(\alpha_3)$

Зависимости  $A_c = f(\alpha_3)$  приведены как для наибольшего значения коэффициента расхода системы питания (индекс 1), так и для наименьшего (индекс 2) — см. рис. 4. Значение относительно времени открытия затворов наполнения / опорожнения камеры  $\alpha_3 = t_3 / T$  ( $t_3$  — время открытия затвора) для распределительных систем питания принимается не более 0,6.

В результате выполненных расчетов установлено, что для решения поставленной задачи: замены системы питания при всех ограничениях наиболее перспективными являются простые распределительные системы питания с боковой подачей воды (рис. 5).

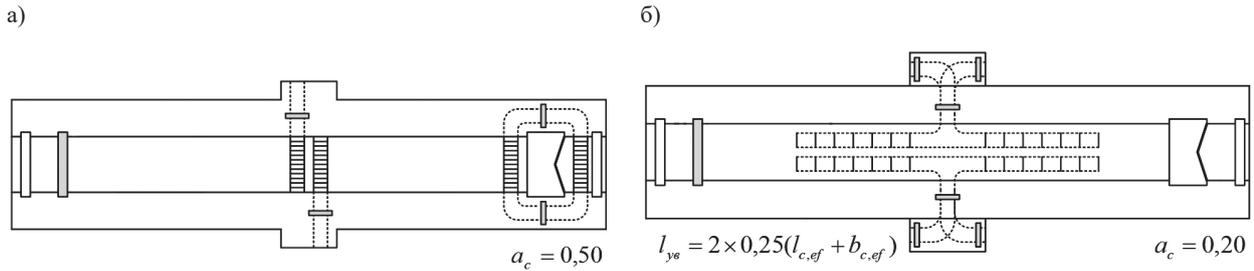


Рис. 5. Схемы простых распределительных систем питания с боковой подачей воды:

а — с одним поперечным водоводом ( $\mu = 0,7-0,65$ );

б — с продольными донными водоводами и поступлением воды в середину водоводов ( $\mu = 0,6-0,65$ )

### Обсуждение (Discussion)

В Российской Федерации существует успешный опыт эксплуатации крупногабаритных шлюзов с боковой подачей воды: Угличский и Рыбинский шлюзы на р. Волга. Конструктивно подача воды осуществляется по-разному в зависимости от типа камеры и компоновки шлюза в составе гидроузла. Камеры шлюзов № 1–6 ВБВП, в зависимости от природных условий, могут быть двух типов: с разрезным днищем — шлюзы № 1–3 и 6 и доковой конструкции — шлюзы № 4 и 5 (рис. 6).

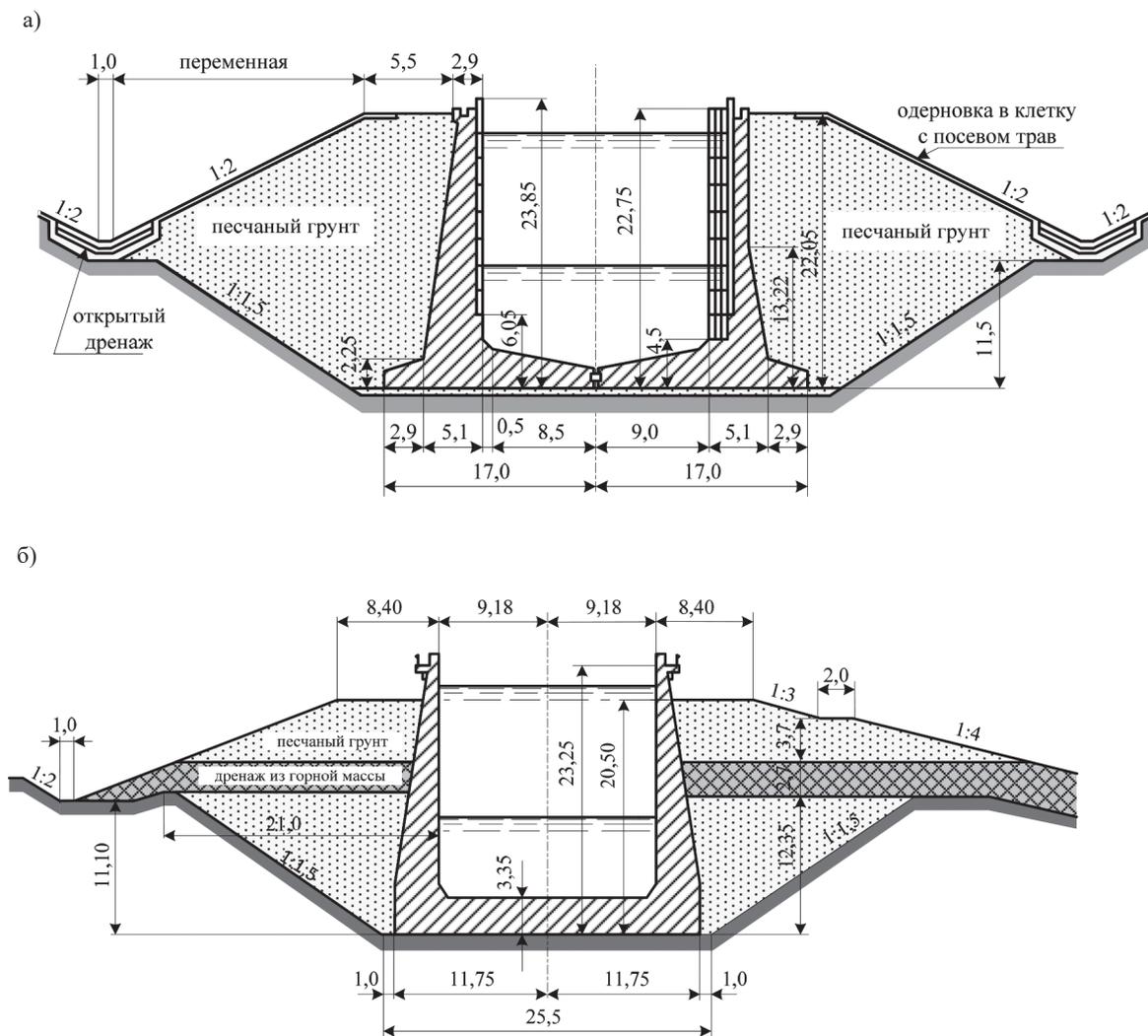


Рис. 6. Типы конструкций камер шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского канала:

а — поперечный разрез по камере с разрезным днищем шлюза № 1;

б — поперечный разрез по камере доковой конструкции шлюза № 4

Для шлюзов № 4 и 5 безальтернативным является использование системы подвода и распределения воды (см. рис. 5, а). Для шлюзов № 1–3 и 6 альтернативным является вариант системы подвода и распределения воды (см. рис. 5, б). В камерах с разрезным днищем появляется возможность за счет наклонной конфигурации лицевых консолей стальных подпорных стенок обустроить продольные распределительные галереи с водовыпусками по ширине камеры (см. рис. 5, б).

Подвод воды к камерам предполагается осуществить по полимерным трубам крупных диаметров широко и успешно применяемым для нефти и газопроводов (СНиП 2.05.06–85\* «Магистральные трубопроводы»). Предварительные расчеты (табл. 3) показывают, что при использовании предлагаемых систем питания время наполнения камеры сократится примерно на 30 %.

Таблица 3

**Время наполнения / опорожнения камеры**

Шлюз	Время* наполнения, мин	Планируемое время** наполнения, мин	Время опорожнения, мин	Сокращение времени наполнения, мин	Конструкция камеры
1. Вытегорский гидроузел (шлюз № 1)	13,5	9,5	13,0	4,0	С разрезным днищем
2. Белоусовский гидроузел (шлюз № 2)	13,6	9,6	10,5	4,0	С разрезным днищем
3. Новинкинский гидроузел (шлюз № 3)	14,0	9,9	10,3	4,1	С разрезным днищем
4. Новинкинский гидроузел (шлюз № 4)	11,0	7,7	9,0	3,3	Доковая
5. Десятинский гидроузел (шлюз № 5)	12,5	8,8	10,0	2,7	Доковая
6. Десятинский гидроузел (шлюз № 6)	14,5	10,2	13,5	4,3	С разрезным днищем

\* — практическое время наполнения камеры шлюза водой при существующей безгалерейной системе питания;

\*\* — время наполнения камеры шлюза водой при предлагаемой простой распределительной системе питания с подачей воды в середину камеры.

Одним из важнейших этапов проектирования судоходных шлюзов является *моделирование движения потока воды через сооружение*. Вследствие того, что шлюзы являются уникальными сооружениями по расположению, конструкции, расходам воды и др., гидравлические явления на них также являются уникальными. Обеспечению безопасных условий стоянки судна в камере шлюза были посвящены теоретические и натурные исследования российских ученых А. А. Атавина [9], О. Ф. Васильева [8], В. И. Букреева [8], Б. Д. Качановского, В. В. Ключева, В. А. Кривошея [10], А. В. Михайлова [7], Н. А. Семанова [11] и др.

Вопросами численного моделирования гидродинамических явлений в камере шлюза посвящены работы И. В. Липатова [12], А. П. Яненко [13] J. Webb, W. Peng [14], Z. Z. J. Wang, Zou [15]. При реализации численного моделирования важными факторами, определяющими достоверность результатов расчетов, являются задание параметров этих моделей [16], которые зависят главным образом от геометрической формы и, как правило, заранее неизвестны. Одним из инструментов, позволяющих проводить трехмерное моделирование, является программный комплекс FLOW-3D, который предполагается использовать при проверке корректности разработанных рекомендаций.

**Заключение (Conclusion)**

При выборе варианта реновации шлюза с изменением типа системы питания, можно получить шлюз с полезной длиной камеры  $l_{c,ef} = 290$  м. Такой габарит имеют все крупные речные шлю-

зы Волжско-Камского бассейна, запроектированные для пропуска двух крупногабаритных судов, расположенных в камере в кильватер и успешно эксплуатирующиеся более пятидесяти лет.

Дополнительными преимуществами перехода к новой системе питания водой камеры (простой распределительной с боковой подачей воды) являются:

- сохранение сложившейся природно-технической системы;
- возможность проведения строительно-монтажных работ в сжатые сроки в межнавигационный период, без вывода шлюза из эксплуатации;
- ускорение процесса наполнения камеры шлюза водой;
- дополнительный эффект по увеличению пропускной способности вследствие уменьшения времени входа судов из верхнего бьефа в шлюз за счет забора воды помимо подходного канала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический отчет о строительстве Волго-Балтийского водного пути им. В. И. Ленина: отчет по теме (закл.). Т. 1 : Проект и эксплуатационное освоение. — М., Центр. ин-т нормативных исследований и науч.-техн. информ. «Оргтрансстрой» М-ва трансп. строит., 1968. — 310 с.
2. *Ганеев А. М.* Водные пути и гидротехнические сооружения, их эксплуатация и ремонт (Волго-Балтий водный путь): учеб. пособие / А. М. Ганеев, П. А. Гарибин, В. В. Клюев. — СПб.: СПГУВК, 2005. — 201 с.
3. Научное обоснование возможности и целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов № 1–6 / ФБУ «Администрация Волго-Балт» в целях повышения пропускной способности. — № ГР 115080740012. — М.: ЗАО «Акватик», 2015. — 359 с.
4. *Богатов А. В.* Увеличение пропускной способности шлюзов № 1–6 ВБВП за счет изменения системы наполнения камеры водой / А. В. Богатов, П. А. Гарибин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г.: в 3 ч. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — Ч. 1. — 308 с.
5. *Ганеев А. М.* Определение размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер судоходных шлюзов из-под плоских подъемно-опускных ворот / А. М. Ганеев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 34а–40.
6. *Головков С. А.* Распределение воды в судоходных шлюзах: моногр. / С. А. Головков, П. А. Гарибин, А. М. Ганеев. — СПб.: СПГУВК, 2009. — 154 с.
7. *Михайлов А. В.* Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Ч. I: Внутренние водные пути / А. В. Михайлов. — Изд-во АСВ, 2004. — 448 с.
8. *Васильев О. Ф.* Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях: математическое и лабораторное моделирование, натурные испытания / О. Ф. Васильев [и др.] // Вычислительные технологии. — 2001. — Т. 6. — Ч. 2: Спец. вып. — С. 63–69.
9. *Атавин А. А.* Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография / А. А. Атавин [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Дегтярева (мл.). — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. — 327 с.
10. *Кривошей В. А.* Гидросооружения: устранить опасность! / В. А. Кривошей // Речной транспорт. — 2005. — № 4. — С. 32–35.
11. *Семанов Н. А.* Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
12. *Липатов И. В.* Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований: моногр. / И. В. Липатов. — Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. — 100 с.
13. *Atavin A. A.* The Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes in Navigation Passes and the Optimal Control of Vessel's Passing through a Shipping Lock / A. A. Atavin [et al.] // XXVIII Congr. IAHR. — Theme D, Graz (Austria), 1999. — 8 p. (CD-ROM).
14. *Webb J.* Innovations in Lock Filling and Emptying Systems / J. Webb, W. Peng // Paper 5 of PIANC Workshop. — 2009. — Pp. 15–16.
15. *Wang H.Z.* Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship / H. Z. Wang, Z. J. Zou // IWNTM13: International Workshop on Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands, July 5-7, 2013. — Delft University of Technology, 2013. — Pp. 62–70.

16. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации / А. А. Гиргидов // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 3(21). — С. 21–27.

## REFERENCES

1. Krylov, G. A., ed. *Tekhnicheskii otchet o stroitel'stve Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti im. V. I. Lenina. Vol. 1. Proekt i ekspluatatsionnoe osvoenie*. M.: Tsentr. in-t normativnykh issledovaniy i nauch.-tekhn. informatsii «Orgtransstroj» M-va transp. stroitel'stva, 1968.
2. Gapeev, A. M., P. A. Garibin, and V. V. Klyuev. *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya, ikh ekspluatatsiya i remont (Volgo-Baltii vodnyi put')*: Ucheb. Posobie. SPb.: SPGUVK, 2005.
3. *Zaklyuchitel'nyi otchet po teme: Nauchnoe obosnovanie vozmozhnosti i tselesoobraznosti uvelicheniya poleznoi dliny kamer shlyuzov № 1–6 FBU «Administratsiya Volgo-Balt» v tselyakh povysheniya propusknoi sposobnosti*. № GR 115080740012. M.: ZAO «Akvatik», 2015.
4. Bogatov, A. V., and P. A. Garibin. “Uvelichenie propusknoi sposobnosti shlyuzov № 1–6 VBVP za schet izmeneniya sistemy napolneniya kamery vodoi.” *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 18–23 noyabrya 2019 g.; Inzhenerno-stroitel'nyi institut*. Vol. 1. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2019.
5. Gapeev, A. M. “Determination of dimentions and relative position of lock chamber system components when flooding from under plain lift-overpour gate.” *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 34a–40.
6. Golovkov, S. A., P. A. Garibin, and A. M. Gapeev. *Raspredelenie vody v sudokhodnykh shlyuzakh. Monografiya*. SPb.: SPGUVK, 2009.
7. Mikhailov, A. V. *Gidrosooruzheniya vodnykh putei, portov i kontinental'nogo shel'fa. Chast' I: Vnutrennie vodnye puti*. Izdatel'stvo ASV, 2004.
8. Vasil'ev, O. F., A. A. Atavin, V. V. Tarasevich, and A. P. Yanenko. “Nestatsionarnye protsessy v sudopropusknykh sooruzheniyakh: matematicheskoe i laboratornoe modelirovanie, naturnye ispytaniya.” *Vychislitel'nye tekhnologii* 6(2. Special Issue) (2001): 63–69.
9. Atavin, A. A., V. I. Bukreev, O. F. Vasil'ev, et al. *Gidrodinamicheskie aspekty neshtatnykh i avariinykh situatsii na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya*. Edited by V.V. Degtyarev (jun.). Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2009.
10. Krivoshei, V. A. “Gidrosooruzheniya: ustranit' opasnost'!” *River transport (XXI<sup>st</sup> century)* 4 (2005): 32–35.
11. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnye kanaly, shlyuzy i sudopod»emniki*. M.: Transport, 1970.
12. Lipatov, I. V. *Gidrodinamika rechnykh potokov i ee vliyaniye na ekspluatatsionnye parametry sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: metodologiya issledovaniy. Monografiya*. N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2006.
13. Atavin, A. A., P. V. Stepanova, V. V. Tarasevich, and A. P. Yanenko. “The Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes in Navigation Passes and the Optimal Control of Vessel's Passing through a Shipping Lock.” *XXVIII Congr. IAHR*. Theme D, Graz (Austria), 1999. (CD-ROM.)
14. Webb, J., and W. Peng. “Innovations in Lock Filling and Emptying Systems.” *Paper 5 of PIANC Workshop*. 2009. 15–16.
15. Wang, H. Z., and Z. J. Zou. “Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship.” *IWNTM13: International Workshop on Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands, July 5-7, 2013*. Delft University of Technology, 2013. 62–70.
16. Girgidov, A. A. “Gibridnoye modelirovaniye v proektirovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzhenii i FLOW-3D® kak sredstvo ego realizatsii.” *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* 3(21) (2011): 21–27.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гарибин Павел Андреевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: garibin@mail.ru, kaf\_gsk@gumrf.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Garibin, Pavel A.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: garibin@mail.ru, kaf\_gsk@gumrf.ru

**Богатов Александр Владимирович** —  
главный специалист  
ФБУ «Администрация «Волго-Балт»  
191014, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург,  
Виленский пер., дом 15, литер Б  
e-mail: [gbu@volgo-balt.ru](mailto:gbu@volgo-balt.ru)

**Bogatov, Aleksandr V.** —  
Chief Specialist  
FBI «Administration of the Volga-Baltic basin  
of inland waterways»  
15/B Vilensky lane, St. Petersburg, 191014,  
Russian Federation  
e-mail: [gbu@volgo-balt.ru](mailto:gbu@volgo-balt.ru)

*Статья поступила в редакцию 23 июня 2020 г.  
Received: June 23, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-654-665

## THE RESULTS OF NUMERICAL IMPLEMENTATION OF THE TASK OF ARRANGING THE FLEET OF A SMALL SHIPPING COMPANY

**T. E. Malikova, E. S. Timoshek**

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

*The problem of the fleet optimal deployment of a small shipping company engaged in the cargoes transportation in the regions of the Eastern Arctic is considered in the paper. Since mathematical modeling and model experiment allows you to accelerate the process of managerial decision-making and bring it to a higher level, a mathematical model of the fleet deployment on the transport network section is proposed. A distinctive feature of the model from the well-known prototypes is that the transport network section consisting of three ports is chosen as the object for arranging the ships: the port of departure, the intermediate port (by-cargo shipments are unloaded and loaded), and the destination port. The optimality criterion is the complex fleet expenses for a relatively short navigation period. The mathematical model is implemented using linear programming methods in the application environment of the MATLAB package. Practical application of the proposed model allows you to optimal management the coastal transport, to evaluate the effectiveness of each vessel in a particular section of the transport network, and to form a list of the leased fleet for the nearest navigation. As part of the study, a model experiment is carried out to justify the reliability of the obtained model solutions and to prove the adequacy of the proposed model of the fleet arrangement to a real technological process. The experimental base for comparative analysis is formed on the basis of annual reports of freight forwarding activities of a small shipping company and the optimal plan obtained in the course of solving the problem of «determining the effective use of the fleet» in a graphical way. The problems that arise during the organization of loading and unloading operations on the equipped shore and the further delivery of goods to remote Arctic villages are also considered, and an additional problem that needs to be solved in the course of further research is identified.*

*Keywords: sea transport, logistics, model experiment, fleet management, cargo transportation in the Arctic.*

### For citation:

Malikova, Tatiana E., and Elena S. Timoshek. "The results of numerical implementation of the task of arranging the fleet of a small shipping company." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 654–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-654-665.

УДК 656.614.3:004.42

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ РАССТАНОВКИ ФЛОТА МАЛОЙ СУДОХОДНОЙ КОМПАНИИ

**Т. Е. Маликова, Е. С. Тимошек**

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

*В статье рассмотрена задача оптимальной расстановки флота малой судоходной компании, осуществляющей перевозку грузов снабжения в районах Восточной Арктики. Так как математическое моделирование и модельный эксперимент позволяют ускорить процесс принятия управленческого решения и вывести его на более качественный уровень, предложена математическая модель расстановки флота на участке транспортной сети. Отличительной особенностью модели от известных прототипов является то, что в качестве объекта расстановки судов был выбран участок транспортной сети, состоящий из трех портов: порта отправления, промежуточного порта, где выгружаются и загружаются попутные партии груза, а также порта назначения. Критерием оптимальности являются комплексные расходы флота за относительно короткий навигационный период. Реализация математической модели выполнена методами линейного программирования в среде прикладных программ пакета MATLAB. Практическое применение предложенной модели позволяет обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками, оценить эффективность использования каждого судна на конкретном участке*

транспортной сети, сформировать списочный состав арендуемого флота на ближайшую навигацию. В рамках проведенного исследования был выполнен модельный эксперимент для обоснования достоверности полученных модельных решений и доказательства адекватности предложенной модели расстановки флота реальному технологическому процессу. Экспериментальная база сравнительного анализа была сформирована на основе годовых отчетов транспортно-экспедиторской деятельности малой судоходной компании и оптимального плана, полученного в ходе решения задачи «определения зоны эффективного использования флота» графическим способом. Также были рассмотрены проблемы, возникающие при организации погрузочно-разгрузочных работ на оборудованный берег и дальнейшей доставке грузов в удаленные Арктические поселки, а также определена дополнительная задача, которую необходимо решить в ходе дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* морской транспорт, логистика, модельный эксперимент, управление работой флота, перевозка грузов в Арктике.

**Для цитирования:**

Маликова Т. Е. Результаты численной реализации задачи расстановки флота малой судоходной компании / Т. Е. Маликова, Е. С. Тимошек // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 654–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-654-665.

---

### **Введение (Introduction)**

В процессе планирования работы малой судоходной компании приоритетными являются задачи формирования структуры арендуемого флота и определение зоны эффективного использования для каждого из выбранных судов. Структура флота такой компании является динамическим объектом, так как аренда судов по тайм-чартеру позволяет быстро включать одни суда в структуру флота (фрахтовать) и исключать другие (отфрахтовывать) в зависимости от сезонных колебаний объемов грузопотоков на принадлежащем ей малом сегменте рынка морских перевозок.

Особенностями формирования оптимальной структуры арендуемого флота малой судоходной компании являются:

- ориентация на краткосрочную перспективу: от нескольких месяцев (например, период арктической навигации (4–6 мес.)) до одного года;
- наличие возможности резкого отклонения фактического состояния рынка от прогнозируемого;
- рассмотрение грузопотоков и показателей работы судов с достаточно высокой степенью точности и детализации.

Подробный анализ литературных источников, выполненный Д. О. Вишневым [1], убедительно доказал, что при постановке задачи рассматривается процесс формирования оптимальной структуры арендуемого флота в долгосрочной перспективе без учета текущего состояния сегмента рынка судоходной компании, грузопотоков и специфических условий работы судов. Отсюда следует, что имеющиеся модели оптимизации структуры флота не полностью отражают основные, характерные для процесса планирования работы малой судоходной компании, закономерности и поэтому не могут применяться в рамках данного исследования.

Задача формирования структуры арендуемого флота на краткосрочную перспективу (4–6 мес.) может быть решена без построения математической модели оптимизации структуры флота. Для ее решения достаточно определить зоны эффективного использования каждого судна из предварительного списка предлагаемых к аренде судов. Результатом решения задачи является список судов, оптимальный для работы на конкретном сегменте транспортного рынка. При этом в контексте постановки задачи судно считается наилучшим, если себестоимость его работы в зоне будет наименьшей по сравнению с другими судами, при условии выполнения заданного объема перевозок. Методика решения данной задачи графическим способом представлена в статье [2].

Кроме графического способа решения задачи следует рассмотреть возможность применения аналитических методов, широко используемых и хорошо зарекомендовавших себя при исследовании сложных динамических систем, к которым в том числе относятся и процессы управления

работой флота и порта, такие, например, как имитационное моделирование [3]–[6], теория катастроф [7], [8], а также методы исследования операций [9]–[12]. Зарубежный опыт принятия управленческих решений в вопросах оптимальной расстановки флота свидетельствует о том, что наибольшее распространение получили *методы регрессионного анализа* [13]. Например, в практической деятельности судоходных компаний США и Европы применяются следующие регрессионные зависимости: зависимость суточного расхода топлива от мощности главного двигателя [14] и зависимость от дедвейта [15], [16].

Следует отметить, что в области решения задачи оптимального управления флотом наиболее часто используются *методы исследования операций* [17], [18]. Под термином «исследование операций» понимают методологию применения математических количественных методов для обоснования принимаемых решений во всех областях целенаправленной человеческой деятельности [19]. В основу принятия решений в данной методологии положен общеизвестный постулат: «Оптимальным решением является такой набор значений переменных, при котором достигается оптимальный вариант функционирования транспортной системы». При выполнении данного исследования в качестве инструментария был выбран один из количественных методов исследования операций, а именно решение распределительной задачи линейного программирования симплексным методом.

Несмотря на многообразие указанных ранее традиционных методов принятия управленческих решений на морском транспорте, следует выделить объединяющие их факторы: исследование динамически сложных систем; формирование условий на базе точных прогнозов, в основе которых находится обработка больших массивов статистических данных и математическое моделирование, целью которого является исследование различных режимов функционирования рассматриваемой системы. Например, при постановке классической задачи расстановки флота в терминах исследования операций на большую размерность указывает выражение вида «в объеме некоторого пароконства», т. е. задача решается для всех судов, имеющихся в крупной судоходной компании. В случае минимально допустимой размерности модели  $2 \times 2$  для ее решения точными методами используется *симплексный метод*, или *метод потенциалов*, а для решения приближенными методами — *метод наибольших разностей*, или *метод почти оптимальных планов*. Отсюда следует вывод, что существующие модели не подходят для прогнозирования работы флота малой судоходной компании, имеющей в своем распоряжении одно-два судна и осуществляющей перевозку на одном направлении, т. е. для задач расстановки флота размерности  $2 \times 1$ . Следует отметить, что на российском рынке морских перевозок грузов снабжения для Восточной Арктики работают в основном судоходные компании, подпадающих под определение «малые». Таким образом, существует актуальная задача адаптации математического аппарата исследования операций к условиям малых судоходных компаний.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В ходе решения поставленной задачи был предложен вариант математической модели расстановки флота на участке транспортной сети. Постановка данной задачи и ее математическая модель представлены в статье [20]. В связи с тем, что по условию задачи в период навигации перевозка грузов осуществляется по одному и тому же «маршруту», математическая модель в данной постановке является *вырожденной*. Для решения проблемы вырожденности предложено искусственно разбить весь «маршрут» на отдельные участки по аналогии с выражением «зона использования судна», используемом в случае графического метода решения задачи [2]. При этом применяется правило разбиения на участки, состоящие из трех портов: порта погрузки различных партий груза (*пункта отправления*); порта, где выгружаются и загружаются попутные партии груза (*промежуточного пункта*) и порта назначения, где производится выгрузка всех партий груза (*пункта прибытия*). Таким образом, расстановка флота осуществляется на множестве отдельных участков, что решает проблему вырожденности постановки задачи.

Практическое применение предложенной модели, безусловно, позволяет обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортном комплексе, выполнив оценку эф-

фактивности использования судна на конкретном участке транспортной сети. Однако требуется доказать адекватность предложенной модели реальному технологическому процессу. Для подтверждения этого был проведен модельный эксперимент с целью обоснования достоверности получаемых модельных решений. В качестве объекта эксперимента была выбрана транспортно-экспедиторская деятельность компании ООО «МаринТЭК», которую кратко можно охарактеризовать следующим образом. Перевозки осуществляются арендованным флотом, который фрахтуется у транспортной компании «Камчатское морское пароходство». Торговый порт Владивосток является отправной точкой морского участка транспортной сети компании, в котором формируются партии груза для отправки. По пути следования осуществляются заходы в несколько портов и портовых пунктов: Анадырь, Беринговский, Провидения, Лаврентия, Певек [20]. Навигационный период, ограниченный погодными и ледовыми условиями плавания судов, составляет три месяца. Исходные данные численного эксперимента были сформированы на основании рейсовых отчетов за 2018 г., предоставленных компанией «МаринТЭК», а также полного списка предлагаемых в аренду судов, взятого с официального сайта компании «Камчатское морское пароходство».

В качестве платформы для выполнения модельного эксперимента был выбран пакет прикладных программ среды MATLAB (версии R2017b, лицензия № 970311) на основе следующих возможностей или характеристик. Данный программный продукт является крайне гибким инструментом, так как при его использовании в задачах оптимизации создан основной каркас решения распределительной задачи в классической постановке, а также предусмотрена возможность адаптации используемых алгоритмов путем подстройки кода под модели, выходящие за рамки классической постановки [21], [22]. Представляет интерес функциональная возможность настройки работы программы с большими базами данными, оформленными в форматах текстов файлов. Кроме того, именно данный программный продукт широко используется в прикладных исследованиях ряда отечественных научных школ при решении актуальных задач морского транспорта [23], [24], а также в процессе обучения будущих специалистов отрасли [25].

### Результаты (Results)

На основании анализа рейсовых отчетов был сделан вывод о том, что за один рейс каждое судно осуществляет заходы для выгрузки груза в 2–3 порта восточного побережья Арктики, а также были выделены основные транспортные участки и определен для каждого из них объем перевозимого груза (табл. 1).

Таблица 1

#### Участки транспортной сети

Описание участка сети	Протяженность, мили	Потребность, ДФЭ
1. Владивосток – Беринговский – Анадырь – Владивосток	4654	128
2. Владивосток – Анадырь – Провидения – Владивосток	5112	130
3. Владивосток – Анадырь – Лаврентия – Владивосток	5434	243
4. Владивосток – Анадырь – Певек – Владивосток	6483	150
5. Владивосток – Беринговский – Провидения – Владивосток	5112	100
6. Владивосток – Лаврентия – Нешкан (села) – Владивосток	5778	315
7. Владивосток – Беринговский – Певек – Владивосток	6966	120

Формирование первоначального списка судов выполнено исходя из сложившегося опыта фрахтования судов у компаний «Камчатское морское пароходство» и ОАО «Совфрахт». При этом определяющими характеристиками выбора являлись: осадка, оснащение судна грузовыми устройствами и грузоподъемность (контейнеровместимость) — табл. 2.

Таблица 2

## Технико-эксплуатационные характеристики судов

Суда	Характеристики				
	Скорость, уз	Дедвейт, т	Контейнерная вместимость, ДФЭ	Осадка, м	Краны (количество штук × грузоподъемность, т)
1. «Владимир Мясников»	13	12608	678	8,8	3 × 40
2. «Николай Ахромеев»	11	9122	330	7,2	2 × 60
3. «Юрий Тарапуров»	11	12840	678	8,6	3 × 40
4. «Иван Капралов»	14,5	9165	660	7,7	–
5. «Семен Дежнев»	14	4900	356	1,84	2 × 60
6. «Олег Таволжанский»	11	17556	922	9,5	3 × 60

Входные параметры модельного эксперимента представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

## Время рейса судна на участке транспортной сети, сут

Суда	Участки						
	1	2	3	4	5	6	7
1. «Владимир Мясников»	18	19,0	21,0	26	19	21	25
2. «Николай Ахромеев»	21	22,2	23,8	29	23	25	30
3. «Юрий Тарапуров»	21	22,2	23,8	29	23	25	30
4. «Иван Капралов»	16,2	17,8	19,0	23	18	20	23
5. «Семен Дежнев»	20	19,0	19,0	24	19	21	24
6. «Олег Таволжанский»	21	22,0	24,0	30	23	25	29,7

Таблица 4

## Эксплуатационные расходы судна за рейс, (тыс. руб.)

Суда	Участки						
	1	2	3	4	5	6	7
1. «Владимир Мясников»	9981	10675	11562	14746	10675	11884	14164
2. «Николай Ахромеев»	10493	11222	12069	14911	11483	12674	15176
3. «Юрий Тарапуров»	11615	12425	13361	16517	12715	14035	16809
4. «Иван Капралов»	8333	9222	10833	11482	9222	10281	12027
5. «Семен Дежнев»	7128	7885	8098	10224	7885	8773	10224
6. «Олег Таволжанский»	15623	16710	17968	22202	17100	18869	22592

Таблица 5

## Провозная способность судна за один рейс, ДФЭ

Суда	Участки						
	1	2	3	4	5	6	7
1. «Владимир Мясников»	125	125	195	160	125	170	100
2. «Николай Ахромеев»	114	120	175	165	120	150	90
3. «Юрий Тарапуров»	125	125	195	160	125	170	100
4. «Иван Капралов»	120	120	180	150	120	140	100
5. «Семен Дежнев»	100	95	110	100	100	100	80
6. «Олег Таволжанский»	170	170	210	180	170	170	150

Целью эксперимента являлось построение плана расстановки шести судов на семи участках, обеспечивающих минимум эксплуатационных расходов (см. табл. 4) при условии выполнения за-

данного объема перевозок на этих участках (см. табл. 1), а также выполнение сравнительного анализа плана, полученного аналитическим путем, с результатами работы компании «МаринТЭК» за 2018 г. По результатам анализа необходимо было сделать вывод о соответствии предложенной модели реальному технологическому процессу.

Для организации модельного эксперимента была сформирована функция `linprog` из дополнения Optimization Toolbox к пакету прикладных программ среды MATLAB:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub).$$

Переменными этой функции являются матрицы размерности, соответствующей размерности задачи  $(i \times j) = 6 \times 7$ , где  $i$  — судно;  $j$  — участок транспортной сети.

Целевая функция (минимум эксплуатационных расходов за навигационный период) представлена в виде:

$$f^T \times X \rightarrow \inf,$$

где  $f^T$  — матрица коэффициентов целевой функции (см. табл. 4):

$$f^T = \begin{pmatrix} 9981 & 10675 & 11562 & 14746 & 10675 & 11884 & 14164 \\ 10493 & 11222 & 12069 & 14911 & 11483 & 12674 & 15176 \\ 11615 & 12425 & 13361 & 16517 & 12715 & 14035 & 16809 \\ 8333 & 9222 & 10833 & 11482 & 9222 & 10281 & 12027 \\ 7128 & 7885 & 8098 & 10224 & 7885 & 8773 & 10224 \\ 15623 & 16710 & 17968 & 22202 & 17100 & 18869 & 22592 \end{pmatrix};$$

$X$  — матрица параметров управления; за параметры управления приняты:  $x_{ij}$  — количество рейсов  $i$ -го судна на  $j$ -м участке маршрута.

Ограничения на ресурсы представлены двумя группами.

*Первая группа ограничений:*

$$A \times X \leq b, \tag{1}$$

где  $A$  — матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-неравенствах (см. табл. 3);  $b$  — вектор свободных членов в ограничениях-неравенствах.

Экономический смысл неравенств (1) заключается в том, что суммарное время работы судна не может превышать эксплуатационного (навигационного) периода, который, по условию задачи, равен 90 сут (значения вектора  $b$ ). Вектор  $A$  задан в виде матрицы, сформированной на основе данных табл. 3:

$$A = \begin{pmatrix} 18 & 19 & 21 & 26 & 19 & 21 & 25 \\ 21 & 22,2 & 23,8 & 29 & 23 & 25 & 30 \\ 21 & 22,2 & 23,8 & 29 & 23 & 25 & 30 \\ 16,2 & 17,8 & 19 & 23 & 18 & 20 & 23 \\ 20 & 19 & 19 & 24 & 19 & 21 & 24 \\ 21 & 22 & 24 & 30 & 23 & 25 & 29,7 \end{pmatrix}.$$

*Вторая группа ограничений:*

$$Aeq \times X \leq beq, \tag{2}$$

где  $Aeq$  — матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-равенствах;  $beq$  — вектор свободных членов в ограничениях-равенствах (см. табл. 1).

Экономический смысл равенств (2) состоит в том, что выполнение объема перевозок на каждом участке должно быть обеспечено. Вектор  $Aeq$  представлен элементами матрицы (см. табл. 5):

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} 125 & 125 & 195 & 160 & 125 & 170 & 100 \\ 114 & 120 & 175 & 165 & 120 & 150 & 90 \\ 125 & 125 & 195 & 160 & 120 & 170 & 100 \\ 120 & 120 & 180 & 150 & 120 & 140 & 100 \\ 100 & 95 & 110 & 100 & 100 & 100 & 80 \\ 170 & 170 & 210 & 180 & 170 & 170 & 150 \end{pmatrix}.$$

Вектор  $beq$  (заданные на участках объемы перевозок) записан в следующем виде:

$$beq = (128 \ 130 \ 243 \ 150 \ 100 \ 315 \ 120).$$

Необходимо также определить два дополнительных вектора:  $lb$  — вектор ограничений плана снизу и  $ub$  — вектор ограничений плана сверху. Так как областью решений данной задачи являются только неотрицательные числа ( $lb = 0$ ),  $ub$  не будет иметь ограничений сверху. Численный результат модельного эксперимента представлен в табл. 6.

Таблица 6

**Количество рейсов по типам судов и участкам транспортной сети**

Суда	Участки						
	1	2	3	4	5	6	7
1. «Владимир Мясников»	0	0	1,2462	0	0	1,8529	0
2. «Николай Ахромеев»	0	0	0	0	0	0	0
3. «Юрий Тарапуров»	0	0	0	0	0	0	0
4. «Иван Капралов»	1,0667	1,0833	0	1,000	0,1576	0	1,2000
5. «Семен Дежнев»	0	0	0	0	0,8109	0	0
6. «Олег Таволжанский»	0	0	0	0	0	0	0

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что для выполнения заданного объема перевозок в период навигации достаточно аренды трех судов: «Владимир Мясников», «Иван Капралов» и «Семен Дежнев». Общие эксплуатационные расходы для данных судов составили 890690 тыс. усл. ден. ед. (тыс. руб.). Аренда судов «Юрий Тарапуров», «Олег Таволжанский», «Николай Ахромеев» компании экономически невыгодна.

В табл. 7 и 8 представлены результаты проверки выполнения ограничений математической модели для сформированного списка арендуемых судов.

Таблица 7

**Время работы судов на участках сети**

Суда	Участки							$\Sigma T_3$
	1	2	3	4	5	6	7	
1. «Владимир Мясников»	–	–	26,2	–	–	39	–	65,2
2. «Иван Капралов»	17,3	19,3	–	23	2,8	–	27,6	90
3. «Семен Дежнев»	–	–	–	–	15,4	–	–	15,4

Таблица 8

**Обеспечение объема перевозок на участках сети**

Суда	Участки							Итого
	1	2	3	4	5	6	7	
1. «Владимир Мясников»	–	–	243	–	–	315	–	558
2. «Иван Капралов»	128	130	–	150	19	–	120	547
3. «Семен Дежнев»	–	–	–	–	81	–	–	81
Потребность, ДФЭ	128	130	243	150	100	315	120	1186

На основании полученных расчетов сформировано следующее управленческое решение:

- судно «Владимир Мясников» является оптимальным для работы на участках: «Владивосток – Анадырь – Лаврентия – Владивосток» (3-й участок) и «Владивосток – Лаврентия – Нешкан – Владивосток» (6-й участок);
- судно «Иван Капралов» является оптимальным для работы на участках: «Владивосток – Беринговский – Анадырь» (1-й участок); «Владивосток – Анадырь – Провидения – Владивосток» (2-й участок); «Владивосток – Анадырь – Певек – Владивосток» (4-й участок); «Владивосток – Беринговский – Певек – Владивосток» (7-й участок);
- судно «Семен Дежнев» является оптимальным на участке «Владивосток – Беринговский – Провидения – Владивосток» (5-й участок).

### Обсуждение (Discussion)

Согласно результатам модельного эксперимента (табл. 9), суда «Владимир Мясников» и «Иван Капралов» являются основными для аренды флота, выполняя перевозку большей части грузопотока судоходной компании, причем грузопотоки равномерно распределены между этими судами (558 и 547 ДФЭ соответственно). Судно «Семен Дежнев» является вспомогательным, так как осуществляет перевозку остатка грузопотока на участке «Владивосток – Беринговский – Провидения – Владивосток», который не смогло выполнить судно «Иван Капралов». Кроме того, для судна «Иван Капралов» зоной эффективного использования является весь маршрут (от Владивостока до Певека), а для судна «Владимир Мясников» зона эффективности более короткая (от Владивостока до Лаврентия с заходами в Арктические поселки). Данный вывод совпадает с результатами, полученными в ходе решения данной задачи графическим методом и представленными в статье [2]. В частности, при решении задачи обоими способами (аналитическим и графическим) можно сделать вывод о том, что судно «Николай Ахромеев» является нерентабельным для компании и должно быть заменено на судно «Иван Капралов».

Таблица 9

**Сравнительная таблица результатов модельного эксперимента и отчетных показателей перевозок контейнеров (ДФЭ) компании ООО «МаринТЭК» в 2018 г.**

Суда	Источник информации	Порты и портовые пункты						Итого по судну
		Беринговский	Анадырь	Провидения	Лаврентия	Нешкан	Певек	
«Владимир Мясников»	Модельный эксперимент	–	243	–	165	150	–	558
	Отчетные показатели	24	118	53	165	150	137	647
«Иван Капралов»	Модельный эксперимент	148	160	102	–	–	137	547
«Николай Ахромеев»	Отчетные показатели	92	194	32	–	–	–	318
«Семен Дежнев»	Модельный эксперимент	81	–	–	–	–	–	81
«СТ Конфиденс»	Отчетные показатели	113	91	17	–	–	–	221
Итого по порту, ДФЭ	Модельный эксперимент	229	403	102	165	150	137	1186
	Отчетные показатели	229	403	102	165	150	137	1186

Полученные в ходе проведения модельного эксперимента результаты не противоречат отчетным показателям перевозок контейнеров (ДФЭ) в 2018 г. компании ООО «МаринТЭК» по основным портам Чукотки (см. табл. 9). Расхождение между отчетными показателями и результатами

моделирования объясняются следующими обстоятельствами. Во-первых, в модельном эксперименте обоснована необходимость введения в список арендуемого флота судно «Иван Капралов», которое имеет более высокую эксплуатационную скорость, а также наименьшие эксплуатационные расходы по сравнению с другими судами (см. табл. 2). Во-вторых, судно «СТ Конфиденс» было арендовано в 2018 г. ООО «МаринТЭК» у компании ОАО «Совфрахт» как вспомогательное судно для вывоза остатка грузопотока. В мае 2019 г. данное судно было выведено из эксплуатации и утилизировано владельцем, поэтому в модельный эксперимент было введено судно «Семен Дежнев» с аналогичными судно «СТ Конфиденс» транспортными характеристиками.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно утверждать, что полученные аналитические решения являются достоверными, а математическая модель расстановки флота на участке транспортной сети адекватно описывает существующий технологический процесс перевозки грузов компании ООО «МаринТЭК». При формировании управленческого решения дополнительно необходимо обратить внимание на то, что для части пунктов захода необходимо организовать выгрузку на необорудованный берег. Например, на 3-м и 6-м участках (см. табл. 1) осуществляется выгрузка контейнеров как в оборудованных портах, таких как Анадырь, так и на необорудованный берег — порт Лаврентия и Нешкан. В этой связи выбранные программой суда «Владимир Мясников» и «Семен Дежнев» соответствуют заявленным условиям работы (см. табл. 2), так как имеют собственные краны для производства погрузочно-разгрузочных работ и среднюю осадку. Судно «Иван Капралов» не имеет судового вооружения, необходимого для перевалки груза на необорудованный берег, но его использование возможно на выбранных аналитическим путем участках (1-й, 2-й, 4-й и 7-й участки), так как они имеют судозаходы только в оборудованные порты Анадырь, Певек и Провидения.

При организации выгрузки на оборудованный берег необходимо учитывать следующие особенности. Во-первых, процесс перевалки груза с морских плавсредств на сухопутные у среза воды в условиях прибоя является трудоемким и травмоопасным. Во-вторых, берег Восточной Арктики отличается высокой крутизной галечных пляжей, уклон которых составляет в среднем  $8^\circ$  по сравнению с западной частью Арктики, где уклон пляжей составляет примерно  $2^\circ$  [26]. Исходя из этого использовать транспорт на воздушной подушке для доставки груза на берег в данных условиях не представляется возможным и придется обеспечивать безопасную выгрузку грузов у борта судна на расстоянии 2–5 км от берега при волнении 3–4 балла, в битом льду, на припайной или плавающей льдине. Одним из вариантов организации выгрузки груза у борта судна с доставкой груза до места назначения (удаленного арктического поселка) является применение нового амфибийного перегрузочного транспорта, разработанного в Морском государственном университете имени адмирала Г. И. Невельского [27], [28]. Амфибийный вездеход обладает мореходностью в 4 балла, проходимость в битом льду и по заснеженному льду, а также безопасным сходом с припайного льда в воду и надежным выходом из воды на лед. Он может устойчиво двигаться одним бортом по воде, другим — по льду, преодолеть прибойную полосу и выйти на берег при волнении 4 балла.

### Выводы (Summary)

1. Практическое применение математической модели «расстановка флота на участке транспортной сети» обеспечивает оптимальное управление флотом судоходной компании даже в малых сегментах рынка морских перевозок и быструю реакцию на малейшие изменения его конъюнктуры.
2. Учет получаемой в процессе моделирования информации позволяет оценивать эффективность использования предложенного к аренде судна на конкретном участке транспортной сети и сформировать структуру флота малой судоходной компании на ближайшую навигацию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневецкий Д. О. Моделирование оптимальной структуры флота и перспективных направлений его работы / Д. О. Вишневецкий // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — Т. 1. — № 3(21). — С. 4–8. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37095.

2. Тимошек Е. С. Определение зоны эффективного использования транспортного флота в арктическом регионе на примере группы судов компании ООО «Маринтэк» / Е. С. Тимошек, С. Е. Чуйкова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 61. — С. 184–192.
3. Янченко А. А. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.
4. Кузнецов А. Л. Использование эвристических алгоритмов в задачах моделирования работы морского транспорта / А. Л. Кузнецов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–4 (42). — С. 224–228.
5. Янченко А. А. Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.
6. Эглит Я. Я. Математическое моделирование выбора варианта доставки груза транспортно-экспедиторскими компаниями / Я. Я. Эглит [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 1 (90). — С. 15–22. DOI: 10.34046/aumsuomt90-3.
7. Вольнов И. Н. Катастрофа сборки и моделирование морских динамических объектов в экстремальных ситуациях / И. Н. Вольнов, А. С. Шпак // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С. 184–190.
8. Маликова Т. Е. Исследование системы обеспечения технологической безопасности морских судов методами теории катастроф / Т. Е. Маликова, М. А. Москаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 3. — С. 94–97.
9. Румянцева А. А. Рациональная расстановка флота с использованием индексного метода / А. А. Румянцева // Экономика и предпринимательство. — 2019. — № 7(108). — С. 1073–1076.
10. Галин А. В. Поиск унифицированного метода для маршрутизации судов при сбое работы линейного контейнерного сервиса / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Логистика: современные тенденции развития: Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2019. — С. 90–100.
11. Мойсеенко С. С. Методика выбора судов для освоения заданного грузопотока / С. С. Мойсеенко // IV Международной Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. — 2016. — С. 99–104.
12. Маликова Т. Е. Использование теории графов при разработке математических моделей систем «смещающийся груз-спецустройство» / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 2. — С. 39–42.
13. Платов А. Ю. О современных методах бизнес-планирования работы речного флота / А. Ю. Платов, Ю. И. Платов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 54. — С. 110–115.
14. Economic Guidance memorandum. 05-06 FY 2004. Shallow Draft Vessel Operating Costs. — U. S. Army Corps of Engineers, 2004. — 16 p.
15. Gentle N. F. An Estimate of Operating Costs for Bulk, Ro-Ro and Container Ships / N. F. Gentle, R. J. Perkins. — Watson Ferguson and Co., 1982. — 53 p.
16. Роџица М. Methodology of day-to-day ship costs assessment / М. Роџица // Promet-Traffic&Transportation. — 2006. — Vol. 18. — No. 5. — Pp. 337–345.
17. Дмитриенко Д. В. Исследование операций – инструмент для повышения эффективности управления водным транспортом / Д. В. Дмитриенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
18. Салько Д. Ю. Применение линейного моделирования при планировании работы флота судоходной компании / Д. Ю. Салько, К. М. Искандаров // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2012. — № 1(1). — С. 81–84.
19. Эглит Я. Я. Возможности применения современных методов в регулировании логистических потоков на транспорте / Я. Я. Эглит [и др.] // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 3 (21). — С. 13–20.
20. Тимошек Е. С. Распределительная модель судов снабжения Арктического региона на участке транспортной сети / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 60. — С. 213–222.
21. Бородин Г. А. Использование среды MATLAB при решении задач линейного программирования / Г. А. Бородин, В. А. Титов, И. Н. Маслякова // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 11-1. — С. 23–26.

22. Ревинская О. Г. Гибкость использования в MatLab входных и выходных параметров стандартных и нестандартных функций / О. Г. Ревинская // Программные продукты и системы. — 2019. — № 1. — С. 42–54.

23. Изотов О. А. Математическое моделирование мультимодальных перевозок в условиях Крайнего Севера / О. А. Изотов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 1. — С. 95–102.

24. Янченко А. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.

25. Тимошек Е. С. Решение задач расстановки флота в среде MATLAB в учебном процессе морских вузов / Е. С. Тимошек // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. — 2019. — № 4 (29). — С. 25–30.

26. Азовцев А. И. Прогноз преимуществ транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения замерзающего шельфа и побережья Арктики и Дальнего Востока / А. И. Азовцев, С. А. Огай, О. В. Москаленко // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. — 2017. — № 2 (2). — С. 354–358.

27. Азовцев А. И. Развитие судов для условий грузовых операций на необорудованных берегах Арктических и Субарктических морей / А. И. Азовцев [и др.] // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 450–460.

28. Азовцев А. И. Мореходные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для повышения эффективности транспортной системы Арктики / А. И. Азовцев, С. А. Огай // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 483–494.

## REFERENCES

1. Vishnevsky, D. “Modeling of the optimal fleet structure and perspective directions of its work.” *Technology audit and production reserves* 3(21) (2015): 4–8. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37095.

2. Timoshek, Elena S, and Svetlana E. Chuikova. “Determination of the zone of effective use of transport fleet in the Arctic region on the example of the «MarinTEK» vessel group.” *Bulletin of VSAWT* 61 (2019): 184–192.

3. Yanchenko, A. A., and T. E. Malikova. “A discrete-event model for operations in container terminals.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (85) (2017): 25–31.

4. Kuznetsov, Alexander L., Alexander V. Kirichenko, Anatoly E. Sazonov, and German B. Popov. “Application of heuristic algorithms in the problem of simulation of sea transport operations.” *Marine Intellectual Technologies* 4-4(42) (2018): 224–228.

5. Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Igor N. Volnov. “Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

6. Eglit, Y. Y., C. Y. Eglite, A. A. Kovtun, A. Y. Rusin, and A. A. Dmitriev. “Mathematical modeling of choice of variant of delivery of cargo forwarding companies.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(90) (2019): 15–22. DOI: 10.34046/aumsuomt90-3.

7. Volnov, I. N., and A. S. Shpak. “Assembly catastrophe and modeling of marine dynamic objects in extreme situations.” *Bulletin of VSAWT* 57 (2018): 184–190.

8. Malikova, T. E., and M. A. Moskalenko. “Catastrophe theory application to the study of the system of ensuring sea-going vessels’ technological safety.” *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 3 (2014): 94–97.

9. Rumiantseva, A. A. “Rational fleet allocation using the index method.” *Journal of Economy and entrepreneurship* 7(108) (2019): 1073–1076.

10. Galin, A. V., and A. S. Malykhin. “Search unified method for routing vessels in case of fault of liner container service.” *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya: Materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2019. 90–100.

11. Moiseenko, S. S. “Metodika vybora sudov dlya osvoeniya zadannogo gruzopotoka.” *IV Mezhdunarodnoi Baltiiskii morskoi forum: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma*. 2016. 99–104.

12. Malikova, T. E. “Using the theory of graphs in developing mathematical models of the systems «shifting cargoes – special equipment».” *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 2 (2012): 39–42.

13. Platov, A. Y., and J. I. Platov. “The modern methods of business planning of river fleet.” *Bulletin of VSAWT* 54 (2018): 110–115.

14. *Economic Guidance memorandum. 05-06 FY 2004. Shallow Draft Vessel Operating Costs.* U.S. Army Corps of Engineers, 2004.
15. Gentle, N. F., and R. J. Perkins. *An Estimate of Operating Costs for Bulk, Ro-Ro and Container Ships.* Watson Ferguson and Co., 1982.
16. Počuča, Milojka. "Methodology of day-to-day ship costs assessment." *Promet-Traffic&Transportation* 18.5 (2006): 337–345.
17. Dmitrienko, Dmitry V. "Operations research – a tool to improve the efficiency of management of water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
18. Salko, D. Y., and K. M. Iskandarov. "The application of linear modeling while planning the shipping company operation." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 1(1) (2012): 81–84.
19. Eglit, Y. Y., C. Y. Eglite, A. A. Kovtun, and A. A. Dmitriev. "Possibilities of application of modern methods in the regulation of logistic flows transport." *System analysis and logistics* 3(21) (2019): 13–20.
20. Timoshek, Elena S., and Tatyana E. Malikova. "Routing model for supply ships operating in the Arctic Region transport network." *Bulletin of VSAWT* 60 (2019): 213–222.
21. Borodin, G. A., V. A. Titov, and I. N. Maslyakova. "Solving liner programming problems with MATLAB." *Fundamental research* 11-1 (2016): 23–26.
22. Revinskaya, O. G. "Flexibility of using input and output parameters of standard and non-standard functions in MatLab." *Software & Systems* 1 (2019): 042–054.
23. Izotov, Oleg Albertovich, and Dmitriy Lvovich Golovtsov. "Mathematical modeling of multimodal transportation in the Far North." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2016): 95–102.
24. Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Dmitry A. Oskin. "Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
25. Timoshek, Elena S. "Solving the problems of fleet planning in MATLAB in the educational process of maritime universities." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 4(29) (2019): 25–30.
26. Azovtsev, A. I., S. A. Ogai, and O. V. Moskalenko. "Prognoz preimushchestv transportnykh sredstv na vozdukhopornykh gusenitsakh dlya kompleksnogo osvoeniya zamerzayushchego shel'fa i poberezh'ya Arktiki i Dal'nego Vostoka." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady nauchno-prakticheskoi konferentsii* 2(2) (2017): 354–358.
27. Azovtsev, Anatoliy, Victor Kulesh, Aleksey Ogai, and Vladimir Petrov. "Ship's Construction Development for Cargo Operations in Condition of the Unimproved Port Facilities in Arctic and Subarctic Coast." *Polyarnaya mekhanika* 3 (2016): 450–460.
28. Azovtsev, Anatoliy, and Sergey Ogai. "Seaworthy All-Terrain Vehicles on Air-Supported Tracks for Increasing Effectiveness of the Arctic Transport System." *Polyarnaya mekhanika* 3 (2016): 483–494.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Маликова Татьяна Егоровна** —  
 доктор технических наук, доцент  
 Морской государственный университет  
 имени адмирала Г. И. Невельского  
 690059, Российская Федерация, Владивосток,  
 ул. Верхнепортовая, 50А  
 e-mail: [tanMalik@mail.ru](mailto:tanMalik@mail.ru)  
**Тимошек Елена Сергеевна** —  
 старший преподаватель  
 Морской государственный университет  
 имени адмирала Г. И. Невельского  
 690059, Российская Федерация, Владивосток,  
 ул. Верхнепортовая, 50А  
 e-mail: [timoshek-es@mail.ru](mailto:timoshek-es@mail.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Malikova, Tatiana E.** —  
 Dr. of Technical Sciences, associate professor  
 Maritime State University named after  
 Admiral G. I. Nevelskoi  
 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,  
 Russian Federation  
 e-mail: [tanMalik@mail.ru](mailto:tanMalik@mail.ru)  
**Timoshek, Elena S.** —  
 Senior lecturer  
 Maritime State University named after  
 Admiral G. I. Nevelskoi  
 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,  
 Russian Federation  
 e-mail: [timoshek-es@mail.ru](mailto:timoshek-es@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 16 июля 2020 г.  
 Received: July 16, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-666-671

## HYDRAULIC OVERLOADING OF SORPTION MATERIAL AT THE TREATMENT FACILITIES OF THE MULTIPURPOSE SEA CARGO COMPLEX (MSCC) BRONKA

**M. A. Kolosov, P. P. Chinakov**

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

*Implementation of the hydraulic overloading process for the various industries, construction and production is discussed in the paper. In the various sectors of construction and production in Russia, solid bulk materials are used. Jet devices are widely used for overloading these materials. For example, to form dumps of dams of tailing ponds and sludge collectors, jet devices are used. They transport solid bulk material formed during sedimentation from the bottom into the dam body. In the chemical industry, jet devices are used to dilute the various types of reagents, mix gas systems and create a vacuum in vessels. Nowadays, with the tightening quality requirements for wastewater treatment, jet devices are introduced into the technological process for wastewater treatment. Jet devices are used in the operation of treatment facilities, for the implementation of commissioning, and the periodic replacement of filter materials. The various solid bulk materials (sand, sorbents, ion-exchange resins, etc.), which are loaded into pressure and non-pressure filters involved in the treating process, are used to treat surface wastewater of the ports. The integrated solution produced for the hydro-displacement of activated carbon at treatment facilities in the port of Bronka (St. Petersburg, Lomonosov, Krasnoflotskoye highway, 49A) is described in the paper. As a single, common device for two different technological processes, the jet devices that operates in different technological schemes and with different performance parameters is used; the parameters can be adjusted in any of two technological processes. Working technological solutions are illustrated in the graphic form.*

*Keywords: jet devices, hydraulic overloading, solid bulk material.*

### **For citation:**

Kolosov, Mikhail A., and Pavel P. Chinakov. "Hydraulic overloading of sorption material at the treatment facilities of the Multipurpose Sea Cargo Complex (MSCC) Bronka." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 666–671. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-666-671.

**УДК 532.525.2**

## ГИДРОПЕРЕГРУЗКА СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОРСКОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА «БРОНКА»

**М. А. Колосов, П. П. Чинаков**

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

*Рассмотрен вопрос о реализации процесса гидроперегрузки для различных отраслей промышленности, строительства и производства России, где используются твердые сыпучие материалы. Отмечается, что широкое распространение для перегрузки данных материалов в гидротехническом строительстве получили струйные аппараты. Например, для формирования отвалов дамб хвостохранилищ и шламонакопителей используются струйные аппараты, которые перемещают твердый сыпучий материал, образовавшийся при отстаивании со дна в тело дамбы. В химической промышленности струйные аппараты используются для разведения различного типа реагентов, смешивания газовых систем и образования вакуума в сосудах. Отмечается, что в настоящее время в связи с ужесточением требований к качеству очистки сточных вод в технологический процесс для очистки стоков внедряются струйные аппараты, используемые также в процессе эксплуатации очистных сооружений для реализации пусконаладочных работ и периодической замены фильтрующих материалов. Для очистки поверхностных сточных вод портов используются различные твердые сыпучие материалы, такие как песок, сорбенты, ионообменные смолы и т. д., которые загружаются в напорные и безнапорные фильтры, участвующие в процессе очистки. В статье*

приведено описание комплексного решения для гидроперемещения активированного угля на очистных сооружениях в порту «Бронка» (г. Санкт-Петербург) и г. Ломоносов, Краснофлотское шоссе, 49а). В работе в качестве единого (общего) устройства для двух разных технологических процессов используется струйный аппарат, работающий в разных технологических схемах с разными параметрами производительности, которые могут регулироваться в любом из двух технологических процессов. Рабочие технологические решения даны в виде технологических схем.

*Ключевые слова:* струйный аппарат, гидроперегрузка, твердый сыпучий материал.

**Для цитирования:**

Колосов М. А. Гидроперегрузка сорбционного материала на очистных сооружениях многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка» / М. А. Колосов, П. П. Чинаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 666–671. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-666-671.

### Введение (Introduction)

Многофункциональный морской перегрузочный комплекс (ММПК) — порт «Бронка» является единственным глубоководным морским терминалом в Санкт-Петербурге. Глубина подходного морского канала составляет 14,4 м, что позволяет принимать суда различного класса и большого водоизмещения [1]. Находится ММПК в удобно расположенном транспортном узле на юго-западе за пределом Санкт-Петербурга, рядом с кольцевой автомобильной дорогой (КАД) и железнодорожной станцией Бронка. Первое судно было принято ММПК на обработку в декабре 2015 г., т. е. с этого времени, фактически, началась эксплуатация оборудования порта и его сооружений.

Порт «Бронка» — самый современный порт в Северо-Западном регионе России — может обрабатывать все виды опасных грузов и имеет площадь более 120 га. Политика порта связана с минимизацией возможного воздействия на окружающую среду, поэтому все поверхностные и ливневые воды с площадки порта направляются на современные очистные сооружения для очистки на многоуровневой системе фильтрации. Любая система фильтрации требует технического обслуживания, которое включает замену фильтрующей загрузки, или сорбционного материала. Для службы эксплуатации очистных сооружений порта «Бронка» были проведены предпроектные работы с целью проектирования устройства для автоматизированной перегрузки сорбционного материала общим объемом ~ 270 м<sup>3</sup>.

Целью проекта является разработка устройства, которое будет производить не только загрузку, но и выгрузку твердого сыпучего сорбционного материала из напорных фильтров очистных сооружений порта «Бронка» с помощью струйного аппарата. Основы теории струйных аппаратов были заложены в работах Цейнера и Ренкина. Первое применение струйного аппарата относится к XIX в., тогда его использовали в лабораториях для откачивания воды и воздуха из колб. Впоследствии широкое применение струйные аппараты получили в горнодобывающей промышленности для откачивания воды и пульпы из шахт [2].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве фильтрующей загрузки на очистных сооружениях поверхностного ливневого стока в порту «Бронка» используется активированный кокосовый уголь NWC 6 × 12, который имеет небольшую плотность: ~ 550 г/дм<sup>3</sup>. Согласно данным характеристикам и требованиям заказчика, предъявляемые к высокой производительности, а также исходя из многофункциональности устройства начался проектный этап с разработкой концепции устройства гидроперегрузки твердых сыпучих тел и подбор оборудования. Было принято решение в качестве основного технологического оборудования использовать струйный аппарат с производительностью по перегрузке, равной ~ 14 т/ч, активированного угля NWC 6 × 12, или около 28 м<sup>3</sup> в объеме.

Струйный насос, согласно действующим стандартам, относят к классу динамических насосов трения, в которых жидкая среда перемещается ее внешним потоком. Любой насос, по общепринятой терминологии, представляет собой машину для создания потока жидкой среды. Струйный аппарат является составной частью струйной насосной установки, которая включает в себя

также силовой насос и два трубопровода: один — для рабочей жидкости, второй — для смеси рабочей жидкости с перекачиваемой жидкостью [3].

В основу работы устройства гидроперегрузки твердых сыпучих тел заложены две технологические операции:

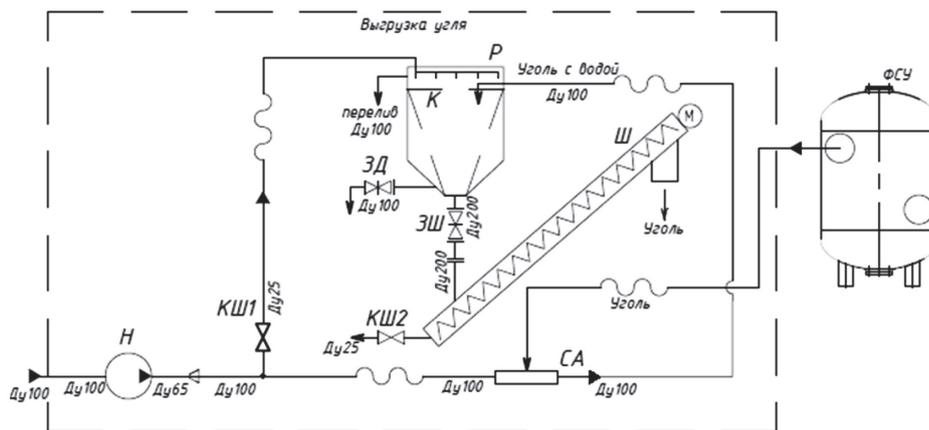
1. Выгрузка сорбционного материала из напорного фильтра очистных сооружений производилась с помощью работы струйного аппарата, который направлял водяную смесь активированного угля в емкость с установленной внутри фильтрующей корзиной. Фильтрующая корзина разделяла твердую и жидкую фазу, вода направлялась в приямок, а твердый сыпучий материал под силой тяжести осаждался в нижней части емкости, где монтировался шнек для непрерывной выгрузки активированного угля в мешки биг-бэг.

2. Загрузка твердого сыпучего материала в напорный фильтр очистных сооружений производилась с помощью работы струйного аппарата. Струйный аппарат монтировался на место шнека для транспортировки активированного угля по напорному рукаву в напорный фильтр, загрузка материала в емкость производилась с помощью погрузчика.

Для осуществления данной схемы гидроперегрузки сорбционного материала, как и для других материалов, таких как песок, пульпа, ил, требуется большое количество воды, поэтому гидроперегрузка производилась только в процессе работы очистных сооружений и в этом процессе использовались очищенные воды [4].

Технологические схемы выгрузки и загрузки твердого сыпучего материала показаны на рис. 1, перечень технологического оборудования дан в таблице (с. 669).

а)



б)

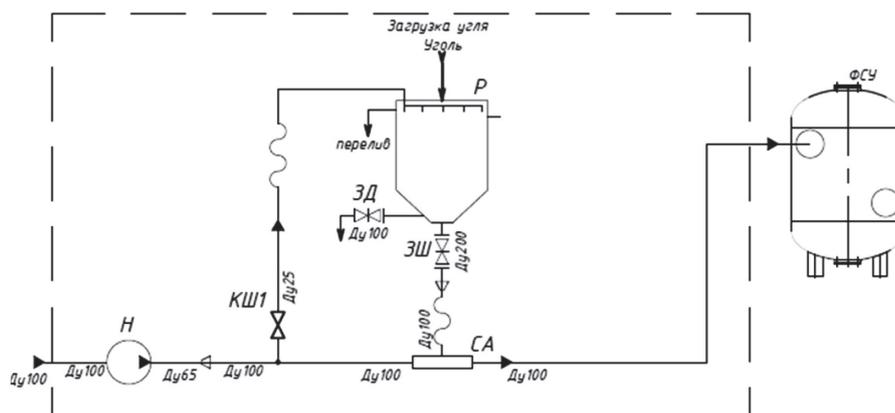


Рис. 1. Технологические схемы: а — выгрузки активированного кокосового угля; б — загрузки активированного кокосового угля

### Перечень технологического оборудования

Обозначение	Наименование	Кол.-во, шт.	Характеристика
Н	Насос подающий	1	Насос КМ-100-65-200, подача 100 м <sup>3</sup> /ч, напор 50 м, 380 В
Р	Резервуар	1	$V = 3,5$ м <sup>3</sup> , материал нержавеющей сталь
К	Выемная корзина	1	$V = 1,5$ м <sup>3</sup> , перфорация 1 мм, материал нержавеющей сталь
ФСУ	Фильтр сорбционный угольный	1	$V = 30$ м <sup>3</sup> , материал СтЗ, рабочее давление 6 бар
Ш	Шнек	1	$L = 4300$ мм, $d = 200$ мм, материал нержавеющей сталь, $N = 2,2$ кВт
КШ1	Кран шаровой	1	Латунь, РВ-РВ G 1", Ду25
СА	Струйный аппарат	1	$G_{отк} = 12$ т/ч, $G_{акт} = 60$ т/ч, материал — нержавеющей сталь
ЗД	Затвор поворотный дисковый	1	Затвор поворотный дисковый Ду100, $P_y = 10$ бар. Управление — ручка с фиксатором
ЗШ	Задвижка шиберная	1	Задвижка шиберная Ду200, $P_y = 10$ бар. Управление — штурвал
КШ2	Кран шаровой	1	Латунь, РВ-РВ G 1", Ду25

### Результаты (Results)

В обеих технологических схемах используется принцип работы струйного аппарата, а именно с помощью кинетической энергии рабочей (активной) среды (в данном случае воды) производится гидрорегулировка исходной (пассивной) среды, или активированного кокосового угля NWC 6 × 12. Передача рабочего импульса в аппарате происходит путем непосредственного контакта рабочей среды и перекачиваемой среды. При работе струйного аппарата рабочая среда поступает через патрубок (патрубки) подвода рабочей (активной) среды на осевое либо кольцевое рабочее сопло, откуда происходит ее истечение с высокой скоростью в приемную камеру. Под действием эжекционного эффекта пассивная среда подсасывается в приемную камеру, а далее смесь поступает в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей и окончательная передача импульса от рабочей среды к смеси. Поток смеси через диффузор струйного аппарата поступает в напорный рукав, который направляет смешанный с водой твердый сыпучий материал в емкость для выгрузки или в напорный фильтр [6].

### Обсуждение (Discussion)

На основе результатов выполненного проекта можно сделать вывод о том, что расход перекачиваемой среды зависит от давления активной среды (воды на входе в струйный аппарат), длины и конфигурации подводящих трубопроводов, количества и типа запорно-регулирующей арматуры, а также иных местных гидравлических сопротивлений [7]. Внешний вид струйного аппарата показан на рис. 2.

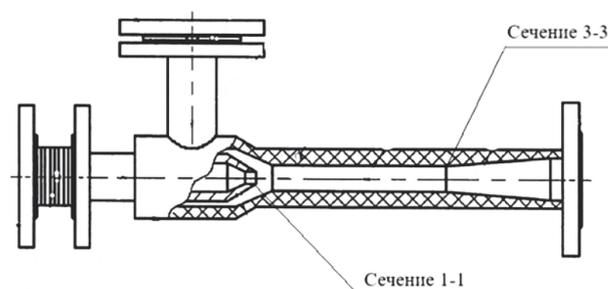


Рис. 2. Струйный аппарат

Процессы, характерные для всех без исключения струйных аппаратов, описаны следующими тремя законами: законом сохранения энергии, законом сохранения массы, законом сохранения импульса.

1. Закон сохранения энергии:

$$h_p + uh_H = (1 + u)h_c, \quad (1)$$

где  $h_p, h_H, h_c$  — функции состояния рабочего и эжектируемого потоков, соответственно, до струйного аппарата и смешанного потока после аппарата, кДж/кг;

$u = G_H/G_p$  — коэффициент эжекции, т. е. отношение массового расхода эжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока.

2. Закон сохранения массы:

$$G_c = G_p + G_H, \quad (2)$$

где  $G_p, G_H, G_c$  — массовые расходы, соответственно, рабочего, эжектируемого и смешанного потоков, кг/с.

3. Закон сохранения импульса, который для любой камеры смешения струйного аппарата записывается следующим образом [8]:

$$l_{p1} + l_{H1} = \int_{f3}^{f1} pdf + l_{c3}, \quad (3)$$

где  $l_{p1}$  и  $l_{H1}$  — импульс рабочего и эжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения, Н;

$l_{c3}$  — импульс смешанного потока в выходном сечении камеры смешения, Н;

$\int_{f3}^{f1} pdf$  — интеграл импульса по боковой поверхности камеры смешения между сечениями 1-1 и 3-3 (см. рис. 2).

В цилиндре камеры смешения  $\int_{f3}^{f1} pdf = 0,1$ .

Импульс потока в любом сечении можно вычислить по формуле [9]:

$$I = Gw + pf, \quad (4)$$

где  $G$  — массовый расход, кг/с;  $w$  — скорость, м/с;  $p$  — давление, Па (Н/м<sup>2</sup>);  $f$  — сечение, м<sup>2</sup>.

### Заключение (Conclusion)

Активная среда, подаваемая на струйный аппарат, может быть жидкообразной, газообразной, газо-жидкообразной, а также с включением твердых частиц. Размерность перемещаемых твердых сыпучих тел должна быть меньше, чем расстояние от корпуса струйного аппарата до камеры его смешения [10].

Выполненный проект по гидрперегрузке твердых сыпучих тел в порту «Бронка» объединил одно основное технологическое устройство для разных функций: для гидровыгрузки и для гидрозагрузки. Во всех технологических процессах технические характеристики устройства не изменялись [11].

### Благодарности (Acknowledgements)

Особую благодарность за помощь, оказанную в процессе выполнения проекта, выражаем службе эксплуатации порта «Бронка» / Департаменту инженерного обеспечения ООО «Феникс» (ММПК «Бронка»), а именно: главному инженеру С. А. Кабишеву, начальнику очистных сооружений Н. Н. Козлову, инженеру-технологу А. С. Тарасову.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порт «Бронка»: официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://port-bronka.ru/about-harbor/> (дата обращения: 03.03.2020).
2. Соколов Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
3. Сазонов Ю. А. Расчет и конструирование струйных аппаратов / Ю. А. Сазонов. — М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2016. — 64 с.
4. Филиппова Д. А. Баланс сточных вод при перегрузке песка гидромеханизированным способом / Д. А. Филиппова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 151–155.

5. Проектирование сооружений для очистки сточных вод / Всесоюз. комплекс. н.-и конструкторско-технолог. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. — М.: Стройиздат, 1990. — 192 с.

6. Берман Л. Д. Особенности рабочего процесса и режим работы водоструйного эжектора / Л. Д. Берман, Г. И. Ефимочкин // Теплоэнергетика. — 1964. — № 2. — С. 31–35.

7. Чернухин В. А. О расчете жидкостно-газовых струйных аппаратов / В. А. Чернухин, В. Г. Цегельский, С. Н. Глубоковский // Машиностроение. — 1977. — № 8. — С. 81–86.

8. Берман Л. Д. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов / Л. Д. Берман, Г. И. Ефимочкин // Теплоэнергетика. — 1964. — № 7. — С. 44–48.

9. Аверин С. И. Турбулентные струи и струйный инжектор: учеб. пособие / С. И. Аверин; — Днепропетровск: ДМЕТИ, 1986. — 79 с.

10. Александров В. Ю. Оптимальные эжекторы. Теория и расчет / В. Ю. Александров, К. К. Климовский. — М.: Машиностроение, 2012. — 136 с.

11. Марьенко В. П. Применение струйных насосов для подъема жидкости из скважин / В. П. Марьенко, И. Т. Мищенко, С. Д. Миронов, Ю. А. Цепляев. — М.: Обзоринформ. ВНИИОЭНГ, 1986. — Вып. 14 (21). — 56 с.

## REFERENCES

1. Port «Bronka». Official site. Web. 3 Mar. 2020 <<http://port-bronka.ru/about-harbor/>>.
2. Sokolov, E. Ya., and N. M. Zinger. *Struinye apparaty*. 3-ed. M.: Energoatomizdat, 1989.
3. Sazonov, Yu. A. *Raschet i konstruirovaniye struinykh apparatov*. M.: RGU nefti i gaza imeni I. M. Gubkina, 2016.
4. Filippova, D. A. “Balance scheme in sand cargo hydrotransport handling.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 151–155.
5. *Proektirovaniye sooruzhenii dlya ochistki stochnykh vod; Vsesoyuz. kompleks. n.-i konstrukt.-tehnolog. in-t vodosnabzheniya, kanalizatsii, gidrotekhn. sooruzhenii i inzh. gidrogeologii*. M.: Stroizdat, 1990.
6. Berman, L. D., and G. I. Efimochkin. “Osobennosti rabocheho protsessa i rezhim raboty vodostruynogo ezhektora.” *Teploenergetika* 2 (1964): 31–35.
7. Chernukhin, V. A., V. G. Tsegel’skii, and S.N. Glubokovskii. “O raschete zhidkostno-gazovykh struinykh apparatov.” *Izv. vuzov. Mashinostroeniye* 8 (1977): 81–86.
8. Berman, L. D., and G.I. Efimochkin. “Raschetnye zavisimosti dlya vodostruinykh ezhektorov.” *Teploenergetika* 7 (1964): 44–48.
9. Aверин, S. I. *Turbulentnyye strui i struinyi inzhektor: Ucheb. posobie*. Dnepropetrovsk: DMETI, 1986.
10. Aleksandrov, V. Yu., and K. K. Klimovskii. *Optimal’nye ezhektory. Teoriya i raschet*. M.: Mashinostroeniye, 2012.
11. Mar’enko, V. P., I. T. Mishchenko, S. D. Mironov, and Yu. A. Tseplyaev. *Primeneniye struinykh nasosov dlya pod’ema zhidkosti iz skvazhin*. Vol. 14 (21). M.: Obzor inform. VNIIOENG, 1986.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Колосов Михаил Александрович** — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7  
 e-mail: [kolosov-34@mail.ru](mailto:kolosov-34@mail.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)  
**Чинаков Павел Павлович** — аспирант  
 Научный руководитель:  
 Колосов Михаил Александрович  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [pavelchinakov@mail.ru](mailto:pavelchinakov@mail.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kolosov, Mikhail A.** — 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: [kolosov-34@mail.ru](mailto:kolosov-34@mail.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)  
**Chinakov, Pavel P.** — Postgraduate  
 Supervisor:  
 Kolosov, Mikhail A.  
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation  
 e-mail: [pavelchinakov@mail.ru](mailto:pavelchinakov@mail.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 3 марта 2020 г.  
 Received: March 3, 2020.

## BOX SELECTIVITY IN DIFFERENT CONTAINER CARGO-HANDLING SYSTEMS

**A. L. Kuznetsov<sup>1</sup>, A. D. Semenov<sup>2</sup>, A. A. Radchenko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

*The box selectivity in operational stack of container terminal is a quite common and long studied question. The purely random sample is governed by the theory of probability offering some combinatorial estimations. It is pointed that the introduction of operational rules like import/export separation, storage along shipping lines, sorting by rail or truck transportation etc., as well as the most notorious «immersion» effect, that is, covering of boxes arrived earlier by next cargo parties, blurs the clear algebraic picture and leads to appearance of many heuristic approaches to solving the problem. It is figured out in the paper that a new impetus to this problem in last decades was given by the rapid development of IT, AI and simulation techniques. The scientific publications describing many models of real and abstract terminals, into which complex mechanisms that reflect specific features and selected strategies are built, are considered in the paper. Unfortunately, these models are usually created ad hoc, with some pragmatic objectives and under the demand of closest possible proximity to the simulated objects. It is proved that there are much less models designated to purely scientific study of the deep inner mechanisms responsible for the primal behavior of the operating container stack, enabling to introduce the new rules and restrictions step by step, providing regular proving every next stage adequacy and ease to use. The research boils down to formulating the specific container handling equipment technology in container selection operations and detecting the dependencies between number of moves necessary to select a container and the geometric features of a stack.*

*Keywords: seaport, dry port, container terminal, selectivity, selectivity complexion, cargo handling equipment, operations productivity, combinatorics, technological scheme.*

**For citation:**

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. “Box selectivity in different container cargo-handling systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

**УДК 656.615**

## СЕЛЕКТИВНОСТЬ КОНТЕЙНЕРОВ В РАЗЛИЧНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ

**А. Л. Кузнецов<sup>1</sup>, А. Д. Семенов<sup>2</sup>, А. А. Радченко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

*В работе отмечается, что проблема выборки контейнеров из операционного контейнерного штабеля морского терминала является хорошо известной и давно исследуемой. Вариант чисто случайной выборки описывается с помощью теории вероятности, которая предлагает некоторые комбинаторные оценки. Утверждается, что наложение некоторых внешних ограничений и необходимость введения специальных правил, таких как разделение импорта / экспорта, хранение по судоходным линиям, сортировка партий железнодорожного или автомобильного транспорта и т. д., а также эффект «погружения», т. е. покрытия прибывших ранее ящиков поступившими позднее грузовыми партиями, размывает четкую алгебраическую картину, приводя к появлению различных эвристических подходов к решению проблемы. Отмечается, что новый импульс изучению данной проблемы придает стремительное развитие информационных технологий, теории искусственного интеллекта и методов имитационного моделирования. Рассмотрены научные публикации, описывающие множество моделей реальных и абстрактных терминалов, в которые встроены сложные механизмы, отражающие специфические особенности и избранные стра-*

тегии. Утверждается, что эти модели обычно создаются с некоторыми ограниченными прагматическими целями и требованием максимально возможной близости к моделируемому объектам. Отмечается, что существует гораздо меньше моделей, предназначенных для научного изучения глубинных внутренних механизмов, ответственных за первичное поведение операционного штабеля, которые позволяют шаг за шагом вводить новые правила и ограничения, тем самым обеспечивая объективное доказательство эффективности использования и адекватности каждого последующего этапа. Исследованы особенности работы технологического оборудования, используемого на контейнерных терминалах, а также определены математические зависимости количества движений, необходимых различному перегрузочному оборудованию для выборки контейнеров в соответствии с геометрическими характеристиками штабеля.

*Ключевые слова:* морской порт, сухой порт, контейнерный терминал, трудоемкость выборки, селективность, технологическое оборудование, производительность операций, контейнерный штабель, комбинаторика, транспортно-технологическая схема.

**Для цитирования:**

Кузнецов А. Л. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

### Введение (Introduction)

Контейнерный склад терминала является местом одновременного нахождения десятков тысяч контейнеров. Предоставляемая их конструкцией возможность складирования в несколько ярусов позволяет существенно экономить площадь, занимаемую складом. С другой стороны, выборка предназначенного для погрузки на транспортное средство целевого контейнера требует перемещения всех блокирующих доступ к нему контейнеров (находящихся выше его в штабеле). Каждое перемещение контейнера связано с работой сложного и дорогостоящего технологического оборудования, поэтому общая трудоемкость доступа, измеряемая количеством этих перемещений, ограничивает высоту складирования. Нахождение баланса между экономией площади и ростом затрат, связанных трудоемкостью выборки, составляет актуальную операционную проблему.

Актуальность данной проблемы подтверждена имеющейся специальной литературой [1], при этом главным инструментом ее исследования и решения является *имитационное моделирование*. В то же время имитационное моделирование не учитывает ряд случайных показателей, которые относят к категории *случайных возмущений* [2], [3]. Возникающая вследствие этого методическая погрешность по порядку величины сравнима с самим изучаемым эффектом. Для более адекватной оценки и интерпретации получаемых при помощи использования инструмента имитационного моделирования результатов следует в первую очередь идентифицировать базовые комбинаторные механизмы, лежащие в основе вероятностях схем выборки, сводящихся к схемам вероятностных испытаний. Изучению этих механизмов и посвящено данное исследование.

Информация о годовом грузопотоке контейнерного терминала  $Q$  и среднем сроке хранения контейнеров  $T_{dwell}$  позволяют оценить емкость единовременного хранения  $E$ , необходимую для обработки этого годового грузопотока:  $E = \frac{Q \cdot T_{dwell}}{365}$  [4], [5]. Стандартные морские контейнеры обеспечивают возможность складирования их в несколько ярусов, таким образом уменьшая площадь их размещения на контейнерной площадке, измеряемую в терминальных наземных слотах:  $S = \frac{E}{h}$ .

С другой стороны, чем выше операционная высота штабеля  $h$ , тем больше перемещений («движений») требуется для выбора из него целевого контейнера [6], [7]. При этом строительство территории как для размещения штабеля, так и движения для выборки контейнера связано с дополнительными финансовыми затратами, поэтому для определения оптимальной операционной высоты необходимо найти баланс между возникающими при этом потерями, как условно показано на рис. 1.

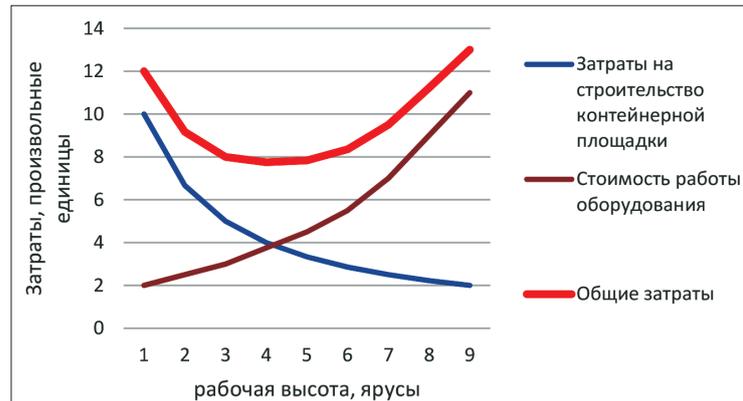


Рис. 1. Баланс потерь от площади и количества движений

Необходимая для организации площадь характеризуется определенными затратами, выраженными в некоторых произвольных денежных единицах. Эти же единицы позволяют оценить затраты, связанные с работой технологического оборудования. Оценка операционных площадей, необходимых в рамках различных систем обработки грузов, и расчет соответствующих расходов достаточно хорошо изучены, в то время как вопрос о селективности остается неопределенным [8]–[11]. В данной работе рассматривается трудоемкость выборки контейнеров при различных транспортно-технологических схемах работы терминала.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Селективность контейнеров в штабеле определяется как отношение числа коммерческих (производительных) движений к их общему числу (производительных и непроизводительных) [12]. Поскольку для одного контейнера производительным является лишь одно движение (которое оплачивается оператору терминала), это определение может быть записано следующим образом:

$$s = \frac{1}{N_{\text{движ}}} \quad (1)$$

Контейнеры, которые должны быть выбраны в определенный момент времени, так называемые *горячие контейнеры*, находятся в одной из позиций штабеля. Они обычно покрыты *холодными контейнерами*, блокирующими прямой доступ к ним [13]. Различные контейнерные транспортно-технологические системы (точнее, эксплуатационные характеристики оборудования, используемого в этих системах) требуют расформирования либо только одного ряда, содержащего целевой контейнер, либо выборки нескольких рядов контейнеров, как показано на рис. 2.

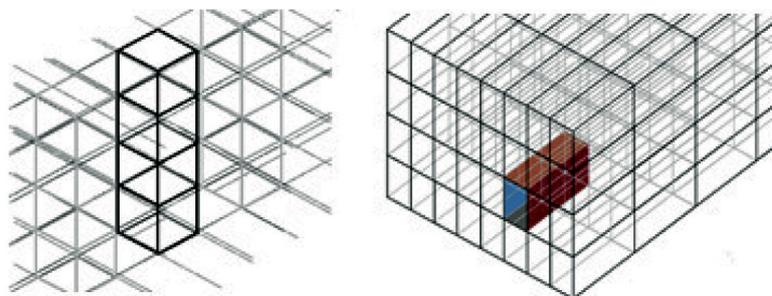


Рис. 2. Операционная зона для выборки

При этом селективность значительно различается, поэтому способ доступа оборудования к контейнерам штабеля делит все системы на два основных класса: *с верхним доступом* (портальные складские перегружатели на рельсовом ходу, портальные складские перегружатели на пневмоко-

лесном ходу, автоконтейнеровозы) и с боковым доступом (фронтальный погрузчик, боковой погрузчик, ричстакер) — рис. 3 и 4.

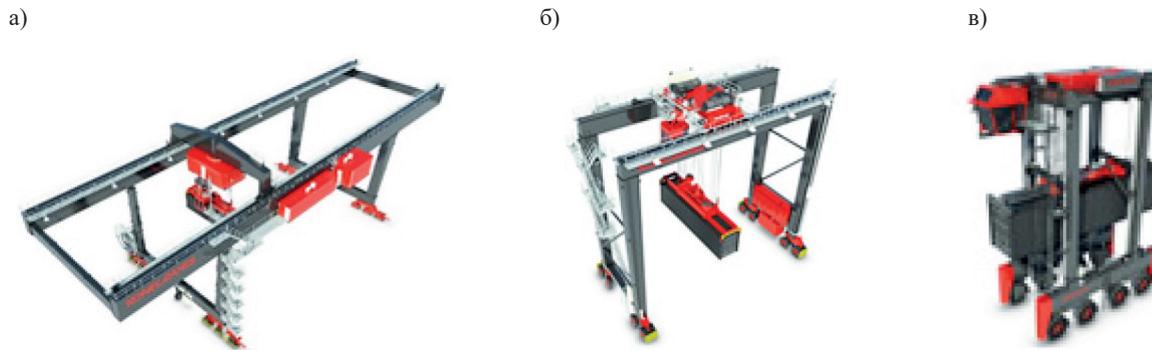


Рис. 3. Оборудование с верхним доступом:  
 а — Rail Mounted Gantry; б — Rubber Tyred Gantry; в — Straddle Carrier

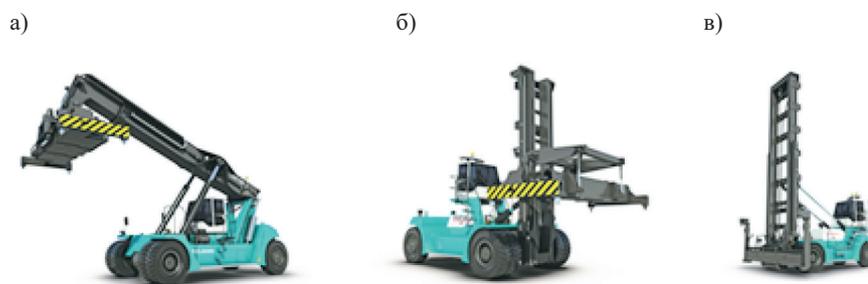


Рис. 4. Оборудование с боковым доступом:  
 а — Reachstacker; б — Mast Front Loader; в — Empty Container Handler

Целью данной работы не является формулировка рекомендаций по выбору транспортно-технологических схем, их можно найти в различных источниках, где анализируется весь спектр возможностей и требований к различным комбинациям грузоподъемного и транспортного оборудования, рассматриваемых на стадиях проектирования контейнерных терминалов. Данное исследование посвящено выявлению некоторых общих закономерностей, которым подчиняется работа различного технологического оборудования. Общий вид терминала с использованием различного оборудования приведен на рис. 5.



Рис. 5. Условный терминал, оснащенный всеми видами технологического оборудования

В контексте данного исследования будем выделять, как отмечалось ранее, оборудование с верхним и боковым доступом к контейнеру в штабеле (рис. 6).

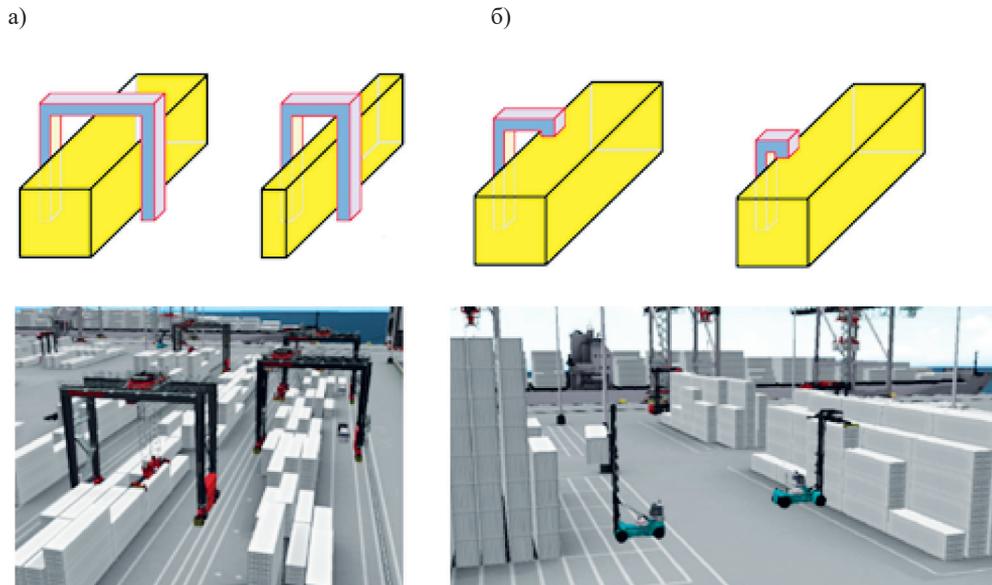


Рис. 6. Оборудование с верхним (а) и боковым (б) доступом

### Результаты (Results)

Рассмотрим контейнерный штабель со средней рабочей высотой  $h$  ярусов. Верхние ящики в системах с верхним доступом можно выбрать за одно движение, контейнеры под ними — за два движения, самые нижние — за  $h$  движений. Следовательно, теоретическое среднее число перемещений на один контейнер составляет

$$N_{move} = \frac{h+1}{2}. \quad (2)$$

Системы с боковым доступом требуют выборки не только контейнеров, находящиеся по верх требуемого, но и расположенных между машиной и адресным столбцом. В случае мачтовых фронтальных погрузчиков, т. е. традиционных вилочных и штабелеров порожних контейнеров, количество движений, необходимых для выборки каждого ящика, указано на рис. 7.

$h$	1	$h+1$	$2 \cdot h+1$	$(w-1) \cdot h+1$
	2	$h+2$	$2 \cdot h+2$	$(w-1) \cdot h+2$
	$h$	$h+h$	$2 \cdot h+h$	$(w-1) \cdot h+h$
				$w$

Рис. 7. Операционная зона выборки

Соответственно общее количество движений, необходимых для обработки штабеля высотой  $h$  ярусов и шириной  $w$  строк, составляет

$$\begin{aligned}
 N_w &= \frac{h+1}{2}h + \frac{h+1}{2}h + h^2 + \frac{h+1}{2}h + 2h^2 + \dots + \frac{h+1}{2}h + (w-1)h^2 = \\
 &= \frac{(h+1)hw}{2} + [0+1+\dots+(w-1)]h^2 = \frac{(h+1)hw}{2} + \frac{w(w-1)h^2}{2} = \\
 &= \frac{h^2w + hw + h^2w^2 - h^2w}{2} = \frac{hw(hw+1)}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

При этом поскольку в штабеле содержится всего  $hw$  контейнеров, среднее количество движений на один контейнер определяется по формуле

$$N_{move} = \frac{N_w}{hw}.
 \tag{4}$$

В таком случае среднее количество движений на один контейнер для рассматриваемого технологического оборудования составит:

$$N_{move} = \frac{(hw+1)}{2}.
 \tag{5}$$

Количество движений при выборке контейнеров из штабеля ричстакером не подчиняется формуле (5), поскольку ричстакер может выбирать контейнеры через несколько рядов. Схема выборки контейнеров из штабеля ричстакером приведена на рис. 8.

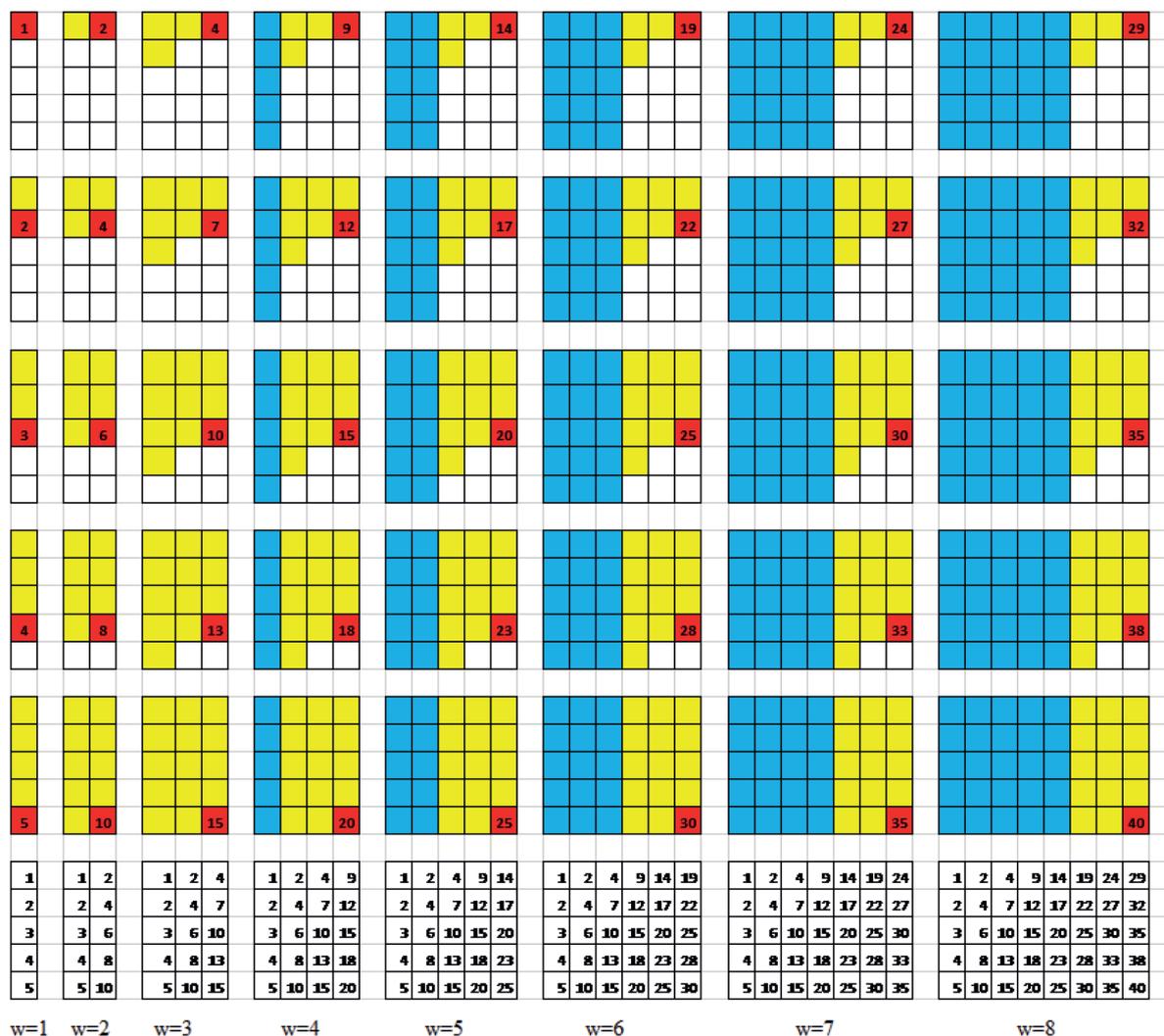


Рис. 8. Схематическое определение количества движений, необходимое для выборки целевого контейнера ричстакером при различной ширине штабеля и позиции контейнера

Анализ представленной схемы позволил определить, что выборка контейнера из штабеля ричстакером требует общего количества движений, определяемых выражением

$$N_w = \frac{1}{hw} \left\{ \frac{3(h+1)h}{2} + (w-2) \left[ \frac{wh^2 + 5h - 2}{2} \right] \right\}. \quad (6)$$

На рис. 9 приведено сравнение среднего количества движений, требуемых для выборки контейнера в различных системах.

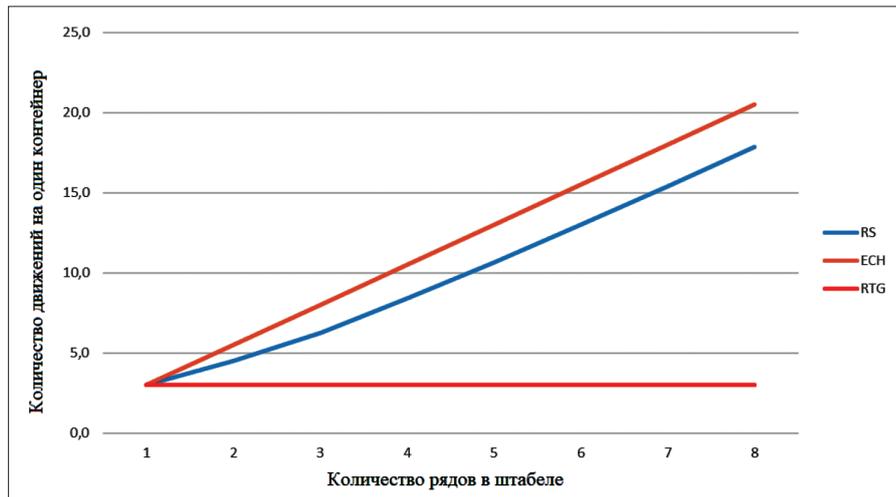


Рис. 9. Количество ходов в различных системах

### Обсуждение (Discussion)

Основная задача любой технологической системы заключается в оптимальной обработке грузопотока, проходящего через терминал. В этом отношении имеет значение не общее количество движений, необходимых для доступа к требуемому контейнеру, а количество «производительных» перемещений, которое можно выполнить в течение определенного промежутка времени. Иными словами, нужно оценить производительность оборудования в разных системах. Предположим, средний полный цикл перемещения грузозахватного устройства (в данном случае спредера) занимает  $T_{move}$  секунд. Это значение обычно сообщается производителем и позволяет рассчитать техническую производительность оборудования  $P_{theory} = \frac{3600}{T_{move}}$ .

Оператор терминала и его клиенты интересуются не технической и даже не эксплуатационной, а коммерческой производительностью, определяемой следующим образом:

$$P_{efficient} = \frac{3600}{N_{move} T_{move}} = sP_{theory}. \quad (7)$$

Таким образом, коммерческая производительность показывает, какое количество контейнеров клиента терминала оборудование может извлечь из штабеля.

Рассмотрим, как изменится производительность различных типов оборудования при увеличении ширины штабеля, выбрав для этого некоторые стандартные значения  $T_{move} = 250$  с — для фронтальных погрузчиков и  $T_{move} = 120$  с — для оборудования портального типа. Рабочие циклы подъемно-транспортного оборудования с боковым доступом занимают больше времени ввиду особенностей выполнения технологических операций.

На рис. 10 приведены результаты расчетов коммерческой производительности для различного оборудования на основе его расчетной селективности и выбранных значений рабочих циклов. Представленные на рисунке данные относятся к штабелю одинаковой операционной высоты, но разной ширины.

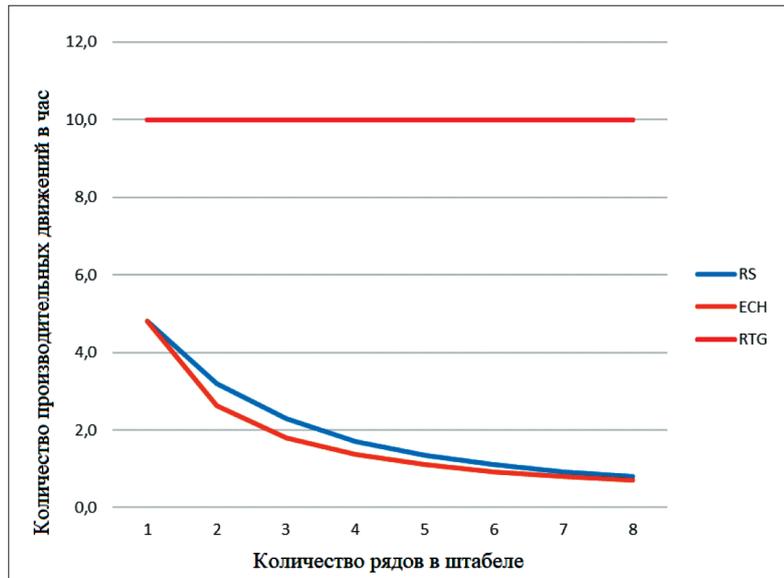


Рис. 10. Коммерческая производительность в различных системах

Обычно не составляет труда получить от экономических служб предприятия данные о стоимости 1 ч работы оборудования. Если эти данные имеются, то можно оценить себестоимость одного коммерческого движения в различных системах. Для примера можно использовать усредненные данные о стоимости часа, приведенные в следующей таблице:

**Примерная стоимость мото-часа различного технологического оборудования**

Технологическое оборудования		RTG	RS	ECH
Стоимость работы	долл./мото-ч	24	21	18

В этом случае указанная себестоимость будет такой, как показано на рис. 11.

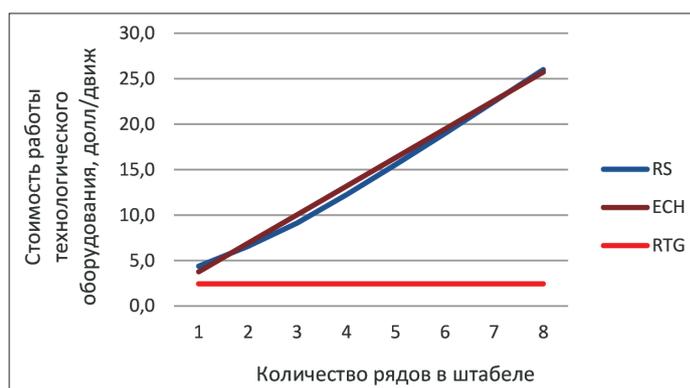


Рис. 11. Изменение стоимости выборки целевого контейнера с ростом ширины штабеля

При малой высоте складирования ричстакер как технологическая машина имеет преимущество перед фронтальным погрузчиком, которое объясняется его способностью работать во втором ряду через первый. С увеличением ширины штабеля это преимущество утрачивается вследствие более высокой стоимости часа работы и большого количества непроизводительных движений.

Выполненные аналитические (комбинаторные) исследования касались чисто случайных механизмов выборки контейнеров из штабеля. Специалистам, работающим на контейнерных терминалах, известен тот факт, что «горячие ящики» (контейнеры, требуемые к вывозу) имеют

тенденцию «тонуть» в штабеле, опускаясь к его основанию и постепенно покрываясь «холодными ящиками», прибывшими позже и находящимися в штабеле в течение всего срока хранения. Считается, что этот эффект увеличивает трудоемкость выборки и поэтому требует отдельного рассмотрения.

### Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Во многих случаях сложное поведение больших систем является результатом взаимодействия совокупности простых процессов. Идентификация и результативное изучение этих механизмов требуют фундаментального методологического подхода, развивающего представления от простого к сложному.

2. Проблема селективности контейнеров в штабеле хорошо известна и обсуждаема, однако полученные к настоящему времени результаты не могут считаться ее окончательным решением.

3. Данное исследование посвящено изучению первичных комбинаторных механизмов, отвечающих за трудоемкость селективности контейнеров в штабеле, различающихся принципами работы технологического оборудования. Исследование в качестве результата предлагает простые математические зависимости, которые могут использоваться в теоретических и практических целях при изучении операций контейнерных терминалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borgman B.* Online rules for container stacking / B. Borgman, E. van Asperen, R. Dekker // *OR spectrum*. — 2010. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 687–716.
2. *Saanan Y. A.* Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 1 / Y. A. Saanan, R. Dekker // *Port Technology International*. — 2007. — Vol. 31. — Pp. 87–92.
3. *Sanen Y. A., Dekker R.* Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 2 // *Port Technol Int* 2007. — 2007. — T. 32. — С. 80-85.
4. *Кириченко А. В.* Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 412 с.
5. *Валькова С. С.* Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
6. *Rekik I.* A case based heuristic for container stacking in seaport terminals / I. Rekik, S. Elkosantini, H. Chabchoub // *Advanced Engineering Informatics*. — 2018. — Vol. 38. — Pp. 658–669. DOI: 10.1016/j.aei.2018.08.016.
7. *Kuznetsov A. L.* Evaluation of sinking effect in container stack / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2020. — Vol. 14. — No. 1. — Pp. 159–162. DOI: 10.12716/1001.14.01.19.
8. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.
9. *Vis I. F. A.* A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal / I. F. A. Vis // *International Journal of Production Economics*. — 2006. — Vol. 103. — Is. 2. — Pp. 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.
10. *Wiese J.* A survey of container terminal characteristics and equipment types / J. Wiese, N. Kliwer, L. Suhl // *Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University*. — 2009. — Working Paper 0901.
11. *Gosasang V.* Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port / V. Gosasang, T. L. Yip, W. Chandraprakaikul // *Maritime Business Review*. — 2018. — Vol. 3. — No. 1. — Pp. 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.

12. Кузнецов А. Л. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.

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

## REFERENCES

1. Borgman, Bram, Eelco van Asperen, and Rommert Dekker. “Online rules for container stacking.” *OR spectrum* 32.3 (2010): 687–716. DOI: 10.1007/s00291-010-0205-4.

2. Saanen, Y. A., and R. Dekker. “Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 1.” *Port Technology International* 31 (2007): 87–92.

3. Saanen, Y. A., and R. Dekker. “Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 2.” *Port Technology International* 32 (2007): 80–85.

4. Kirichenko, A. V., et al. *Morskaya konteiner'naya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.

5. Valkova, Svetlana S. “Stochastic method for sea port storage capacity calculation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

6. Rekik, Ines, Sabeur Elkosantini, and Habib Chabchoub. “A case based heuristic for container stacking in seaport terminals.” *Advanced Engineering Informatics* 38 (2018): 658–669. DOI: 10.1016/j.aei.2018.08.016.

7. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. D. Semenov. “Evaluation of sinking effect in container stack.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14.1 (2020): 159–162. DOI: 10.12716/1001.14.01.19.

8. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Andrei Stanislavovich Tkachenko, and German Borisovich Popov. “Simulation modelling as a dry cargo terminals’ calculation tool.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.

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

10. Wiese, Jörg, Natalia Kliewer, and Leena Suhl. “A survey of container terminal characteristics and equipment types.” *Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University* (2009). Working Paper 0901.

11. Gosasang, Veerachai, Tsz Leung Yip, and Watcharavee Chandraprakaikul. “Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port.” *Maritime Business Review* 3.1 (2018): 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.

12. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. “The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.

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

## 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](mailto:thunder1950@yandex.ru), [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

**Радченко Анна Александровна** — инженер  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

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

**Radchenko, Anna A.** — Engineer  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 7 июля 2020 г.*

*Received: July 7, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-683-691

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR A TELECOMMUNICATION AUTOMATED SYSTEM FOR ORGANIZING THE VESSEL TRAFFIC

**V. V. Karetnikov, A. I. Menshikov, S. V. Rudikh**

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

*A continuation of research on the development of an automated telecommunication traffic routing system in the Svirsky district of hydraulic structures and shipping of the inland waterways Volga-Baltic basin is presented in the paper. The work is aimed at solving the problems assigned to the transport industry by the Government of the Russian Federation, with particular attention being paid to automation of the transport industry, as well as to the main forward-looking areas of information technology development and digitalization of the Russian Federation inland waterways. According to the direction of the Russian Government dated July 28, 2017 No. 1632-r, the program "Digital Economy of the Russian Federation" was adopted. The main principles of this program include the introduction of elements of the digital economy into the fleet, with special attention to the inland waterways. At the moment, Fedor V. Shishlakov, which is the head of the Volga-Balt Administration, notes the readiness to introduce automated systems based on electronic cartography methods. To solve the problems associated with the organization of ship traffic, the development and implementation of systems using the principles of queuing theory is proposed. The analysis of statistics on cargo turnover and ship lock operations is made; issues of increasing the capacity of the Nizhne-Svirsky lock are mentioned. When constructing algorithms for the queuing system functioning and developing abovementioned system, it is proposed to take into account the main operational characteristics of the transport fleet, inland waterways, and navigable hydraulic structures. Based on the analysis of statistical data, the irregularities of the passage on the Volga-Baltic waterway are determined, which is also proposed to be taken into account in the calculations related to the characteristics and elements of queuing theory. The values of the queuing theory elements are calculated. The basic principles of construction and operation of the electronic queue are used in the work.*

*Keywords: Volga-Baltic basin, queuing theory, digitalization, information technology, vessel traffic system.*

### For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Aleksandr I. Menshikov, and Sergey V. Rudy'kh. "Development of algorithms for a telecommunication automated system for organizing the vessel traffic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 683–691. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-683-691.

**УДК 528.088**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ

**В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых**

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

*Данная работа является продолжением исследований по разработке телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов в Свирском районе гидросооружений и судоходства Волго-Балтийского бассейна внутренних водных путей. Предлагаемое исследование направлено на решение задач, сформулированных для транспортной отрасли Правительством РФ, при этом особое внимание уделено вопросам автоматизации транспортной отрасли, а также основным перспективным направлениям развития информационных технологий и цифровизации внутренних водных путей РФ. Согласно Распоряжению Правительства России от 28.07.2017 № 1632-р, принята программа «Цифровая экономика Российской Федерации», к основным принципам которой относится внедрение элементов цифровой экономики в работу флота, при этом особое внимание уделяется внутренним водным путям.*

Для решения задач, связанных с организацией движения судов, предлагается разработка и внедрение систем, использующих принципы теории массового обслуживания и теории очередей. Выполнен анализ статистики грузооборота и операций по шлюзованию судов, затронуты вопросы повышения пропускной способности Нижнесвирского шлюза. При построении алгоритмов функционирования системы массового обслуживания и разработке ТАСОД предлагается учитывать основные эксплуатационные характеристики внутренних водных путей, судоходных гидротехнических сооружений и транспортного флота. На основе анализа статистических данных определены неравномерности судопропуска на Волго-Балтийском водном пути, что также предлагается учитывать в расчетах, связанных с характеристиками и элементами систем массового обслуживания, также выполнен расчет значений элементов теории массового обслуживания. Для обеспечения телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов в работе использованы базовые принципы построения и функционирования электронной очереди.

*Ключевые слова:* Волго-Балтийский бассейн, теория массового обслуживания, цифровизация, инновационные технологии, система организации движения.

**Для цитирования:**

Каретников В. В. Исследование вопросов разработки алгоритмов функционирования телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов / В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 683–691. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-683-691.

### Введение (Introduction)

Начиная с 2017 г. особое внимание уделяется вопросу внедрения информационных технологий и повышению уровня цифровизации в Российской Федерации. В частности, в 2018 г. на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ–2018) было заявлено о необходимости цифровизации транспортной отрасли. Там же, в присутствии министра транспорта РФ, было подписано соглашение о создании ассоциации «Цифровой транспорт и логистика»<sup>1</sup>, главной целью которой является создание и развитие единого мультимодального цифрового транспортного и логистического пространства на всей территории Российской Федерации в интересах участников транспортного рынка и развития логистики на основе новых цифровых технологий, включая инновационные отечественные разработки и современное программное обеспечение.

В 2018 г. на конференции «Морской и речной транспорт — системный элемент магистральной инфраструктуры», отмечалось, что для повышения эффективности использования и конкурентоспособности водного транспорта отрасли будут выделены достаточные инвестиции. Поскольку водный транспорт является для России перспективным направлением развития, особое внимание следует уделить инновационным цифровым технологиям и платформам, что позволит системе оставаться прозрачной и доступной.

В выступлении на XII Международном форуме «Транспорт России»<sup>2</sup> министр транспорта РФ Е. И. Дитрих отметил, что три из девяти федеральных проектов комплексного плана модернизации инфраструктуры касаются проблематики водного транспорта. Помощник Президента РФ И. Е. Левитин указал, что одним из инвестиционно-привлекательных проектов является развитие внутренних водных путей (ВВП), однако это предполагает долговременные инвестиции сроком 10–15 лет, поэтому необходима уверенность в их конкурентоспособности. На форуме деловой программы Riverport «Ехро–2019» были определены актуальные вопросы стратегического развития ВВП РФ, их инвестиционные стратегии развития и приоритетные проекты. Особенно следует отметить обсуждение вопроса цифровизации и автоматизации управления движением на ВВП [1].

В настоящее время представители наиболее передовых администраций бассейнов ВВП РФ заявляют о своей готовности к внедрению цифровых автоматизированных систем. Ранее изложенное свидетельствует об актуальности внедрения элементов цифровой экономики в работу внутреннего водного транспорта (ВВТ) и инфраструктуру ВВП. На ВВП, особенно в шлюзованных

<sup>1</sup> Морской и речной транспорт — системный элемент магистральной инфраструктуры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rus-shipping.ru/ru/stats/?id=783&print=1> (дата обращения: 10.01.2020).

<sup>2</sup> XII Международный форум и выставка «Транспорт России» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/press-center/news/8930> (дата обращения: 10.01.2020).

системах, для обеспечения эффективного транспортного процесса ключевая роль отводится диспетчерскому регулированию движения флота. При этом на персонал диспетчерской службы возложена большая ответственность за принятие решений, связанных с обеспечением безопасности движения судов, что при значительном судообороте создает существенное психоэмоциональное давление, способствующее негативному воздействию на человека. Предложенная в исследовании [2] телекоммуникационная автоматизированная система организации движения судов поможет снизить нагрузку на диспетчеров и в существенной мере снизить влияние неблагоприятных факторов. Следует отметить, что в настоящее время габариты судового хода на основной трассе позволяют беспрепятственно осуществлять проход судов с осадкой 360 см, а в многоводные годы — даже с повышенной осадкой.

Установлены следующие плановые сроки начала действия шлюзов и средств навигационного оборудования (СНО) на Волго-Балтийском водном пути: начало — 30 апреля, окончание — 15 ноября. В случае благоприятных погодных условий и заинтересованности судовладельцев работа шлюзов и действие СНО может начинаться ранее плановой даты начала и заканчиваться после плановой даты окончания. Согласно имеющейся статистике, в навигацию 2018 г. объем грузоперевозок по ВВП Волго-Балта составил 16,2 млн т. В 2018 г. для прохода пассажирских судов пр. 301 и 302 были обеспечены габариты судового хода на р. Волхов (от устья до г. Старая Ладога), где начало эксплуатации нового пассажирского причала благоприятным образом отразилось на увеличении пассажирских перевозок. Так, причал в Старой Ладоге, сразу став востребованным для захода пассажирских круизных судов, принял в навигацию 2018 г. принял более 7 тыс. пассажиров.

В 2019 г. судопропуск на Волго-Балтийском водном пути начался 30 апреля и завершился 19 ноября, было выполнено 19,5 тыс. рейсов судов, которые обеспечили перевозку 15,8 млн т грузов и 349 тыс. пассажиров. Для обеспечения безопасности судоходства на водных путях Волго-Балта в 2019 г. обслуживалось 2182 плавучих и 2390 береговых СНО. В 2019 г. шлюзы Волго-Балтийского канала произвели 35095 шлюзований, пропустив 62162 судов [3]. Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что создание систем электронной очереди в Волго-Балтийском бассейне представляется весьма актуальной научной задачей, решение которой может быть основано на алгоритмах теории массового обслуживания.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для организации движения, функционирующего на основе алгоритмов теории массового обслуживания, необходимо определить следующие характеристики на основании данных табл. 1:

- входной (входящий) поток заявок (средняя интенсивность поступления заявок в статистическую модель);
- механизм обслуживания (количество заявок, которые могут обслуживаться одновременно и распределение длительности обслуживания).
- дисциплина обслуживания (порядок выбора заявки на обслуживание).

Таблица 1

Обозначение терминов теории массового обслуживания

Термин	Обозначение
1. Количество каналов обслуживания	$n$
2. Интенсивность входящего потока заявок	$\lambda$
3. Интенсивность потока обслуженных заявок, выходящего из одного канала	$\mu$
4. Приведенная интенсивность потока заявок	$\rho$
5. Абсолютная пропускная способность системы массового обслуживания (СМО)	$A$
6. Относительная пропускная способность СМО	$q$

**Входной (входящий) поток заявок.** Для того, чтобы определить входной поток, необходимо установить вероятностный закон, задающий последовательность поступления требований на обслуживание, а также установить количество этих требований в каждом поступлении. Как правило, при этом используется понятие «вероятностное распределение моментов поступления требований». Существуют единичные и групповые требования. Под групповыми требованиями обычно понимают систему обслуживания с параллельно-групповым обслуживанием.

Для описания потока заявок в общем случае необходимо задать:

$T = t_k - t_{k-1}$  — интервалы времени между соседними моментами  $t_{k-1}$  и  $t_k$  поступления заявок с порядковыми номерами  $k - 1$  и  $k$  соответственно ( $k = 1, 2, \dots$ ;  $t_0 = 0$  — начальный момент времени);

$\lambda(t)$  — интенсивность потока заявок (количество заявок, поступивших в единицу времени);

$1/\mu$  — среднее время обслуживания одной заявки [4].

Согласно расчетам, выполненным начальником отдела диспетчерского регулирования Вытегорского района гидросооружений ФБУ «Администрация «Волго-Балт» А. В. Армеевым в 2010 г., среднесуточное время судопропуска за июнь составило в среднем 15 ч 30 мин, среднее время простоев шлюзованных систем в ожидании судопропуска — 7 ч 8 мин. В августе среднесуточное время судопропуска составило 18 ч 50 мин, а среднее время простоев — 3 ч 50 мин соответственно. Аналогично рассчитана статистика по холостым шлюзованиям при отсутствии встречных судов — 40–50 мин. Такое же значение было получено при пропуске пассажирских судов. Время на профилактику шлюзов составило 10–15 мин. В случае иных причин простоев получено значение 20–30 мин [5].

Для определения величины интенсивности потока заявок  $\lambda(t)$  за 1 ч выполним расчет на примере ранее приведенных данных согласно формуле продолжительности одиночного шлюзования в однокамерном шлюзе:

$$t_{\text{шл}} = t_{\text{вв}} + t_{\text{ТО}} + t_{\text{вд}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{вв}}$  — продолжительность ввода судна в камеру шлюза, мин;

$t_{\text{ТО}}$  — технические операции в камере (открытие-закрытие ворот, швартовка-отшвартовка, наполнение-опорожнение камеры), мин;

$t_{\text{вд}}$  — продолжительность вывода судна из камеры шлюза, мин.

Время ввода судов в шлюз и вывода из него определяется в зависимости от скорости и длины пути их движения. Продолжительность технических операций при шлюзовании одиночного судна (состава) в камере шлюза практически не зависит от типа судна. Среднее значение для Единой глубоководной системы европейской части России составляет 16–18 мин<sup>1</sup>, к этому времени необходимо добавить время учалки судна —  $t_{\text{уч}} = 2$  мин. Продолжительность *ввода – вывода* зависит от способа судопропуска (односторонний или двухсторонний), характеристик самого шлюза и шлюзуемых объектов [6]. Для выполнения расчетов времени шлюзования рекомендуется использовать значения, приведенные в табл. 2 согласно СНиП 2.06.07–87.

Расчет выполнен на примере камеры Нижнесвирского шлюза:

$$t_{\text{вв}} = \frac{1,4L_{c,ef}}{V_{\text{вв}}}; \quad (2)$$

$$t_{\text{вд}} = \frac{1,1L_{c,ef}}{V_{\text{вд}}}, \quad (3)$$

где  $L_{c,ef}$  — полезная длина камеры (для Нижнесвирского шлюза  $L_{c,ef} = 198$  м);

$V_{\text{вв}}$  и  $V_{\text{вд}}$  — соответственно скорость ввода и вывода шлюзуемого судна в камеру; принимается согласно СНиП 2.06.07–87.

<sup>1</sup> Гладков Г. Л. Водные пути и гидротехнические сооружения [Текст]: учебник для вузов / Г. Л. Гладков [и др.]. СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2011. С. 391.

Таблица 2

**Средние скорости движения судов на внутренних водных путях  
 в шлюзе и на подходах к нему**

Шлюзуемый объект	Средняя скорость движения, м/с		
	Вход	Выход	Переход из одной камеры в другую
Скоростные суда	2,0	3,0	1,50
Самоходные суда	1,0	1,4	0,75
Толкаемые составы	0,9	1,2	0,75
Буксируемые составы	0,7	1,0	0,60
Плоты	0,6	0,6	0,50

Для выполнения расчета выберем характеристики наиболее распространенного шлюзуемого объекта Нижнесвирского шлюза — самоходного судна:

$$t_{\text{вв}} = \frac{1,4 \cdot 198}{1} = 277 \text{ с} = 4,6 \text{ мин};$$

$$t_{\text{вд}} = \frac{1,1 \cdot 198}{1,4} = 155 \text{ с} = 2,6 \text{ мин}.$$

Согласно выполненному расчету, общее время шлюзования одиночного самоходного судна может варьироваться в пределах 25–27 мин. В соответствии с проектными характеристиками Нижнесвирского шлюза, время наполнения камеры составляет 9,5 мин, время опорожнения — 9,3 мин. Согласно круизному информационному агентству [7], общее время шлюзования одного судна составляет приблизительно 28 мин, двух — приблизительно 34 мин. В шлюзах № 1–6 Волго-Балтийского канала, среднее число судов в шлюзуемой группе составляет 1,80–1,86 ед., в Нижнесвирском шлюзе — 1,20–1,28 ед. [8]. Необходимо рассчитать среднее время шлюзования на единицу судна с учетом среднего числа судов в шлюзуемой группе. Значение составляет 25 мин. При средней загруженности шлюза 15 ч 30 мин/сут в июле и 18 ч 50 мин/сут в августе получим среднюю загруженность, равную 1030 мин/сут. Полученную величину следует разделить на среднее время шлюзования, необходимое для одного судна  $m = 41$  судно/сут, где  $m$  — количество судов/сут. Иными словами, заявка поступает каждые 35 мин, следовательно,  $\lambda(t) = 1,7$ .

Согласно теории массового обслуживания, в одноканальной системе (шлюз, причал) простой заявок на обслуживание значительно возрастают при превышении загруженности системы обслуживания значения 50 % ( $>0,5$ ), а при значении  $> 0,8$  начинается обвальное увеличение времени ожидания обслуживания. Зависимость коэффициента ожидания шлюзования от степени занятости шлюзов ВБВП (Нижнесвирского и шлюзов № 1 и 6 Северного склона), а также теоретическая кривая приведены в источнике [8].

*Механизм обслуживания.* Анализ статистики равномерности подхода судов к шлюзам Волго-Балтийского канала, свидетельствует о различных результатах. Так, начальник отдела диспетчерского регулирования Вытегорского района А. В. Армеев рассчитал коэффициент неравномерности подхода судов, который составил  $\varphi = 1,349$ , а согласно СНиП 2.06.07–87, в проектных расчетах обычно принимают  $\varphi = 1,3$ .

Среднесуточный грузооборот в наиболее напряженный период навигации по каждому виду перевозок определяется как отношение навигационного грузооборота к длительности навигации, сут, умноженное на коэффициент неравномерности подхода судов и плотов к шлюзам, принимаемый по данным анализа проектируемого грузооборота. При отсутствии таких данных коэффициент неравномерности допускается принимать: для судов — 1,3; для плотов — 1,7.

*Неравномерность перевозок по времени* определяется коэффициентом неравномерности ( $K_{\text{нер}}^{\text{вр}}$ ), рассчитываемым в виде следующих отношений:

– максимального месячного объема перевозок к среднемесячному за год:

$$K_{\text{нер}}^{\text{вр}} = \frac{\sum P_{\text{мес}}^{\text{max}}}{\sum P_{\text{мес}}}; \quad (4)$$

– объема перевозок каждого месяца к среднемесячному:

$$K_{\text{нер}}^{\text{вр}} = \frac{\sum P_i}{\sum P}; \quad (5)$$

– максимального месячного объема перевозок к минимальному:

$$K_{\text{нер}}^{\text{вр}} = \frac{\sum P_{\text{max}}}{\sum P_{\text{min}}}. \quad (6)$$

Коэффициенты неравномерности, вычисленные по формулам (4) и (6), обычно больше единицы и только в случаях идеальной равномерности могут быть равны единице. Коэффициент неравномерности, вычисленный по формуле (5), также называется *индексом сезонности* и может быть как больше, так и меньше единицы.

Судоходные шлюзы на р. Свирь являются однокамерными однопунктовыми, поэтому число каналов обслуживания  $n$  предлагается принять равным единице. С другой стороны, поскольку допускается вариант совместного шлюзования судов, необходимо задать параметр требуемого пространства канала обслуживания  $n$  для судов в зависимости от их типа и размера. Варианты шлюзований рассчитаны на примере Нижнесвирского шлюза, полезные габариты камеры: длина 198 м, ширина 21,5 м.

Существуют три варианта размещения судов в камере шлюза: поочередный, траверзный и смешанный. При траверзном варианте шлюзования (рис. 1) сухогрузные суда могут быть поставлены в камере на траверзе танкера при условии, что интервал между их бортами будет не менее 1 м. Это, согласно информации о размерах судов, даст возможность полезную ширину до 20,5 м. Данная ширина не позволит шлюзоваться этим способом ни одной комбинацией судов, приведенных в табл. 3, поэтому предлагается использовать поочередный вариант шлюзования (рис. 2).

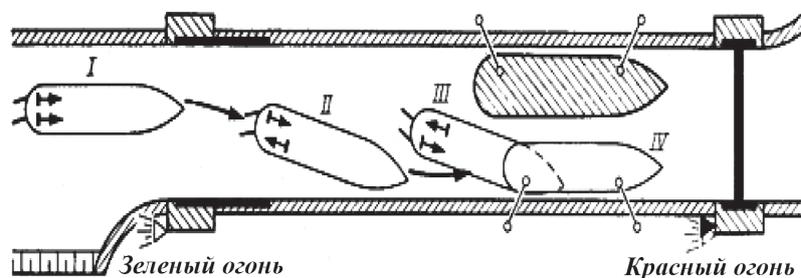


Рис. 1. Схема размещения судна в камере шлюза на траверзе

Таблица 3

**Габаритные характеристики сухогрузных судов,  
используемых для перевозок в Северо-Западном регионе**

Параметры	Проекты судов								
	Волго-Балт	Балтийский	Волго-Дон	RSD49	Русич	Омский	СТ	СТК	RSD54
Длина наибольшая, м	114	95	138,3	139,95	128,2	108,4	86,7	82	115
Ширина габаритная, м	13,2	13,2	16,7	16,50	16,74	15	12	11,9	16,5
Осадка	3,6	3,4	3,6	3,6	3,6	3,3	3	3,18	3,6

Для удобства расчетов предлагается ввести коэффициент заполненности канала (КЗК) по длине. При этом КЗК определяется как отношение длины судна к полезной длине камеры шлю-

за. Например, в случае размещения судна длиной 114 м КЗК будет рассчитан следующим образом:  $114 \text{ м} / 198 \text{ м} = 0,58$ . Соответственно судно, с которым шлюзуется первое судно, должно иметь коэффициент не более 0,32.

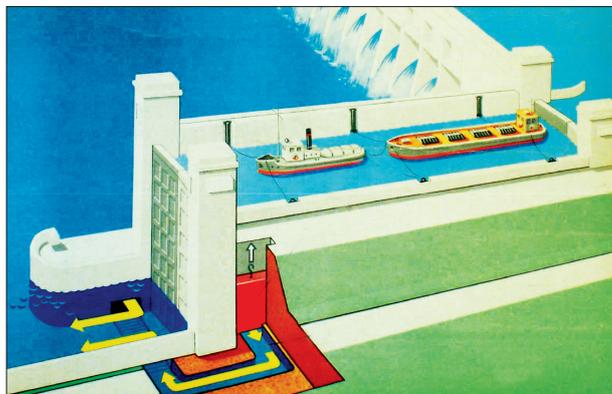


Рис. 2. Схема размещения судна в камере шлюза поочередно

### Результаты (Results)

Дисциплина обслуживания для телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения, исходя из характеристик Нижнесвирского шлюза, будет определена как одноканальная СМО с ожиданием (очередью). Заявка в данной системе, поступившая, когда канал занят, становится в очередь до момента освобождения канала. Когда канал освобождается, одна из заявок, стоящих в очереди, принимается к обслуживанию [9], [10]. Определение критериев для формирования электронной очереди судов на подходе к шлюзу выполняется в соответствии с исследованием [11]. При совместном шлюзовании необходимо, чтобы первыми были размещены и пришвартованы нефтеналивные самоходные суда. Сухогрузные суда в случае варианта траверзного размещения могут быть поставлены в камере шлюза на траверзе нефтеналивного самоходного судна при условии, что интервал между их бортами будет не менее 1 м. Пассажирские скоростные суда должны размещаться в камере шлюза последними.

### Обсуждение (Discussion)

Данная работа является продолжением исследований [2] и [11] по созданию телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов. Согласно данным источников [1], [3], а также результатам актуальных в 2018–2019 гг. конференций и тематических докладов, отмечается существенный интерес как правительства Российской Федерации, администраций, так и компаний, изъявляющих желание инвестировать в информационные технологии существенные ресурсы. Таким образом, для создания системы необходимо решить следующие важные научные задачи:

- организация движения судов на подходе к шлюзам;
- наполнение шлюзовой камеры (очередность подхода судов к шлюзу, расположение в камере).

В данной работе показаны эффективные способы решения этих задач, которые можно учесть при организации управления движением на подходе к Нижне-Свирскому шлюзу.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов [2], [11]–[14] 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.
2. Следует установить необходимые критерии для формирования электронной очереди судов на подходе к шлюзу.

3. Важно определить на определенном участке пути (до подхода судна непосредственно к шлюзу) тип судна. Это позволит подобрать системе наиболее эффективный метод шлюзования.
4. Система организации движения судов должна получать данные о размерах судна (длина, ширина) и его скоростных характеристиках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ряпенко А. И.* Развитие цифровой экономики в России и национальная безопасность / А. И. Ряпенко, А. А. Федоренко, Е. П. Ливкина // *StudNet*. — 2020. — Т. 3. — № 8. — С. 566–574.
2. *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.
3. Завершена навигация-2019 на основной трассе Волго-Балта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://portnews.ru/news/287638/> (дата обращения: 16.01.2020).
4. *Ross S. M.* 8 – *Queueing Theory* / S.M. Ross // *Introduction to Probability Models* (Twelfth edition). — Elsevier Inc., 2019. — Pp. 507–589. DOI: 10.1016/b978-0-12-814346-9.00013-5.
5. Поиск экономических резервов ведет ГБУ «Волго-Балт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rus-shipping.ru/ru/stats/?id=40> (дата обращения: 17.02.2020).
6. *Бондаренко А. В.* Методика выбора оптимального состава буксирного обеспечения порта / А. В. Бондаренко, В. А. Некрасов, А. П. Ястреба // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 4(32). — С. 43–52.
7. Нижнесвирский шлюз [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://cruiseinform.ru/places/nizhne-svirskiy-gidrouzel/shlyuz-nizhne-svirskoy-ges/> (дата обращения: 04.02.2020).
8. *Шишкин А. А.* Повышение эффективности использования флота в шлюзованных системах: диссертация канд. техн. наук: 05.22.19 / Александр Алексеевич Шишкин [Место защиты: Волж. гос. акад. вод. трансп.]. — Н. Новгород, 2011. — 139 с.
9. *Толстых Н. Д.* Система массового обслуживания, ее основные принципы и понятия / Н. Д. Толстых, С. А. Учватов // *APRIORI*. Серия: Естественные и технические науки. — 2015. — № 6. — С. 39.
10. *Евдонин Г. А.* Моделирование систем массового обслуживания с взаимопомощью каналов (на примере телекоммуникационной компании) / Г. А. Евдонин, Е. Н. Попова, Е. И. Тагильцева // *Управленческое консультирование*. — 2013. — № 1 (49). — С. 109–114.
11. *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.
12. *Васин А. В.* Моделирование оптимальной конфигурации морского порта / А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
13. *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.
14. *Karetnikov V.* Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways / V. Karetnikov, G. Chistyakov, E. Ol'khovik // *E3S Web of Conferences*. — EDP Sciences, 2020. — Vol. 157. — Pp. 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

#### REFERENCES

1. Ryapenko, A. I., A. A. Fedorenko, and E. P. Livkina. “Digital economy development in Russia and national security.” *StudNet* 3.8 (2020): 566–574.
2. 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.
3. Zavershena navigatsiya-2019 na osnovnoi trasse Volgo-Balta. Web. 16 Jan. 2020 <<https://portnews.ru/news/287638/>>.

4. Ross, Sheldon M. “8 – Queueing Theory.” *Introduction to Probability Models (Twelfth edition)*. Elsevier Inc., 2019. 507–589. DOI: 10.1016/b978-0-12-814346-9.00013-5.
5. Poisk ekonomicheskikh rezervov vedet GBU «Volgo-Balt». Web. 17 Feb. 2020 <<https://www.rus-shipping.ru/ru/stats/?id=40>>.
6. Bondarenko, A. V., V. A. Nekrasov, and A. P. Yastreba. “Methodology of selection of optimal structure of the fleet harbour tug.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 43–52.
7. Nizhnesvirskii shlyuz. Web. 4 Feb. 2020 <<http://cruiseinform.ru/places/nizhne-svirskiy-gidrouzel/shlyuz-nizhne-svirskoy-ges/>>.
8. Shishkin, A. A. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya flota v shlyuzovannykh sistemakh. PhD diss. Nizhnii Novgorod, 2011.
9. Tolstykh, Nikita Denisovich, and Sergey Andreevich Uchvatov. “System of mass service, its basic principles and concepts.” *APRIORI. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* 6 (2015): 39.
10. Evdonin, Guennady Aleksandrovich, Ekaterina Nikolaevna Popova, and Elena Igorevna Tagiltseva. “Modeling of system of mass service with mutual aid of channels (on the example of the telecommunication company).” *Administrative Consulting* 1(49) (2013): 109–114.
11. 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.
12. Vasin, Andrei V., Dmitrii S. Zakharov, and Leonid V. Annenkov. “Modeling the optimal seaport configuration.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
13. 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.
14. Karetnikov, Vladimir, Gleb Chistyakov, and Evgeniy Ol'khovik. “Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways.” *E3S Web of Conferences*. Vol. 157. EDP Sciences, 2020. 2010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

**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\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru),  
[spguwc-karetnikov@yandex.ru](mailto: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](mailto: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\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@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\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru),  
[spguwc-karetnikov@yandex.ru](mailto: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](mailto: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\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 17 июля 2020 г.  
 Received: July 17, 2020.

## DESIGNING THE EDUCATIONAL OBJECTIVES FOR “RISK ASSESSMENT IN SEAFARING” COURSE USING BLOOM’S TAXONOMY

**V. A. Loginovsky**

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

*In 2019, the International Association of Maritime Universities submitted to International Maritime Organization (IMO) its publication under the title of «Global Maritime Professional: Body of Knowledge». The publication sets out the guidelines for the promotion of Bloom’s modified taxonomy in the cognitive and affective areas of educational activity, as well as Simpson’s taxonomy in the psychomotor area for designing curriculums in Maritime Education and Training field. Bloom’s taxonomy has widely established in the world as an effective tool for setting educational objectives and assessing the results of education. The IMO’s Human Element, Training and Watchkeeping (HTW) Subcommittee currently considers the inclusion of Bloom’s taxonomy in developing the STCW’78 Convention model courses. The application of Bloom’s taxonomy for mastering the «Risk Assessment in Seafaring» course, hold by Navigation Department of «Maritime Academy» (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping), is analyzed in the paper. The functions of participants involved into educational process in terms of Bloom’s cognitive levels are also examined and the degree of difficulty in mastering the course material by students depending on the hierarchy of cognitive levels is analyzed in the paper. It helps to obtain feedback for the correction of the course teaching methodology and its adaptation to students’ contingent, as well as illustrates the relationship of Bloom’s cognitive levels with the planned learning outcomes of “Risk Assessment in Seafaring” course and with a formal safety assessment algorithm, used as a basis for the development of ship forms for risk assessment and decision making.*

*Keywords: maritime education, training, risk assessment, formal safety assessment, Bloom’s taxonomy, cognitive domain.*

**For citation:**

Loginovsky, Vladimir A. “Designing the educational objectives for “Risk assessment in seafaring” course using Bloom’s taxonomy.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 692–702. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-692-702.

**УДК 656.61.052 656**

## РАЗРАБОТКА УЧЕБНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ОЦЕНКА РИСКА В МОРЕПЛАВАНИИ» НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ БЛУМА

**В. А. Логиновский**

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

*Выполнен анализ представленной в Международную морскую организацию (ИМО) в 2019 г. Международной ассоциацией морских университетов (International Association of Maritime Universities) методической разработки «Глобальный морской профессионал: Свод знаний» (Global Maritime Professional: Body of Knowledge). Отмечается, что в этом издании изложены рекомендации по продвижению модифицированной классификации (таксономии) Блума в когнитивной и аффективной областях образовательной деятельности, а также классификации Симпсона в психомоторной области для разработки университетских учебных программ подготовки морских специалистов. Подчеркивается, что классификация Блума зарекомендовала себя в мире как эффективный инструмент постановки образовательных целей и оценки результатов подготовки специалистов. В настоящее время в Подкомитете по человеческому фактору, подготовке и несению вахты ИМО, (Human Element, Training and Watchkeeping, HTW) обсуждается вопрос о включении классификации Блума в разработку модельных курсов по Конвенции ПДНВ’78 с поправками. В статье проанализированы результаты применения классификации Блума для освоения дисциплины «Оценка риска в мореплавании», преподаваемой курсантам-судоводителям на кафедре навигации инсти-*

туда «Морская академия» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, а также рассмотрены функции участников учебного процесса с точки зрения когнитивных уровней по Блуму, выполнен анализ степени сложности освоения материала курсантами в зависимости от иерархии когнитивных уровней, что помогает получить обратную связь для корректировки методики преподавания курса и ее адаптации к контингенту курсантов. Проиллюстрирована зависимость когнитивных уровней по Блуму с планируемыми результатами обучения по курсу «Оценка риска в мореплавании» и с алгоритмом формализованной оценки безопасности, применяемыми в качестве основы для разработки судовых форм оценки риска и принятия решений.

**Ключевые слова:** морское образование, практическая подготовка, оценка риска, формализованная оценка безопасности, таксономия Блума, когнитивная область.

**Для цитирования:**

Логиновский В. А. Разработка учебных целей по дисциплине «Оценка риска в мореплавании» на основе классификации Блума / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 692–702. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-692-702.

**Введение (Introduction)**

В качестве основных образовательных категорий в методической разработке Международной ассоциации морских университетов «Свод знаний» [1] рассмотрены знания, навыки и образовательные траектории, необходимые прежде всего для развития карьеры на море, но дополнительно эта публикация включает рассмотрение других карьерных путей, развитию которых может способствовать обучение в морском учебном заведении. В частности, в ней также представлены рекомендации, которые могут превышать минимальные стандарты компетентности Конвенции ПДНВ-78 с поправками. На рис. 1 показаны уровни образовательных целей по Блуму и рекомендуемый алгоритм разработки учебных программ на основе классификаций Блума и Симпсона [1].

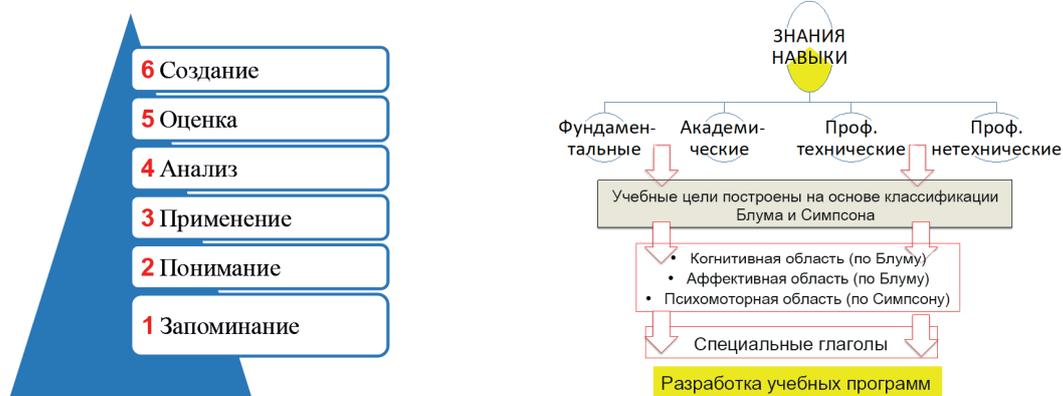


Рис. 1. Уровни по Блуму и алгоритм разработки учебных программ

Особенности применения в учебном процессе специальных глаголов, рекомендуемых в классификации Блума, зависят от используемого рабочего языка, на котором проводится изучение предмета, однако существует достаточно большое количество общих списков таких глаголов, адаптируемых к конкретной области знаний<sup>1,2,3</sup>.

Издание IAMU предлагает приведенную в табл. 1 иерархию уровней подготовки моряков, согласованную с соответствующими профессиональными дипломами, согласно Конвенции ПДНВ-78, и академическими степенями:

<sup>1</sup> Bloom's Taxonomy Verb Chart Posted by Jessica Shabatura. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tips.uark.edu/> (дата обращения: 23.07.2020).

<sup>2</sup> Revised Bloom's Taxonomy Action Verbs. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.apu.edu/live\\_data/files/333/blooms\\_taxonomy\\_action\\_verbs.pdf](https://www.apu.edu/live_data/files/333/blooms_taxonomy_action_verbs.pdf) (дата обращения: 23.07.2020).

<sup>3</sup> Осваиваем «сети и облака». [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://roachinthenet.blogspot.com/2016/01/200\\_21.html#.XxgS7uUmwXo](http://roachinthenet.blogspot.com/2016/01/200_21.html#.XxgS7uUmwXo) (дата обращения: 23.07.2020).

### Уровни подготовки моряков

Уровень подготовки	Квалификация претендента
A	Профессиональный диплом на уровне эксплуатации в соответствии с Конвенцией ПДНВ-78 + академическая степень бакалавра наук
B	Профессиональный диплом на уровне управления в соответствии с Конвенцией ПДНВ-78 + академическая степень бакалавра наук
C	Профессиональный диплом на уровне управления в соответствии с Конвенцией ПДНВ-78 + академическая степень магистра наук
D	Профессиональный диплом на уровне управления в соответствии с Конвенцией ПДНВ-78 + ученая степень кандидата наук (PhD)

Предлагаемая иерархия терминологически напрямую не встраивается в национальные стандарты по подготовке и дипломированию выпускника высшего морского учебного заведения и квалификация выпускника-судоводителя может быть описана как имеющего профессиональный диплом на уровне эксплуатации, в соответствии с Конвенцией ПДНВ-78, и академическую степень специалиста, как приближенный эквивалент степени магистра наук.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка риска включена во многие компетенции командного состава транспортных судов Кодексом ПДНВ-78 и является одной из дисциплин «Свода знаний». Включение оценки риска в Кодекс ПДНВ-78 Манильскими поправками<sup>1</sup> является эффективным и мудрым решением морской общественности, оказывающим значительное влияние на повышение уровня квалификации командного состава судов. Первым и основным этапом оценки риска является умение идентифицировать опасности конкретных видов деятельности на судне. Восприятие риска, знание алгоритмов оценки и управления риском, а также знание и понимание воздействия сопутствующих опасностей на судовые операции оказывает влияние на уровень владения ситуацией моряками, помогая при этом находить эффективные решения в сложных обстоятельствах, и характеризует степень профессионализма во всей их многогранной деятельности на судах.

Предмет «Оценка риска в мореплавании» базируется на концепции формализованной оценки безопасности (ФОБ) и структурированной методике «Что если» (Structured What If Technique, SWIFT) [2]–[4], в которой термин «риск» (R) определяется как комбинация частоты / вероятности происшествия (F) и тяжести его последствий (S). Именно эта концепция заложена в основу оценки и управления риском в мореплавании. Изучение учебного материала вызывает у курсантов определенные трудности в достижении практических целей дисциплины.

Причины возникновения трудностей исходят непосредственно из концепции риска, которая базируется на анализе информации, включающей большое количество сопутствующих неопределенностей и различного рода интерпретаций базовой концепции [5]–[8], а также на различных методах анализа риска [9]. Неопределенности возникают из-за неточности и неполноты данных, их отсутствия или избыточности и поэтому концепция риска использует *вероятностный подход* (прогноз), который не всегда адекватно воспринимается курсантами именно в процессе решения практических задач по оценке риска в судовых операциях. Все это мотивирует необходимость адаптации методики изучения учебного материала в целях повышения эффективности освоения курса и более четкого структурирования курсантами учебных целей.

Одним из известных методов, который может оказать помощь в повышении эффективности курса, является *модифицированная классификация образовательных целей Б. Блума* [10]. Указанный инструмент рекомендует структурировать преподаваемый материал в когнитивной области путем включения соответствующих уровней и образовательных целей, что дает возможность

<sup>1</sup> Международная Конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-1978) с поправками (консолидированный текст). СПб: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. 806 с.

интерпретировать классификацию в рамках требований общепрофессиональной компетенции ОПК-6 стандарта ФГОС 3++ для специалитета<sup>1</sup> и, соответственно, структурировать рабочую программу курса, адаптируя методику преподавания и аттестации курсантов к поставленным целям.

Процедура SWIFT с включением уровней когнитивной области по Блуму позволяет практически отработать концепцию оценки и управления риском, которая является составляющей одного из разделов курса. Алгоритм с подключением уровней, необходимых для его эффективного выполнения (рис. 2), применяется рядом судоходных компаний для создания судовых форм по оценке риска и наглядно иллюстрирует логику процедуры ФОБ.

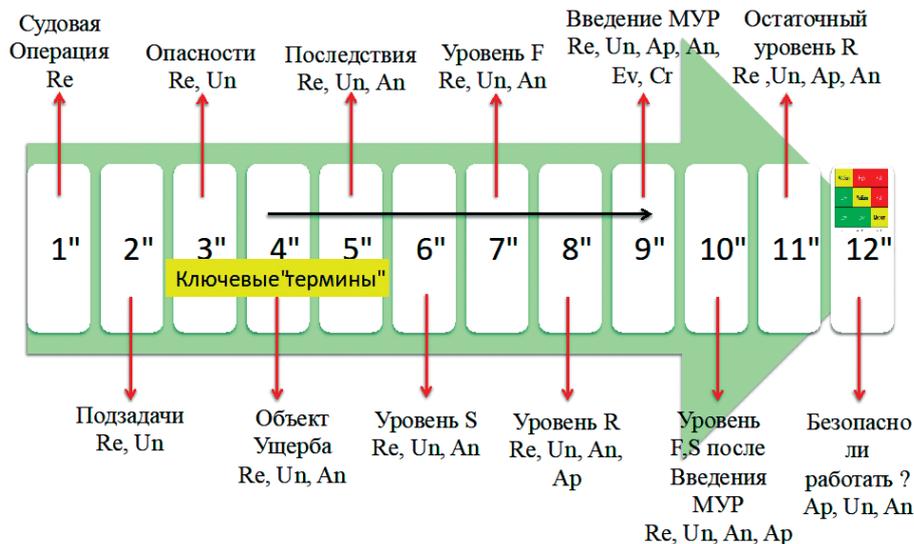


Рис. 2. Согласование алгоритма SWIFT и уровней когнитивной области по Блуму:  
Un — понимание; Ap — применение; An — анализ; Ev — оценка;  
Cr — создание; МУР — меры по управлению риском

В табл. 2 приведены уровни классификации по Блуму и индикаторы достижения профессиональной компетенции ПК-63<sup>2</sup> студентами, включенные в рабочую программу дисциплины.

Таблица 2

**Связь планируемых результатов обучения по дисциплине и уровней по Блуму**

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине	Пересмотренная таксономия Блума: когнитивные уровни
ПК-63: Способен разработать обобщенные варианты решения проблемы, выполнить анализ этих вариантов, прогнозировать последствия, находить компромиссные решения	ИД-1(ПК-63): <b>Знает</b> общий алгоритм оценки риска в судоходстве для принятия решений	<b>Знает</b> общие принципы разработки и построения причинно-следственных алгоритмов для анализа риска	Запоминание
		<b>Умеет</b> разрабатывать причинно-следственные диаграммы «дерево отказов» и «дерево событий»	Запоминание Понимание Применение
		<b>Владеет</b> методикой оценки и анализа суммарного риска от потенциальных происшествий на основе информации, полученной с помощью причинно-следственных диаграмм и других методов	Запоминание Понимание Применение Анализ Оценка

<sup>1</sup> Федеральный государственный стандарт высшего образования. Специалитет по специальности 26.05.05 Судовождение; Утвержден министерством образования и науки РФ 15 марта 2018 г., №191, 25 с. [Элек-тронный ресурс]. – Режим доступа: [http://fgosvo.ru/fgosvo/downloads/1681/?f=%2Fuploadfiles%2FFGOS+VO+3%2B%2B%2FSpec%2F260505\\_C\\_3plus\\_10042018.pdf](http://fgosvo.ru/fgosvo/downloads/1681/?f=%2Fuploadfiles%2FFGOS+VO+3%2B%2B%2FSpec%2F260505_C_3plus_10042018.pdf) (дата обращения: 23.07.2020).

<sup>2</sup> Рабочая программа дисциплины «Оценка риска в мореплавании». Специальность: 26.05.05 «Судовождение». Специализация: «Судовождение на морских и внутренних водных путях». Институт «Морская академия», кафедра «Навигация». ФГБОУ ВО ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. С. 2.

ПК-63: Способен разработать обобщенные варианты решения проблемы, выполнить анализ этих вариантов, прогнозировать последствия, находить компромиссные решения	ИД-2(ПК-63): <b>Умеет</b> провести анализ и сформировать рейтинг потенциальных опасностей при решении проблемы	<b>Знает</b> методы идентификации опасностей, типы необходимой информации и общие принципы ее сбора для оценки и управления риском в судовых операциях	<i>Запоминание</i>
		<b>Умеет</b> адаптировать общие методы идентификации опасностей к оценке риска от потенциального происшествия в судовых операциях и формировать рейтинг потенциальных опасностей	<i>Запоминание Понимание Применение</i>
		<b>Владеет</b> методикой проведения элементарных исследований по оценке риска в судовых операциях на основе алгоритма формализованной оценки безопасности (ФОБ) и разработкой судовых форм по оценке риска	<i>Запоминание Понимание Применение Анализ Оценка Создание</i>
	ИД-3(ПК-63): <b>Знает</b> методику оценки эффективности мер по управлению рисками, выбора компромиссных решений	<b>Знает</b> общий алгоритм оценки эффективности мер по управлению риском на основе ФОБ для принятия решений;	<i>Запоминание</i>
		<b>Умеет</b> формировать рейтинг мер по управлению риском в зависимости от их эффективности	<i>Запоминание Понимание Применение</i>
		<b>Владеет</b> методикой оценки эффективности введения мер по управлению риском при проведении судовых операций	<i>Запоминание Понимание Применение Анализ Оценка</i>

*Примечание.* Шрифтом курсивного начертания отмечены уровни достижения образовательных целей по Блуму, которые согласуются с индикаторами компетенции ПК-63.

В табл. 3–5 приведены функции участников учебного процесса, которыми являются преподаватель и курсант, и в качестве примеров даны возможные вопросы для проверки освоения материала в соответствии с уровнями классификации Блума. В качестве основы для создания проверочных вопросов использованы так называемые специальные глаголы, используемые в классификации Блума.

Таблица 3

**Функции участников учебного процесса (запоминание, понимание)  
по дисциплине «Оценка риска в мореплавании»**

Функции преподавателя при постановке образовательной цели	Критерии освоения материала курсантом	Примерные вопросы и задания для проверки степени освоения материала
<i>Запоминание:</i> – предоставить курсанту информацию в соответствии с рабочей программой дисциплины; – разработать вопросы, которые мотивируют курсанта вспомнить полученную информацию;	Способность воспроизвести (вспомнить) информацию из лекционного материала, учебника, учебного пособия	Как определяется риск в мореплавании? Перечислите термины, включенные в определение риска. Дайте определение термина <i>мера по управлению риском</i> .

<p>– разработать и представить курсантам устные или письменные тексты по предмету, на которые необходимо ответить, вспомнив изученный материал.</p> <p><i>Понимание:</i></p> <p>– разработать вопросы, на которые курсант может ответить своими словами, изложив факты или определив основную идею.</p> <p>– разработать тесты и провести тестирование курсантов для проверки понимания идей изученного материала.</p>	<p>Способность понимать и объяснять основные идеи и концепции изученного материала, а также умение интерпретировать и обобщать их</p>	<p>Какие данные необходимы для оценки риска?          Могут ли быть равны риски от происшествий в различных судовых операциях, если вероятности происшествий разные?          Объясните ответ.          Можно ли определить риск от одного происшествия?          Объясните свой ответ.</p>
--	---	---

Таблица 4

**Функции участников учебного процесса (применение, анализ)  
 по дисциплине «Оценка риска в мореплавании»**

	Функции преподавателя при постановке образовательной цели	Критерии освоения материала курсантом	Примерные вопросы и задания для проверки степени освоения материала
Применение	<p>Разработать вопросы и практические (домашние) задания, дающие курсанту возможность использовать идеи, теории или методы решения проблем, применяя их к новым ситуациям.</p> <p>Организовать работу курсантов, чтобы убедиться, что он / она самостоятельно использует методы решения проблем.</p> <p>Разработать вопросы, которые требуют от курсанта самостоятельной постановки и решения проблем.</p>	<p>Способность применять информацию, а также применить абстрактную идею в конкретной ситуации, чтобы решить проблему</p>	<p>Сформулируйте и решите задачу для оценки риска по формуле <math>R = FS</math>.</p> <p>Напишите матрицу оценки риска, размерностью <math>3 \times 3</math>.</p> <p>Охарактеризуйте одним термином составляющие риска F и S по строкам и столбцам.</p> <p>Оцените уровень безопасности предстоящей судовой операции, если <math>R = 100</math> легких травм на судне в год (низкий, приемлемый, высокий), используя рек: MSC-MEPC.12/Rev.2)</p>
Анализ	<p>Предоставить курсантам время для изучения концепций и идей анализа и разделения их на основные части.</p> <p>Предложить курсантам объяснить, почему они выбрали определенную методику решения проблем и почему это решение сработало.</p> <p>Разработать вопросы и тестирование по данному уровню.</p>	<p>Способность провести контрастно- сопоставительный анализ, т. е. разделить концепцию или идею на части и показать отношения между частями.</p>	<p>Какой подход (качественный или количественный) является наиболее приемлемым для разработки судовых форм по оценке риска?          Объясните свою точку зрения.</p> <p>Напишите последовательность действий в процедуре оценки риска.</p> <p>Сравните в принципе эффективность мер по управлению риском (по вероятности и по тяжести последствий).</p> <p>Какие из них наиболее приемлемы для повышения безопасности судовых операций?</p>

**Функции участников учебного процесса (оценка, создание)  
по дисциплине «Оценка риска в мореплавании»**

Функции преподавателя при постановке образовательной цели		Критерии освоения материала курсантом	Примерные вопросы и задания для проверки степени освоения материала
Оценка	<p>Предоставить курсантам возможность выносить суждения на основе соответствующих критериев.</p> <p>Предложить курсантам продемонстрировать умение обсуждать, критиковать или интерпретировать процессы, методы и т. д., используя <i>установленные</i> стандарты и критерии.</p>	<p>Способность предоставлять аргументы в пользу принятого решения или точки зрения, делать обоснованные суждения о ценности идей или концепций, а также использовать установленные стандарты и критерии для поддержки мнений и взглядов</p>	<p>Какие по вашему мнению существуют «слабые места» в изученных подходах по оценке риска? Перечислите их.</p> <p>Какие критические комментарии вы можете написать по «слабым местам» в оценке риска?</p> <p>Какую информацию для ранжирования опасностей вы можете применить?</p>
	<p>Предоставить курсантам возможность аккумулировать части знаний в единое целое, используя творческое мышление и методы решение проблем.</p> <p>Предложить курсантам задание, дающее возможность продемонстрировать, что они могут комбинировать концепции для создания новых идей, новых ситуаций и концепций.</p>	<p>Способность создать новый продукт или новое видение того или иного явления, обобщить элементы изученной информации для формирования единого целого и построения связей для создания новых ситуаций, идей и концепций</p>	<p>Если вы видите ограничения в применении матрицы риска, то какой альтернативный подход вы можете предложить?</p> <p>Можно ли проверить эффективность введения мер (опций) по управлению риском? Предложите свою идею.</p> <p>Предложите идею оценки и управления навигационным риском, используя упражнения на навигационном тренажере</p>

Для того, чтобы подготовить курсантов к проверке освоения материала в соответствии с классификации Блума по дисциплине «Оценка риска в мореплавании» (раздел «Терминология и методы оценки риска»), было проведено предварительное исследование, имевшее для них общий характер самооценки. Курсанты были ознакомлены с модифицированной классификацией Блума и им были заданы анонимные вопросы в формате 5-разрядной шкалы Лайкерта для выяснения трудностей, с которыми они сталкивались при освоении учебных дисциплин в течение семи семестров обучения в вузе с точки зрения познавательных уровней по Блуму (табл. 6). Трудности в этом вопроснике были интерпретированы как опасности, которые в случае их реализации могли привести или приводили к неудовлетворительной аттестации и были связаны с конкретным уровнем по Блуму. Результаты опроса, суммированные для трех групп 4-го курса факультета «Навигации и связи» института «Морская академия», представлены на рис. 3. Полученная информация имела предварительный характер для дальнейшего исследования. Следующим этапом было проведение опроса для выяснения подготовки курсантов по шести уровням классификации Блума по указанному предмету. Предварительно курсанты должны выполнить домашнее задание на тему: «Оценка риска от неудовлетворительной сдачи зачета / экзамена».

Таблица 6

**Самооценка трудности освоения учебного материала**

Уровень (по Блуму)	Примеры вопросов и заданий по разделу «Терминология и методы оценки риска»	Самооценка степени трудности (отметьте уровень трудности)
Запоминание материала	Дайте определение термина «риск», применяемого в мореплавании	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно
Понимание	Могут ли быть риски от происшествий в различных судовых операциях равны, если вероятности происшествий разные?	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно
Применение	Какое решение о начале судовых работ нужно предпринять, если риск этих работ оценен в «желтой зоне» матрицы риска?	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно
Анализ	Представьте процедуру оценки и управления риском в форме алгоритма	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно
Оценка (сравнение)	В каком случае может потребоваться второе приближение в оценке риска судовой операции?	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно
Создание нового подхода	Сформулируйте самостоятельно и решите любую навигационную задачу, включающую оценку риска	1 — очень легко, 2, 3, 4, 5 — очень трудно

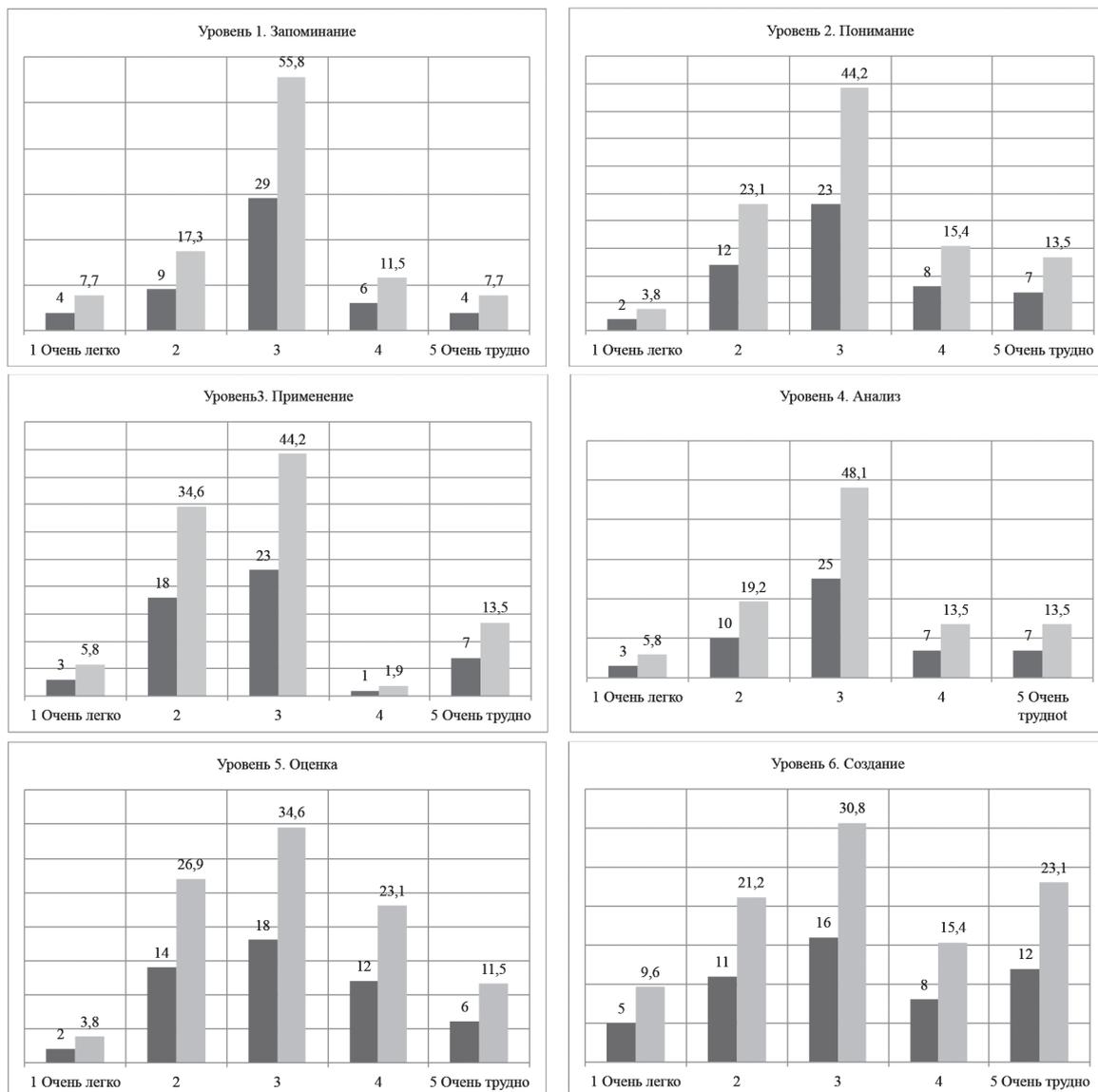


Рис. 3. Результаты самооценки различных уровней сложности освоения учебной дисциплины «Оценка риска в мореплавании»

## Результаты (Results)

Результаты самооценки представлены на рис. 3, где черным цветом на графиках показано количество ответов, а серым — процентное соотношение к общему количеству ответов.

Результаты письменного опроса курсантов по разделу «Терминология и методы оценки риска», структурированному по Блуму представлены на рис. 4. Было задано тридцать вопросов — по пять вопросов на каждый уровень. В процессе исследования были проанализированы только зачетные ответы. На графиках представлены положительные результаты письменного опроса, проведенного для трех групп учащихся: *A*, *B* и *C*.



Рис. 4. Результаты письменного опроса

На рис. 4 черным цветом показано количество зачетных ответов по уровням Блума, серым — их процент от общего количества зачетных ответов.

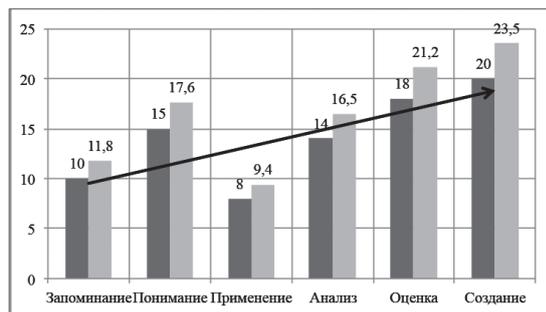
## Обсуждение (Discussion)

По группам *A* и *B* наибольшее количество зачетных ответов относится к уровню *запоминания*. Здесь уровень *понимания* материала ниже уровня *запоминания*, что вполне объяснимо. В группе *C* достаточно необычным результатом является то, что на вопросы по уровню *понимания* получено больше зачетных ответов, чем по уровню *запоминания*.

Во всех трех группах *A*, *B*, *C* худшие результаты получены по уровню *применения*. Уровень *оценки* выше по сравнению с уровнями *анализа* и *создания*, но везде уровень *создания*, показывающий творческие возможности студентов, достаточно низкий. Необходимо иметь в виду, что на вопросы, предлагаемые по уровню *создания*, за зачетные результаты принимались любые предложения курсантов, касающиеся новых идей, для стимулирования творческой активности.

Результаты самооценки курсантов вполне очевидные. Как видно из всех приведенных на рис. 3 графиков, наибольший процент ответов по каждой категории показывает нейтральную самооценку по степени трудности, так как, в силу психологических особенностей, ее проще обосновать. Это также свидетельствует о неуверенности в ответах на вопросы по всем уровням. Как видно из полученных результатов, наименьшую трудность испытывают курсанты в процессе освоения уровней 1–3 и наибольшую трудность — при работе на уровнях 4–6. Если принять среднее значение результатов как выражение определенной степени трудности в формировании мнения обучаемых, то сумма полученных результатов по трудностям на уровнях 3–5 по всем уровням классификации Блума явно превышает сумму полученных результатов по трудностям на уровнях 1 и 2. Таким образом, результаты показали, что из исследуемой группы (52 обучаемых) 75 % студентов испытывают трудности в процессе запоминания материала, 73 % — в процессе понимания, 60 % — в вопросах практического применения, 75 % — в процессе анализа, 79 % — в процессе оценки и 69 % — в вопросах получения нового результата на основе изученного материала. Эти обобщенные результаты самооценки студентов являются четким сигналом для преподавателя о совершенствовании методики учебного процесса и необходимости ее адаптации к конкретному контингенту обучаемых. Ранее изложенное, несомненно, оказывает влияние как на процесс формирования отдельных компетенций студентов, так и на общую квалификацию будущих специалистов в целом. Обобщенные результаты сравнения приведены на рис. 5.

а)



б)

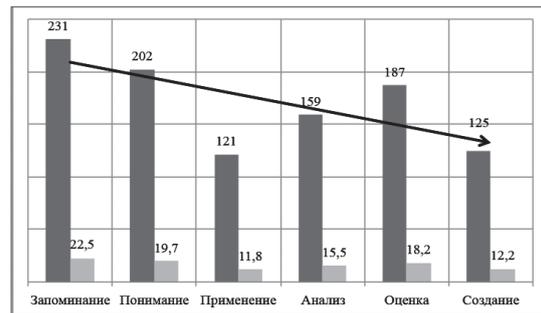


Рис. 5. Сравнение результатов самооценки и письменного опроса:  
 а — степень трудности в достижении образовательных целей;  
 б — зачтенные ответы по категориям образовательных целей

Сравнение результатов самооценки и письменного опроса подтверждает интуитивное представление о том, что степень трудности освоения материала студентами растет в соответствии с иерархическим порядком уровней по Блуму.

### Выводы (Summary)

1. В процессе проведенного исследования установлено, что применение классификации Блума не противоречит существующим образовательным стандартам, применяемым для изучения дисциплины «Оценка риска в мореплавании», и является дополнительным хорошо структурированным инструментом как для повышения эффективности процесса преподавания дисциплины, так и для оценки освоения предмета курсантами.

2. Существует очевидная связь уровней образовательных целей по Блуму и степени трудности их освоения, которая растет в иерархическом порядке, что подтверждается статистическими исследованиями, проведенными для дисциплины «Оценка риска в мореплавании».

3. Результаты самооценки студентов и оценка освоения материала, проведенная преподавателем, показали практически совпадение результатов, что свидетельствует о целесообразности при подготовке курса уделять существенное внимание уровням 2–6 по Блуму, тем более, что дисциплина является прикладной и оценка риска в судовых операциях регламентируется «Международным кодексом по управлению безопасностью» (МКУБ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Maritime Professional. Body of knowledge. — Tokyo: IAMU 2019. — 144 p.
2. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. Revised guidelines for FSA for use in the IMO rule-making process. — London: IMO, 2018. — 71 p.
3. Kontovas C. Formal Safety Assessment. Critical Review and Future Role / C.Kontovas; National Technical University of Athens. School of Naval Architecture & Marine Engineering. Division of Ship Design and Maritime Transport. — 2005. — 163 p.
4. Kontovas C. A. Formal safety assessment: a critical review / C. A. Kontovas, H. N. Psaraftis // Marine technology. — 2009. — Vol. 46. — Is. 1. — Pp. 45–59.
5. Goerlandt F. Risk analysis in maritime transportation: principles, frameworks and evaluation: doctoral dissertations / F. Goerlandt. — Aalto University publication series, 2015. — 73 p.
6. Goerlandt F. Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues / F. Goerlandt, J. Montewka // Reliability Engineering & System Safety. — 2015. — Vol. 138. — Pp. 115–134. DOI: 10.1016/j.ress.2015.01.025.
7. Goerlandt F. On the reliability and validity of ship–ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk / F. Goerlandt, P. Kujala // Safety science. — 2014. — Vol. 62. — Pp. 348–365. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.09.010.

8. Goerlandt F. A risk-informed ship collision alert system: framework and application/ F. Goerlandt, J. Montewka, V. Kuzmin, P. Kujala // *Safety Science*. — 2015. — Vol. 77. — Pp. 182–204. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.03.015.
9. Kristiansen S. *Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis* / S. Kristiansen. — 1st Edition. — London: Routledge, 2005. — 252 p.
10. Anderson L. W. *A Taxonomy for learning, teaching and assessment. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives* / L. W. Anderson, D. R. Krathwohl, P. W. Airasian, K. A. Cruikshank, R. E. Mayer, P. R. Pintrich, J. Raths, M. C. Wittrock. — Addison Wesley Longman, Inc., 2001. — 333 p.

## REFERENCES

1. *Global Maritime Professional. Body of knowledge*. Tokyo: IAMU 2019.
2. *MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. Revised guidelines for FSA for use in the IMO rule-making process*. London: IMO, 2018.
3. Kontovas, C. *Formal Safety Assessment. Critical Review and Future Role*. National Technical University of Athens. School of Naval Architecture & Marine Engineering. Division of Ship Design and Maritime Transport. 2005.
4. Kontovas, Christos A., and Harilaos N. Psaraftis. "Formal safety assessment: a critical review." *Marine technology* 46.1 (2009): 45–59.
5. Goerlandt, F. *Risk analysis in maritime transportation: principles, frameworks and evaluation: doctoral dissertations*. Aalto University publication series, 2015.
6. Goerlandt, Floris, and Jakub Montewka. "Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues." *Reliability Engineering & System Safety* 138 (2015): 115–134. DOI: 10.1016/j.res.2015.01.025.
7. Goerlandt, Floris, and Pentti Kujala. "On the reliability and validity of ship–ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk." *Safety science* 62 (2014): 348–365. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.09.010.
8. Goerlandt, Floris, Jakub Montewka, Vladimir Kuzmin, and Pentti Kujala. "A risk-informed ship collision alert system: framework and application." *Safety Science* 77 (2015): 182–204. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.03.015.
9. Kristiansen, Svein. *Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis*. 1st Edition. London: Routledge, 2005.
10. Anderson, Lorin W., David R. Krathwohl, Peter W. Airasian, Kathleen A. Cruikshank, Richard E. Mayer, Paul R. Pintrich, James Raths, and Merlin C. Wittrock. *A Taxonomy for learning, teaching and assessment. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Addison Wesley Longman, Inc., 2001.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Логиновский Владимир Александрович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [loginovskijVA@gumrf.ru](mailto:loginovskijVA@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Loginovsky, 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: [loginovskijVA@gumrf.ru](mailto:loginovskijVA@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 27 июля 2020 г.  
Received: July 27, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715

## NAVIGATIONAL USE OF THE E-LORAN SYSTEM IN MODIFICATION WITH THE SPLINE FUNCTIONS METHOD

**I. V. Yuyukin**

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

*The issue of navigational use of E-LORAN as an alternative to GPS is considered. It is noted that when using the spline algorithms, there is a real possibility to automate the accelerated handling of navigation information in the electronic LORAN project on the standard base of onboard computer resources. The proposed approach becomes especially important in case of blocking access to GPS for marine civilian users in local military conflicts or in case of technical problems such as spoofing attacks, satellite signal jamming, or hostile ship control. System protection of the marine consumer from unauthorized simulated interference with GPS signals is an actual problem of cybernetic security of the navigation in the future when assessing the hacker impact on the target task of safely following the planned route for any marine mobile object. Since LORAN/E-LORAN is hyperbolic navigation system, the task of interpolating the classical hyperbola is performed in order to demonstrate the productivity of the developed algorithms. On the basis of a specially organized calculated experiment, the high accuracy of synthesizing the navigation isoline is proved. A sequence of four screenshots demonstrates the reliability of the obtained results of algorithmic functionality. Repurposing the proposed approach to the differential navigation mode allows us to directly use the grid of distorted hyperboles in practical applications, while conceptually ignoring the complexity of mathematical formalization of fictitious isolines. A retrospective algorithm in software implementation based on the least squares method for calculating the most probable coordinates of the ship position as an iterative search for the intersection point of spline hyperbolic isolines with a geometric interpretation of the assigned task solution is used in the paper. When navigational using of E-LORAN in a modification with spline functions, it becomes possible to abandon specialized electronic or traditional paper charts with the hyperbolic family, applying spline algorithmic and onboard software in order to eliminate the navigator participation in traditional interpolation on a hyperbolic grid-chart in order to fix the vessel position. It is concluded that the specific considered aspect of the spline functions method can be a stimulating factor for automated accelerated processing of navigation information.*

*Keywords: Spoofing-attack, satellite signal jamming, hostile ship control, cybernetic navigation security, assessment of the hacker impact, fictitious distorted isoline.*

**For citation:**

Yuyukin, Igor V. "Navigational use of the e-LORAN system in modification with the spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

**УДК 656.61.052 656**

## НАВИГАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ E-LORAN В МОДИФИКАЦИИ С МЕТОДОМ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ

**И. В. Ююкин**

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

*Рассматривается вопрос навигационного использования e-LORAN в качестве альтернативы GPS. Отмечается, что при применении сплайновых алгоритмов появляется реальная возможность автоматизации ускоренной обработки навигационной информации в проекте электронный LORAN на стандартной базе ресурсов бортового компьютера. Предлагаемый подход приобретает особую важность в случае блокирования доступа к GPS морским гражданским потребителям при наличии локальных военных конфликтов или возникновении технических проблем, таких как спуфинг-атака, глушение спутникового сигнала и враждебный контроль судна. Системная защита морского потребителя от несанкционированных имитационных помех сигналам GPS представляется актуальной проблемой кибернетической безопасности*

навигации будущего при оценке хакерского воздействия на целевую задачу безопасного следования по запланированному маршруту для любого морского подвижного объекта. Поскольку LORAN/e-LORAN являются гиперболическими навигационными системами, выполнена задача интерполирования классической гиперболы с целью демонстрации работоспособности разработанных алгоритмов. На основе специально организованного вычислительного эксперимента доказана высокая точность синтезирования навигационной изолинии. Последовательность из четырех скриншотов демонстрирует достоверность полученных результатов алгоритмической функциональности. Перепрофилирование предлагаемого подхода на дифференциальный режим навигации позволяет непосредственно использовать в практических приложениях сетку искаженных поправками гипербол при концептуальном игнорировании сложности математической формализации фиктивных изолиний. В работе используется ретроспективный алгоритм в программной реализации на основе метода наименьших квадратов расчета вероятнейших координат места судна как итерационный поиск точки пересечения сплайновых гиперболических изолиний с геометрической интерпретацией решения поставленной задачи. При навигационном использовании e-LORAN в модификации со сплайн-функциями появляется возможность отказаться от специализированных электронных или традиционных бумажных карт с семейством гипербол, применяя сплайновое алгоритмическое и программное бортовое обеспечение с целью упразднения участия судоводителя в традиционном интерполировании на гиперболической карте-сетке для определения места судна. Сделан вывод о том, что конкретный рассматриваемый аспект метода сплайн-функций может являться стимулирующим фактором автоматизированной ускоренной обработки навигационной информации.

*Ключевые слова:* спуфинг-атака, враждебный контроль судна, глушение спутникового сигнала, кибернетическая безопасность навигации, оценка хакерского воздействия, фиктивная искаженная изолиния.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Навигационное использование системы e-LORAN в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

## Введение (Introduction)

В мировом судоходстве до спутниковой навигации успешно применялась американская национальная система LORAN (LONg RANGE Navigation). В 2010 г. было принято решение о прекращении передачи сигналов системы LORAN-C в связи с повсеместным внедрением перспективной системы GPS [1]. Однако в условиях современности международное морское сообщество пришло к пониманию необходимости введения дублирующего варианта обеспечения альтернативной навигации в случае различных технических проблем работы GPS [2]–[4]. Вследствие этого в середине 90-х гг. возобновилась разработка e-LORAN (enhanced LORAN) с переходом на цифровую обработку сигналов. Упраздненная система LORAN-C в XXI в. трансформируется в современность в презентации e-LORAN с прогнозируемым показателем точности, сопоставимым с точностью спутниковой навигации [5]. При этом инновацию e-LORAN планируется использовать как резервную систему GPS [6]. Благодаря техническим возможностям проект электронный LORAN уникальным образом подходит для дополнения GPS с потенциальной возможностью производства гибридных перспективных приемоиндикаторов [7].

При рассмотрении навигационного использования e-LORAN внимание было акцентировано исключительно на исследовании вопроса эффективной математической обработки навигационной информации. Технические аспекты модернизации проекта электронного LORAN не рассматриваются. При финальном введении в эксплуатацию e-LORAN в реализации полного объема возможностей системы ежедневная работа позволит реалистично выявить действительную корректность считающихся успешными алгоритмов, и альтернативный сплайновый подход может явиться действенным аспектом повышения функциональности нового инновационного проекта. Для апробирования навигационного использования e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций сформулированы следующие задачи эффективной обработки навигационной информации:

1. Реализация высокоскоростного алгоритма классической полиномиальной сплайн-интерполяции изолинии системы e-LORAN.

2. Применение альтернативного алгоритма на основе базисных финитных сплайнов с обеспечением конструктивного сжатия массивов данных навигационных параметров.
3. Оценка точности сплайн-интерполяции навигационной изолинии.
4. Программная реализация для бортового компьютера сплайновых алгоритмов в двух предлагаемых вариантах.
5. Разработка алгоритма определения места судна с программным сопровождением на основе итерационного поиска точки пересечения синтезированных сплайновых изолиний.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для восстановления навигационной изолинии предлагаются два конкурирующих метода: полиномиальный подход сплайн-интерполяции и технология базисных финитных сплайнов. По первому варианту классический полиномиальный кубический сплайн на каждом сеточном отрезке  $x \in [x_i, x_{i+1}]$  представляет собой многочлен третьей степени, генерирующий навигационную изолинию в интерполяционном коридоре точности [8]:

$$S_i(x) = A_i + B_i(x) + C_i(x)^2 + D_i(x)^3; i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

где  $A_i, B_i, C_i, D_i$  — неизвестные полиномиальные сплайновые коэффициенты, подлежащие математическому определению при каждом решении конкретной задачи;

$N$  — общее количество узлов интерполяции.

Фактическое быстроедействие программной реализации классической сплайн-интерполяции достигается за счет оптимального представления формулы (1) по *схеме Горнера* с учетом факта вычислительной предпочтительности операции умножения взамен возведения в степень:

$$S_i(x) = [[D_i(x) + C_i](x) + B_i](x) + A_i; i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Вычисление скалярных сплайновых коэффициентов предполагает решение линейных алгебраических систем на основе использования *метода прогонки* [8].

По альтернативному второму варианту для  $B$ -сплайнового алгоритма условия интерполяции навигационной изолинии в произвольной точке  $x \in [x_i, x_{i+1}]$  сеточного интервала аргумента реализуются на основе базисной финитной композиции [9]:

$$S(x) = c_{i-1}B_{i-1}(x) + c_iB_i(x) + c_{i+1}B_{i+1}(x) + c_{i+2}B_{i+2}(x); i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

где  $B_i(x)$  — «шапочные» функции финитного сплайна;

$c_i$  — искомые линейные функционалы;

$N$  — общее количество узлов интерполяции.

Базисный сплайн или его полиномиальный аналог только организует математическую искусственную конструкцию, но не является фактическим фрагментом алгебраической кривой. Реальная математическая линия синтезируется путем умножения последовательности «функций-крыш»  $B_i(x)$ , в случае базисной интерполяции, на расчетные скалярные коэффициенты  $c_i$  как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала. Преимущество финитного сплайна по сравнению с классическим полиномиальным аналогом заключается в конструктивной возможности четырехкратного компактного сжатия сплайнового массива данных при одинаковых показателях характеристик точности [8].

При навигационном применении сплайновых алгоритмов появляется реальная возможность автоматизации обработки навигационной информации в концепции e-LORAN на базе вычислительных ресурсов бортового компьютера.

### Результаты (Results)

LORAN/e-LORAN являются гиперболическими навигационными системами [1]. Для определения места судна при использовании гиперболических методов в практике судовождения дополнительно требуются специальные карты с графической сеткой изолиний, однако в случае применения методов сплайн-функций данная необходимость автоматически аннулируется, так

как задача математического генерирования любой промежуточной гиперболы и ее геометрического представления осуществляется вычислительным прогрессивным способом. При навигационном использовании e-LORAN в модификации со сплайн-функциями появляется реальная возможность избавить судоводителя от трудоемкого интерполирования на карте-сетке современного LORAN с целью определения места судна. При современном навигационном использовании e-LORAN в интеграционной среде ЭКНИС необходимо выполнение определенных условий для того, чтобы электронная карта стала полноценной официальной заменой бумажной карте. Игнорирование любого из этих условий возвращает судоводителя к обязательному использованию традиционной бумажной карты, и вопрос эффективного оперирования навигационными изолиниями в классическом понимании повторно приобретает актуальность.

Конкретный рассматриваемый аспект ускоренной обработки навигационной информации на основе сплайнового манипулирования гиперболческой сеткой может стать фактором, позволяющим сконцентрировать внимание вахтенной службы на адекватной оценке обстановки, а не тратить вахтенное время на графическое интерполирование промежуточной гиперболы по карте-сетке. Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы могут стать гармонизированной поддержкой судоводительскому составу при принятии грамотного решения по управлению судном. При внешней условной тактической схожести с компьютерными играми разработанных графических приложений геометрическая интерпретация решения навигационных задач предоставляет возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии мгновенного определения места судна при любых обстоятельствах плавания.

Классический пример семейства гипербол, представленный на рис. 1, приведен в «Руководстве пользователя LORAN-C», изданном под кураторством Береговой охраны США [10]. В качестве доказательства работоспособности сплайнового подхода выполнено генерирование отдельной гиперболы с оцифровкой -400 с использованием гиперболческой концепции LORAN-C как прототипа e-LORAN.

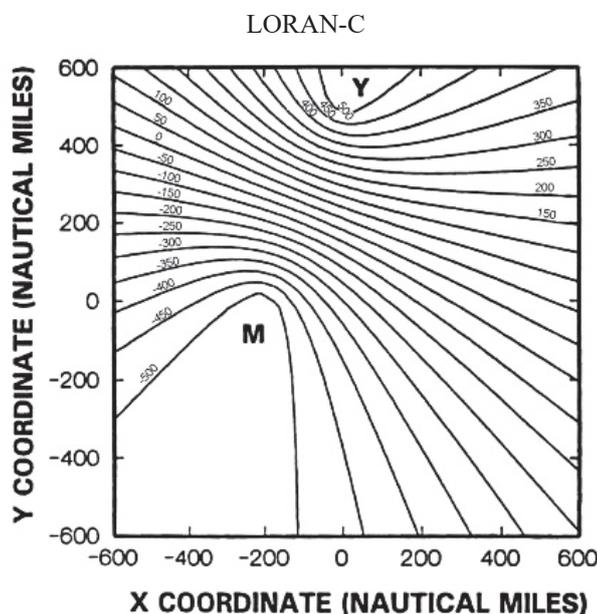


Рис. 1. Классическое семейство гипербол системы LORAN-C

На рис. 2 приведена гипербола, которая была генерирована методами полиномиальной сплайн-интерполяции по девяти узловым точкам, при глазомерной оценке оцифровки декартовой системы координат (см. рис. 1). Для достижения точности вычислительного эксперимента использовалось кратковременное увеличение масштаба рис. 1 с целью эффективного применения сеточного метода при последующем возвращении к оригинальному представлению семейства офици-

альных гипербол. На рис. 2 пунктирными линиями обозначена координатная нулевая позиция. При сравнительном анализе сплайновой гиперболы и изолинии с оцифровкой -400 по рис. 1 обнаруживается полная геометрическая идентичность с рис. 2.

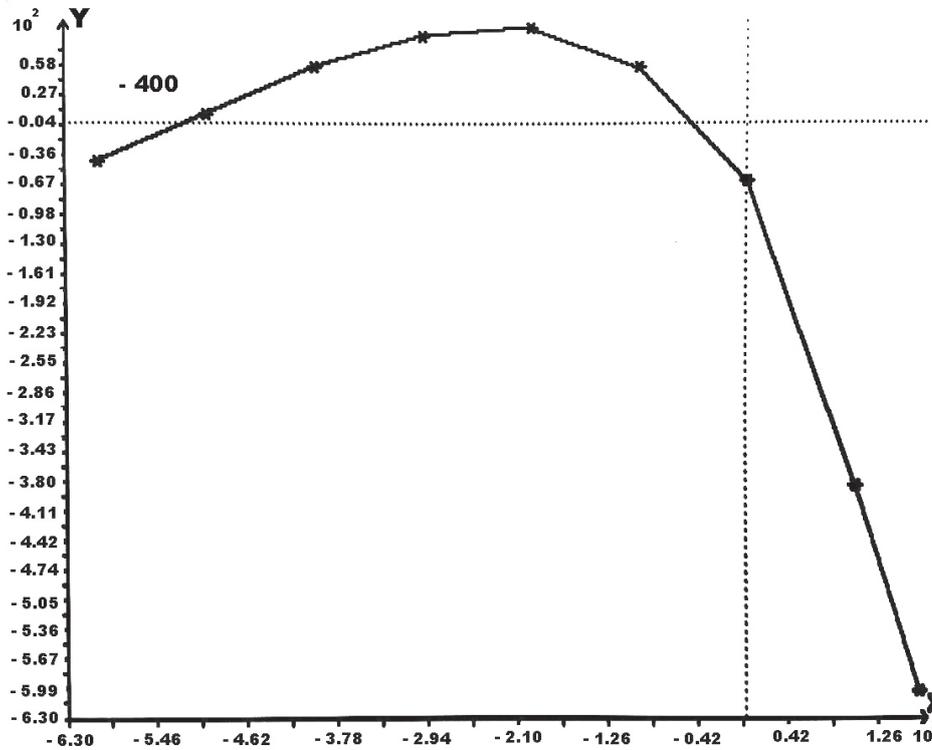


Рис. 2. Синтезирование гиперболической изолинии методом полиномиальной сплайн-интерполяции

В случае применения метода базисных сплайнов получена аналогичная первому методу геометрическая форма гиперболической изолинии. Акцент сделан на полиномиальном сплайновом методе (см. рис. 2), так как преимущества финитных сплайнов с организацией компактности данных проявляются в исключительной степени в 3D формате. Из-за конструктивной особенности базисной сплайновой структуры объем вычислительной информации сокращается в 4 раза при синтезировании навигационной изоповерхности по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [11].

Совпадение по геометрии сплайновой изолинии с официальной изолинией по версии Береговой охраны США не является тривиальной демонстрацией. Интерполирование классической изолинии реализовано с целью демонстрации доказательства работоспособности новых алгоритмов. Схожесть сплайновой гиперболы с реальной является убедительным подтверждением правомерности применения методов сплайн-функций для морских приложений. Априорная оценка точности сплайн-интерполяции базируется на постановке смоделированного математического эксперимента для получения количественной характеристики обоснованности использования предложенного алгоритма.

В случае навигационного использования системы e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций, по данным специально организованного эксперимента, априорная точность приближения навигационной изолинии составляет порядок точности до шестого знака после запятой для любого расчета навигационного параметра (рис. 3). На рис. 3, а представлен график оценки точности полиномиальной сплайн-интерполяции синуса, выбранной из соображения условной фрагментарной схожести с контуром гиперболы. Монотонную кривизну синусоиды в сегменте  $[-\pi; +\pi]$  можно условно по геометрическому контуру интерпретировать как комбинацию «ветвей»

гиперболы с точкой соединения в нулевой координате двух геометрических фрагментов. Данный феномен автоматически реализует дополнительную усложненность вычислительного эксперимента с целью получения большей достоверности правдоподобия конечного результата оценки априорной точности интерполяции. При данной организации вычислительного эксперимента исключается проблема неустойчивости алгоритма в особых асимптотических точках.

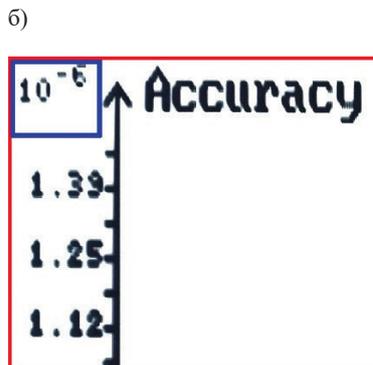
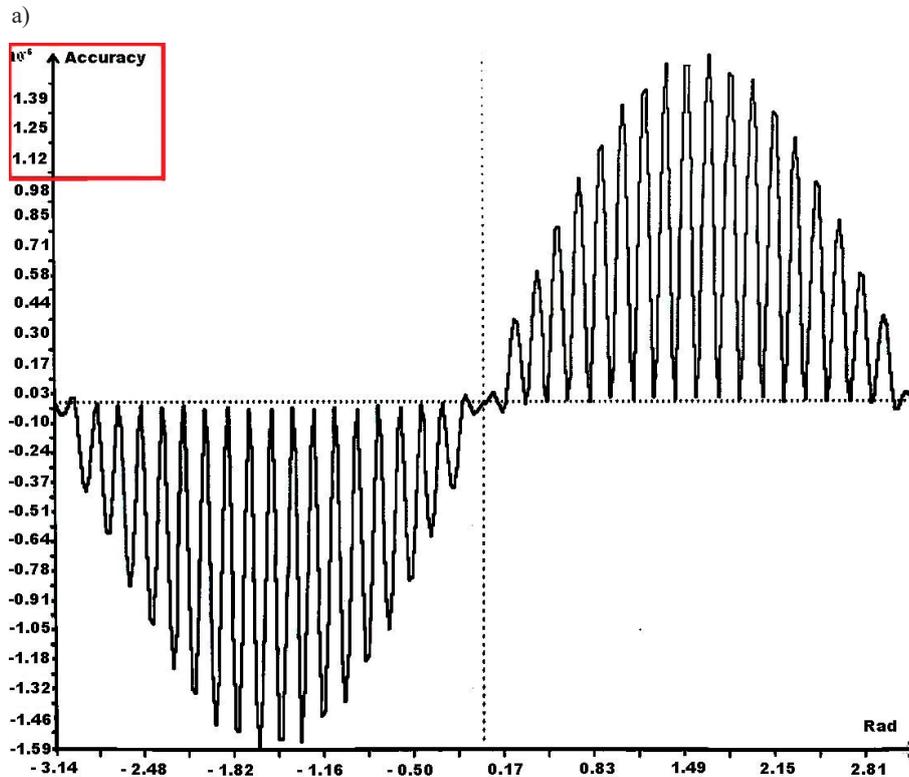


Рис. 3. Априорная оценка точности интерполяции синусоидной функции:  
а — общий график оценки точности;  
б — фрагмент фактического значения погрешности в увеличенном формате

По оси абсцисс графика отложены значения аргумента в радианах на интервале  $[-\pi; +\pi]$ . По оси ординат фиксируются величины погрешности интерполяции. Поскольку математически синусоида имеет периодический характер и монотонную кривизну в своей области определения, виртуальный граничный контур графика оценки точности монотонно синхронизируется с периодической кривизной синуса при демонстрации минимальных значений погрешности от  $0,03 \times 10^{-6}$  на начальном линейном участке графика до наибольшего значения  $1,59 \times 10^{-6}$  в точке максимума синусоиды. В процессе анализа рис. 3, а необходимо обратить внимание на факт оп-

тимальности сплайн-интерполяции: в каждом из 40 узлов в сегменте  $[-\pi; +\pi]$  погрешность многократно равна нулю вследствие алгоритмического условия совпадения значений интерполируемой навигационной функции со значениями сплайна в узлах сетки. Погрешность в любой произвольной точке аргумента каждый раз рассчитывалась как арифметическая разница между функциональным значением архитектурно встроенного в язык Турбо Паскаль стандартного синуса и интерполированного методом сплайн-функций значения синуса в той же точке аргумента. Выполнив полный анализ графика оценки точности (см. рис. 3, а), можно прийти к подтверждению теоретического постулата об обязательности совпадения характеристик погрешностей сплайн-интерполяции с тригонометрической «гладкостью» самой интерполируемой линией, что полностью согласуется с *теоремой Вейерштрасса* [12].

На основании выполненного в работе геометрического анализа выдвинута гипотеза о фактическом совпадении числовых значений скалярных сплайновых коэффициентов  $c_i$  со значениями измерений мгновенной навигационной функции  $f_i$ . В связи с этим появилась оригинальная идея отождествить при разработке сплайнового метода разнородные по алгоритмическому назначению величины одной композитной формулой:  $c_i = f_i$  [13]. Перестановка множителей  $c_i$  с дискретными значениями навигационных параметров  $f_i$  фактически позволяет по-новому осмыслить физическую суть кусочной аппроксимации.

Скриншот самой цифровой оценки точности (см. рис. 3, б) является визуализацией оси ординат в районе выделенного красного прямоугольника на общем графике погрешности сплайн-интерполяции синуса (см. рис. 3, а). Значение финальной точности виртуальным образом фрагментировано по периметру красного прямоугольника из общего графика погрешности (см. рис. 3, б) с соблюдением принципа увеличительного стекла с целью демонстрации порядка интерполяционной погрешности  $10^{-6}$  (синий прямоугольник). При оценки точности сплайн-интерполяции (см. рис. 3, а) необходимо иметь в виду, что для каждой цифровой компоненты по оси ординат необходимо производить операцию умножения на  $10^{-6}$ .

С использованием средств компьютерной графики представлена геометрическая интерпретация решения задачи определения места судна в рамках концептуальности проекта LORAN на примере пересечения двух гипербол. Графическая копия с экрана компьютера (рис. 4) является результатом расширенной функциональности разработанного пакета прикладных программ. Выполнено синтезирование двух абстрактных изолиний на основе метода полиномиальной сплайн-интерполяции в локальной системе координат [8].

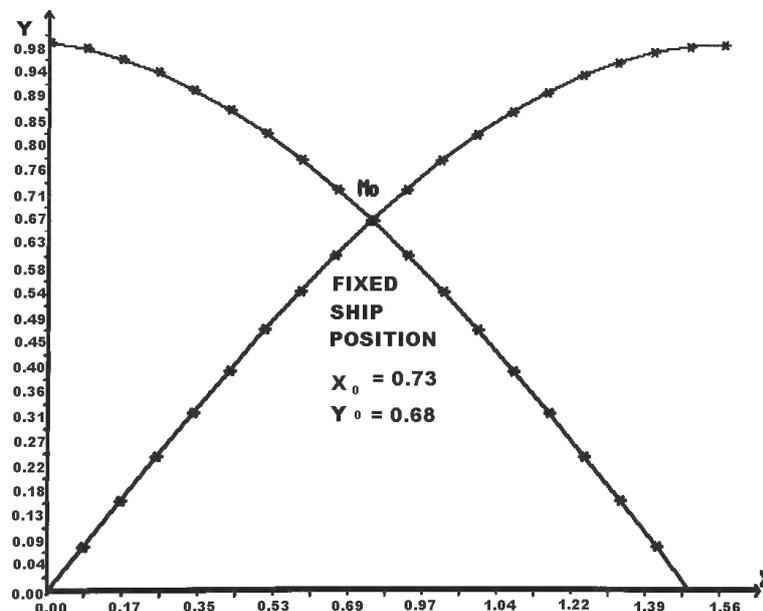


Рис. 4. Геометрическая интерпретация гипотетического определения вероятнейшего места судна

На скриншоте (см. рис. 4) демонстрируется результат расчета обсервованных координат как итерационный поиск геометрической точки пересечения гипербол на основе применения ретроспективного метода наименьших квадратов [12]. В каждой последующей итерации первые расчетные обсервованные координаты принимаются повторно за счислимые и, таким образом, вычисляется уточненное местоположение ( $M_0$ ) судна при каждом повторении итерационного цикла до момента обеспечения наперед заданной степени точности в соответствии со стандартами безопасности судовождения. Финальная точность обсервации напрямую зависит от количества итераций. Для стандартных навигационных задач в общем случае достаточно применить две-три итерации.

Таким образом, судоводитель получает визуальный конечный результат на дисплее бортового компьютера при фактическом абстрагировании от необходимости графической интерполяции для определения позиции судна при наглядной компьютеризированной визуализации определения точки пересечения гиперболических изолиний или в цифровом выражении вероятнейших координат местоположения судна. Декларируемая точность эксперимента сплайновой интерполяции может быть сопоставлена с количественными оценками других существующих методов определения координат для выражения оценочного мнения при исследовании вопроса самостоятельного интереса сравнения эффективности обработки навигационной информации.

Дополнительным преимуществом предложенного алгоритма является предельная универсальность методов сплайн-функций для многообразия решения навигационных задач [8], [11], [12]. Исследование вопроса навигационного использования e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций является частным приложением общего теоретического подхода к решению задач судовождения с позиций теории приближения функций. Под универсальностью подразумевается независимость алгоритма от конкретного геометрического представления интерполируемой изолинии. Математический формат изолинии определяется объемом памяти бортового компьютера с сохраненными предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными параметрами для вычисления с высоким быстродействием значения навигационной функции в любой точке аргумента по номеру сеточного интервала [9].

### Обсуждение (Discussion)

В практике современного мореплавания можно привести примеры, когда по разным техническим причинам GPS оказывалась локально недееспособной, что подтверждает концепцию необходимости дублирования спутниковой системы альтернативным методом, основанным на других принципах работы [14]. Пример политического противостояния Южной Кореи и КНДР в вопросе безопасности судовождения практически выражается в критической необходимости для южнокорейских моряков периодически возвращать суда к причалам вследствие региональной блокировки сигналов GPS [15], [16]. Правительство Южной Кореи вынуждено будет отказаться от GPS при возможном переходе на альтернативную систему «наземной» радионавигации. Предполагается, что в ближайшем будущем будет реализовано репрофилирование на e-LORAN в Азиатско-Тихоокеанском регионе [17]. Планируемая точность системы e-LORAN на Корейском полуострове минимально должна составить 20 м [18], но при дополнении концепции e-LORAN алгоритмом мультицепей, согласно данным проведенных научных экспериментов [19], точность может составить 15,32 м. Стимулирующую точность целесообразно признать высоким потенциалом морской навигационной службы в Северо-Восточной Азии.

Следует отметить, что правительство США официально оставляет за собой право в случае военных конфликтов применить так называемый *режим селективного доступа* для гражданских и военных потребителей [20]. Гражданским потребителям открытый канал GPS временно может быть технически деактивирован при сохранении исключительного доступа военным пользователям спутниковой системы. Региональное отключение GPS для подвижных объектов в случае военных конфликтов уже практиковалось в Ираке в 2007 г. [15].

В условиях современности кибернетическая атака на GPS становится реальностью [20]. Глобальная навигационная система оказывается все более подверженной намеренной помехе глушения спутникового сигнала при ускоренном техническом развитии специфичного оборудования [22]. При помощи незаконного применения специальных средств можно организовать так называемые *инновационные спуфинг-атаки*, которые искусственно вызывают искажения реальных данных Global Navigation Satellite System (GNSS) [23], [24]. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода на частотах GNSS с переориентированием судового приемника от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сигнал [25], [26]. Так, инициативная группа научных исследователей провела уникальный научный эксперимент в Ионическом море в 2013 г. по оценке воздействия спуфинг-атаки на кибернетическую безопасность морского объекта. Суть эксперимента заключалась в установлении скрытого часового враждебного контроля над 65-метровой яхтой с фактическим перехватом управления от экипажа в руки условных хакеров при применении спуферного оборудования по псевдопозиционированию местоположения на основе транслирования замаскированной имитационной помехи [16]. Дезориентирующая подмена маршрута оказалась незамеченной для судоводителя яхты [27]. Фиктивный дрейф вахтенный помощник объяснил влиянием океанских течений. Как противодействие неожиданному сносу вахтенным помощником предпринимались безуспешные попытки корректировки движения судна при помощи многочисленных изменений курса [28].

Сообщение о массовом случае спуфинга в Черном море поступило в адрес Береговой охраны США 22 июня 2017 г. более чем от двадцати судов у побережья Новороссийска [5]. Согласно мотивированному сообщению капитана одного из двадцати судов, приемник GPS в течение нескольких дней позиционировал координаты в районе аэропорта Геленджика, в то время, когда судно, фактически, дрейфовало на расстоянии около 25 миль от побережья [21]. При этом автоматический приемник фиксировал безопасную точность в пределах 100 м при индикации высоты судовой антенны 39 м под водой. Самотестирование спутниковой аппаратуры проходило успешно, но это не меняло фактической ситуации. Ситуация некорректности работы GNSS в Черном море является очевидным доказательством современной реальности массового спуфинга [25]. Морской администрацией США в качестве объяснения инцидента было сделано предположение о возможных испытаниях модернизированной наземной системы российского аналога LORAN под названием «Чайка» в комбинации с Глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС). Система позиционирования ГЛОНАСС ориентирована в основном на российского потребителя и не является мировым лидером по продажам приемников в мировом масштабе как GPS. Проблемы GPS остаются нерешенными несмотря на невозможность влияния правительства США на вопросы эксплуатации ГЛОНАСС и других формирующих концепцию e-Navigation систем глобального позиционирования, а именно: европейского «Галилео», китайской системы «Компас», японской квазизенитной спутниковой системы, индийской региональной навигационной спутниковой системы (ИРНСС).

Поиск противодействия кибернетическим атакам в виде гипотез, алгоритмов или технических устройств в настоящее время признается актуальным, но пока еще вопросы практической реализации антиспуфинговых средств находятся в стадии исследования [29]. Защита морского потребителя от замаскированных искажений сигналов GPS является серьезной проблемой безопасности будущего навигации при инновационных методах идентификации хакерского воздействия, ориентированного на фальсификацию целевой задачи безопасного следования по запланированному маршруту любого морского подвижного объекта.

Проанализированные разрозненные факты подтверждают общую идею необходимости дублирования Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) альтернативной системой навигации e-LORAN. При параллельном с ГНСС использовании e-LORAN в качестве резервного оборудования ситуация потери контроля над управлением любого судна исключается в принципе. В этой связи особую значимость приобретают методы эффективной обработки навигационной информации в новых концептуальных морских приложениях.

### Выводы (Summary)

Проведенное исследование автоматизации обработки навигационной информации в структуре системы e-LORAN позволяет сделать следующие выводы:

1. Для создания прогрессивных алгоритмов интерполяции гиперболической изолинии в долгосрочной перспективе следует отдать предпочтение эффективной вычислительной композиции на основе сплайнов.

2. На основе авторского методического и алгоритмического обеспечения сплайновой интерполяции гиперболы как изолинии системы e-LORAN составлены две Паскаль-программы, обеспечивающие высокую точность и устойчивость вычислительных процедур.

3. В качестве прикладного программного обеспечения для бортового компьютера синхронно апробировано два альтернативных варианта решения поставленных задач: полиномиальная сплайн-интерполяция и финитная технология.

4. В тестовом эксперименте выполнена априорная оценка точности сплайн-интерполяции навигационной изолинии.

5. Доказана высокая точность сплайн-интерполяции навигационной изолинии с порядком до шестого знака после запятой любой расчетной единицы.

6. При реализации предлагаемого подхода появляется возможность отказаться от специализированных электронных или печатных типографским способом морских карт с семейством гипербол для навигационных приложений, используя сплайновое алгоритмическое и программное обеспечение в базе данных бортового компьютера.

7. При широком применении в современном судовождении дифференциального режима, обеспечивающего максимальную точность e-LORAN, предлагаемые сплайновые алгоритмы позволяют напрямую в практических приложениях использовать сетку искаженных поправками гипербол. Фиктивная изолиния имеет сложную математическую формализацию при условии принципиальной невозможности геометрического решения навигационной задачи традиционным способом. Синтез искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции не представляет реальной математической проблемы с позиций математического аппарата кусочных аппроксимаций.

8. Разработан алгоритм в программной реализации на основе метода наименьших квадратов в новой интерпретации расчета вероятнейших координат места судна как итерационный поиск точки пересечения сплайновых гиперболических изолиний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Czaplewski K.* Global Navigation Satellite Systems — Perspectives on Development and Threats to Safety of Sea Transportation / K. Czaplewski, D. Goward // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation.* — 2016. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 183–192. DOI: 10.12716/1001.10.02.01.

2. *Williams P.* e-Navigation and the Case for eLoran / P. Williams, S. Basker, N. Ward // *The Journal of Navigation.* — 2008. — Vol. 61. — Is. 3. — Pp. 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.

3. *Safar J.* Analysis, Modeling, and Mitigation of Cross-Rate Interference in e-Loran: Analysis of Cross-Rate Interference in eLoran / J. Safar, P. Williams, A. Grant, F. Vejrazka // *Navigation.* — 2016. — Vol. 63. — Is. 3. — Pp. 295–319. DOI: 10.1002/navi.142.

4. *Fang T. H.* GPS and eLoran Integrated Navigation for Marine Applications Using Augmented Measurement Equation Based on Range Domain / T.H. Fang, Y. Kim, S.G. Park, K. Seo, S.H. Park // *International Journal of Control Automation and Systems.* — 2020. — Vol. 18. — Is. 9. — Pp. 2349–2359. DOI: 10.1007/s12555-019-0287-y.

5. *Falco G.* The Vacuum of Space Cybersecurity / G. Falco // 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. — Pp. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.

6. *Czaplewski K.* Does Poland Need eLoran? / K. Czaplewski // the 18th International Conference on Transport System Telematics. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 525–544. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7\_35.

7. *Roth G. L.* New Loran Capabilities Enhance Performance of Hybridized GPS/LORAN Receivers / G. L. Roth, P.W. Schick // *Navigation.* — 1999. — Vol. 46. — Is. 4. — Pp. 249–260. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1999.tb02412.x.

8. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
9. 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.
10. Loran-C User Handbook. — Washington: USCG, 1992. — 241 p.
11. Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
12. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
13. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
14. Song S. P. The Integrated eLoran/GPS Navigation Algorithm for Reduced Computational Complexity and High Accuracy / S. P. Song, M. Y. Shin, S. B. Son, Y. B. Kim, S. J. Lee, C. S. Park // The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. — 2011. — Vol. 60. — Is. 3. — Pp. 612–619. DOI: 10.5370/KIEE.2011.60.3.612.
15. Czaplewski K. The Identification of Possible Applications of the E-Loran System / K. Czaplewski, A. Weintrit // Annual of Navigation. — 2018. — Vol. 25. — Is. 1. — Pp. 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
16. Psiaki M. Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here's how to fight back GPS lies / M. Psiaki, T. Humphreys, B. Stauffer // IEEE Spectrum. — 2016. — Vol. 53. — Is. 8. — Pp. 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.
17. Fang T. H. Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter / T. H. Fang, Y. Kim, D. K. Kim, S. Lee, K.-Y. Seo, S.H. Park // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. — 2018. — Vol. 24. — Pp. 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.0079.
18. Son P. W. Preliminary study of the re-radiation effect of Loran signal to improve the positioning accuracy / P. W. Son, S. G. Park, K. Seo, S. Park, T. H. Fang // 2019 European Navigational Conference (ENC). — IEEE, 2019. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EURONAV.2019.8714156.
19. Son P. W. Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation / P.W. Son, J. H. Rhee, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System. — 2017. — Vol. 54. — Is. 2. — Pp. 666–679. DOI: 10.1109/TAES.2017.2762438.
20. Mina T. Y. GPS spoofing detection for the power grid network using a multireceiver hierarchical framework architecture / T. Y. Mina, S. Bhamidipati, G. X. Gao // Navigation. — 2019. — Vol. 66. — Is 4. — Pp. 857–875. DOI: 10.1002/navi.341.
21. Falco G. Cybersecurity Principles for Space Systems / G. Falco // Journal of Aerospace Information Systems. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 61–70. DOI: 10.2514/1.I010693.
22. Czaplewski K. Improvement in accuracy of determining a vessel's position with the use of neural networks and robust m-estimation / K. Czaplewski, M. Waz // Polish Maritime Research. — 2017. — Vol. 24. — № 1. — Pp. 22–31. DOI: 10.1515/pomr-2017-0003.
23. Kerns A. J. Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing / A.J. Kerns, D.P. Shepard, J.A. Bhatti, T.E. Humphreys // Journal of Field Robotics. — 2014. — Vol. 31. — Is. 4. — Pp. 617–636. DOI: 10.1002/rob.21513.
24. Psiaki M. L. GNSS spoofing and detection / M.L. Psiaki, T.E. Humphreys // Proceedings of the IEEE. — 2016. — Vol. 104. — Is. 6. — Pp. 1258–1270. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2526658.
25. Liu Y. Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System / Y. Liu, S. Li, Q. Fu, Z. Liu // Sensors. — 2018. — Vol. 18. — Is. 5. — Pp. 1433. DOI: 10.3390/s18051433.
26. Hu Y. Spoofing Detection Technique Using Fraction Parts of Double-difference Carrier phases / Y. Hu, S. Bian, B. Ji, J. Li // The Journal of Navigation. — 2018. — Vol. 71. — Is. 5. — Pp. 1111–1129. DOI: 10.1017/S0373463318000206.
27. Kugler L. Why GPS Spoofing is a Threat to Companies, Countries / L. Kugler // Communications of the ACM. — 2017. — Vol. 60. — No. 9. — Pp. 18–19. DOI: 10.1145/3121436.

28. Bhatti J. Hostile Control of Ships via False GPS Signals: Demonstration and Detection / J. Bhatti, T. E. Humphreys // *Navigation*. — 2017. — Vol. 64. — Is. 1. — Pp. 51–66. DOI: 10.1002/navi.183.
29. Borio D. A sum-of-squares approach to GNSS spoofing detection / D. Borio, C. Gioia // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. — 2016. — Vol. 52. — Is. 4. — Pp. 1756–1768. DOI: 10.1109/TAES.2016.150148.

## REFERENCES

1. Czaplewski, Krzysztof, and Dana Goward. “Global Navigation Satellite Systems — Perspectives on Development and Threats to System Operation.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.2 (2016): 183–192. DOI: 10.12716/1001.10.02.01.
2. Williams, Paul, Sally Basker, and Nick Ward. “e-Navigation and the Case for eLoran.” *The Journal of Navigation* 61.3 (2008): 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.
3. Safar, Jan, Paul Williams, Alan Grant, and Frantisek Vejrazka. “Analysis, Modeling, and Mitigation of Cross-Rate Interference in e-Loran: Analysis of Cross-Rate Interference in eLoran.” *Navigation* 63.3 (2016): 295–319. DOI:10.1002/navi.142.
4. Fang, Tae Hyun, Youngki Kim, Sul Gee Park, Kiyol Seo, and Sang Hyum Park. “GPS and eLoran Integrated Navigation for Marine Applications Using Augmented Measurement Equation Based on Range Domain.” *International Journal of Control Automation and Systems* 18.9 (2020): 2349–2359. DOI: 10.1007/s12555-019-0287-y.
5. Falco, Gregory. “The Vacuum of Space Cybersecurity.” *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.
6. Czaplewski, Krzysztof. “Does Poland Need eLoran?” *the 18th International Conference on Transport System Telematics*. Springer, Cham, 2018. 525–544. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7\_35.
7. Roth, G. Linn, and Paul W. Schick. “New Loran capabilities enhance performance of hybridized GPS/Loran receivers.” *Navigation* 46.4 (1999): 249–260. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1999.tb02412.x.
8. Yuyukin, Igor V. “Spline interpolation of navigational isolines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
9. 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.
10. *Loran-C User Handbook*. Washington: USCG, 1992.
11. Yuyukin, Igor V. “Geoid approximation by methods of spline functions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
12. Yuyukin, Igor V. “Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
13. Yuyukin, Igor V. “Interpolation of navigational function by lagrange type spline.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
14. Song, Se-Phil, Mi-Young Shin, Seok-Bo Son, Young-Baek Kim, Sang-Jeong Lee, and Chan-Sik Park. “The Integrated eLoran/GPS Navigation Algorithm for Reduced Computational Complexity and High Accuracy.” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 60.3 (2011): 612–619. DOI: 10.5370/KIEE.2011.60.3.612.
15. Czaplewski, Krzysztof, and Adam Weintrit. “The Identification of Possible Applications of the E-Loran System.” *Annual of Navigation* 25.1 (2018): 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
16. Psiaki, Mark L., Todd E. Humphreys, and Brian Stauffer. “Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here’s how to fight back GPS lies.” *IEEE Spectrum* 53.8 (2016): 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.
17. Fang, Tae Hyun, Youngki Kim, Don Kyu Kim, Sangheon Lee, Ki-Yeol Seo, and Sang Hyun Park. “Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter.” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 24 (2018): 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.0079.
18. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Kiyool Seo, Sanghyun Park, and Tae Hyun Fang. “Preliminary study of the re-radiation effect of Loran signal to improve the positioning accuracy.” *2019 European Navigational Conference (ENC)*. IEEE, 2019. 1–4. DOI: 10.1109/EURONAV.2019.8714156.

19. Son, Pyo-Woong, Joon Hyo Rhee, and Jiwon Seo. “Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 54.2 (2017): 666–679. DOI: 10.1109/TAES.2017.2762438.

20. Mina, Tara Yasmin, Sriramya Bhamidipati, and Grace Xingxin Gao. “GPS spoofing detection for the power grid network using a multireceiver hierarchical framework architecture.” *Navigation* 66.4 (2019): 857–875. DOI: 10.1002/navi.341.

21. Falco, Gregory. “Cybersecurity Principles for Space Systems.” *Journal of Aerospace Information Systems* 16.2 (2019): 61–70. DOI: 10.2514/1.I010693.

22. Czaplewski, Krzysztof, and Mariusz Waz. “Improvement in accuracy of determining a vessel’s position with the use of neural networks and robust m-estimation.” *Polish Maritime Research* 24.1 (2017): 22–31. DOI: 10.1515/pomr-2017-0003.

23. Kerns, Andrew J., Daniel P. Shepard, Jahshan A. Bhatti, and Todd E. Humphreys. “Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing.” *Journal of Field Robotics* 31.4 (2014): 617–636. DOI: 10.1002/rob.21513.

24. Psiaki, Mark L., and Todd E. Humphreys. “GNSS spoofing and detection.” *Proceedings of the IEEE* 104.6 (2016): 1258–1270. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2526658.

25. Liu, Yang, Sihai Li, Qiangwen Fu, and Zhenbo Liu. “Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System.” *Sensors* 18.5 (2018): 1433. DOI: 10.3390/s18051433.

26. Hu, Yanfeng, Shaofeng Bian, Bing Ji, and Juan Li. “Spoofing Detection Technique Using Fraction Parts of Double-difference Carrier phases.” *The Journal of Navigation* 71.5 (2018): 1111–1129. DOI: 10.1017/S0373463318000206.

27. Kugler, Logan. “Why GPS Spoofing is a Threat to Companies, Countries.” *Communications of the ACM* 60.9 (2017): 18–19. DOI:10.1145/3121436.

28. Bhatti, Jahshan, and Todd E. Humphreys. “Hostile Control of Ships via False GPS Signals: Demonstration and Detection.” *Navigation* 64.1 (2017): 51–66. DOI: 10.1002/navi.183.

29. Borio, Daniele, and Ciro Gioia. “A sum-of-squares approach to GNSS spoofing detection.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 52.4 (2016): 1756–1768. DOI: 10.1109/TAES.2016.150148.

**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](mailto:enigma_777@mail.ru), [kaf\\_nav@gumrf.ru](mailto:kaf_nav@gumrf.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Yuyukin, Igor V.** —  
 PhD, associate professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [enigma\\_777@mail.ru](mailto:enigma_777@mail.ru), [kaf\\_nav@gumrf.ru](mailto:kaf_nav@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 17 июля 2020 г.  
 Received: July 17, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725

## DEVELOPING A MODEL OF THE DYNAMICS OF UNMANNED VESSEL ON COURSE BASED ON THE EXPERIMENTAL DATA

**A. A. Dyda, K. N. Plyasheshnik, I. I. Pushkarev**

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation

*The issue of constructing a theoretical model of the dynamics of unmanned vessel on the course based on experimental data is discussed in the paper. A brief description of the experimental platform for unmanned surface vehicle (USV) and the equipment used in the study of the dynamic characteristics of the object is given. It is noted that the USV is characterized by three modes of movement: displacement, semi-displacement and planning. When collecting data to build a boat dynamics model, zigzag maneuvers and circulation are used. The developed software and hardware with a frequency of 10 Hz ensure the preservation of the required parameters, in particular, the boat speed, the angular velocity, the current position of the steering wheel. At the first stage, a theoretical model of the USV dynamics along the course is selected. The well-known Nomoto models of the 1st and 2nd orders are selected as such. At the second stage of constructing models of the USV dynamics along the course, a quadratic criterion is set; it estimates the deviation of the angular velocity of the experimental boat from the estimates of the angular velocity generated by the Nomoto model, with the same input action (position of the steering wheel). Thus, the task is reduced to the optimization of the quadratic criterion by choosing the parameters of the Nomoto model. This problem can be solved both analytically and numerically, using special software tools. Its complexity depends on the order of the selected ship dynamics model. In this work, the selection of the parameters of the vessel dynamics along the course is carried out in two ways: using a solution search tool in MS Excel and on the basis of the System Identification Toolbox software package. Both options give a good match for the parameters of the constructed dynamics model. Studies have shown that using the more complex 2nd order Nomoto model improves the quality criterion over the simpler 1st order model. The approach used in the work has a fairly high degree of generality and can be practically applied without changes to build more complex nonlinear models of ship dynamics.*

*Keywords: unmanned vessel, traffic control, theoretical model, optimality criterion, experimental data, Nomoto model, numerical optimization, vessel dynamics, identification, model parameters, MATLAB.*

### For citation:

Dyda, Alexander A., Ksenya N. Pliasheshnik, and Igor I. Pushkarev. "Developing a model of the dynamics of unmanned vessel on course based on the experimental data." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.

УДК 681.5.015

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА ПО КУРСУ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**А. А. Дыда, К. Н. Пляшешник, И. И. Пушкарев**

Морской Государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация

*Рассмотрен вопрос построения теоретической модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных. Приводится краткое описание экспериментальной платформы для безэкипажного катера и оборудования, использованного при исследовании динамических характеристик объекта. Отмечается, что для катера характерными являются три режима движения: водоизмещающий, переходный и глиссирующий. При сборе данных для построения модели динамики катера использовались маневры типа «зиг-заг» и циркуляция. Разработанные программно-аппаратные средства с частотой 10 Гц обеспечили сохранение необходимых параметров, в частности таких, как скорость дви-*

жения, угловая скорость и текущее положение рулевого колеса. Так, на первом этапе выбиралась теоретическая модель динамики судна по курсу. В качестве таковых были выбраны известные модели Номото 1-го и 2-го порядка. На втором этапе построения моделей динамики по курсу задавался квадратичный критерий, оценивающий отклонение угловой скорости экспериментального катера от оценок угловой скорости, которую генерирует модель Номото при одном и том же входном воздействии (положении рулевого колеса). Таким образом, задача сводилась к оптимизации квадратичного критерия путем выбора параметров модели Номото. Подчеркивается, что эта задача может быть решена как аналитическим способом, так и численным с привлечением специальных программных средств. Ее сложность зависит от порядка выбранной модели динамики судна. В работе подбор параметров динамики судна по курсу был выполнен двумя способами: с помощью средства поиска решения в среде MS Excel и на базе программного пакета System Identification Toolbox. Оба варианта дали хорошее совпадение параметров построенной модели динамики. Исследования показали, что использование более сложной модели Номото второго порядка позволяет улучшить критерий качества по сравнению с более простой моделью первого порядка. Используемый в работе подход имеет достаточно высокую степень общности и практически без изменений может быть применен для построения более сложных нелинейных моделей динамики судна.

*Ключевые слова:* безэкипажное судно, управление движением, теоретическая модель, критерий оптимальности, экспериментальные данные, модель Номото, численная оптимизация, динамика судна, идентификация, параметры модели, matlab.

**Для цитирования:**

Дыда А. А. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных / А. А. Дыда, К. Н. Пляшешник, И. И. Пушкарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.

### **Введение (Introduction)**

В современном мире в различных областях человеческой деятельности получили активное развитие беспилотные технологии. Тенденция применения автоматических транспортных средств является актуальной и в морской отрасли [1]. Так, наблюдается постоянный рост числа заинтересованных сторон, принимающих активное участие в разработке алгоритмов, оборудования и технологических решений, направленных на развитие нового вида морского транспорта — безэкипажных судов [2], [3]. При разработке безэкипажного судна его центральным и наиболее сложным элементом является *система управления* [4]. Для построения эффективной системы управления движением судна требуется его адекватная математическая модель [5]–[7]. В специальной литературе приведено описание ряда теоретических моделей, описывающих динамику судна: от полных нелинейных, многомерных моделей, представляющих собой совокупность дифференциальных уравнений, до упрощенных частных моделей, описывающих определенные режимы движения судна.

*Целью настоящей работы* является построение частных математических моделей динамики судна по курсу на основе экспериментальных данных, полученных в процессе морских испытаний экспериментальной платформы для безэкипажного катера (БЭК).

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Экспериментальная платформа БЭК (рис. 1) представляет собой алюминиевый глиссирующий катер с катамаранными обводами корпуса ассиметричного типа, имеющими плоские внутренние поверхности («Split Hull») [8]. Длина катера составляет 6 м, ширина — 2,6 м и водоизмещение — 1,3 т. Силовая установка состоит из двух подвесных лодочных моторов мощностью по 40 л. с.

При разработке математической модели необходимо учитывать, что динамические характеристики катера могут существенно отличаться на разных режимах движения. Используемый катер имеет несколько основных режимов движения: водоизмещающий, переходный и глиссирующий. Для сбора экспериментальных данных использовались установившиеся режимы движения на ряде фиксированных диапазонов скоростей: 1,5–2 м/с, 2,5–3 м/с, 3,5–4 м/с, 4–5 м/с, 5–8 м/с.

Для сбора экспериментальных данных можно использовать различные стандартные виды техники маневрирования, которые были предложены на Международной конференции опытовых бассейнов (International Towing Tank Conference) и описаны в работе Тора Фоссена [9]: маневры: *циркуляция, зиг-заг, спираль, разгон – торможение* и т. д.

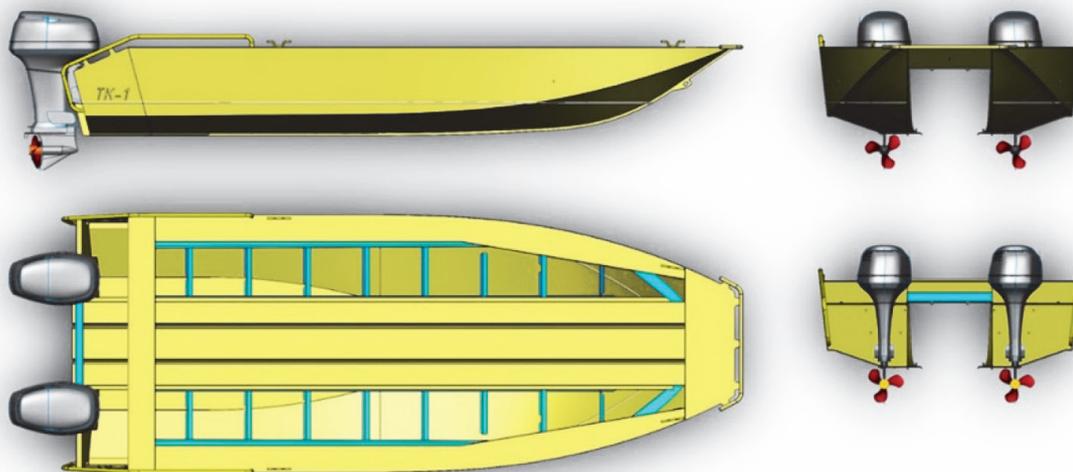


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной платформы для БЭЖ

В рассматриваемом случае сбор данных происходил на спокойной воде при выполнении маневров *зиг-заг* и *циркуляции* как наиболее подходящие для оценки динамики судна по курсу [10].

В процессе выполнения указанных маневров с частотой 10 Гц производилась запись необходимых параметров: скорости движения, угловой скорости и текущего положения рулевого колеса. Данные скорости поступали с GPS / Глонасс-приемника, а для получения данных угловой скорости использовался датчик ориентации CH Robotics UM7-LT [11]. Пример полученных экспериментальных данных при выполнении тестового маневра приведен на рис. 2.

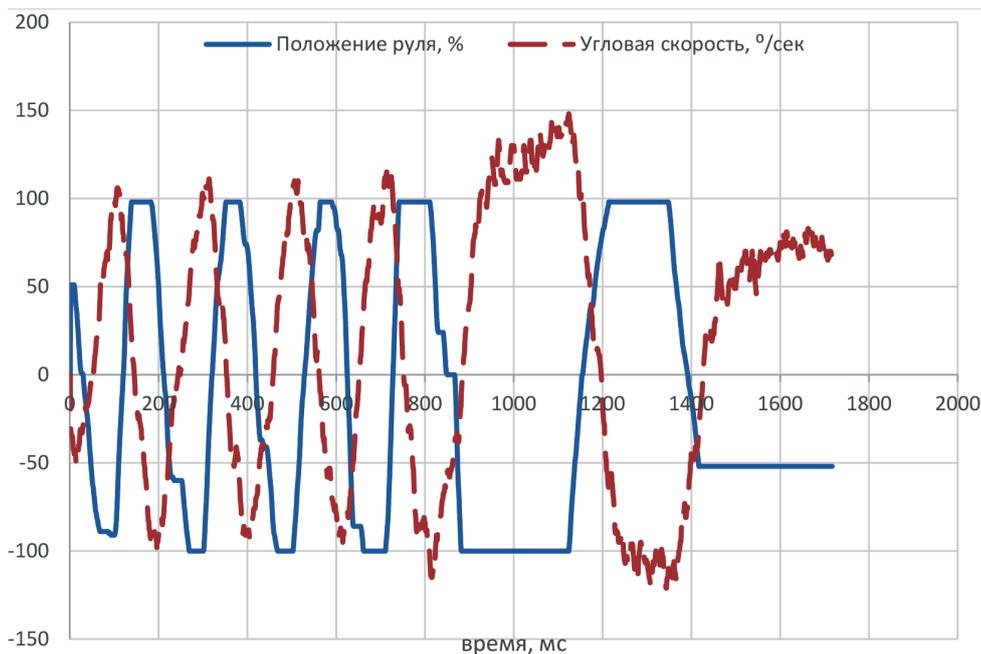


Рис. 2. Полученные экспериментальные данные при скорости движения 2,5–3 м/с

### Результаты (Results)

Первым шагом построения модели динамики движения судна по курсу является выбор теоретической модели. В специальной литературе к таким моделям относятся линейные модели Номото 1-го и 2-го порядка [12], нелинейные модели Беха [13] и Норбина [14]. После выбора конкретной модели следующим шагом является нахождение ее параметров (коэффициентов передачи, постоянной времени и т. д.), при котором обеспечивается максимальное совпадение экспериментальных данных с данными, полученными на основе использования теоретической модели при одном и том же воздействии. Наиболее часто применяемым методом для решения подобных задач является *метод наименьших квадратов*, суть которого заключается в формировании критерия, представляющего собой сумму разностей между экспериментальными данными и данными, вычисленными на основе использования выбранной теоретической модели.

В данной работе использованы модели Номото 1-го и 2-го порядка как наиболее распространенные и удобные для практического использования [15]. Модель Номото 1-го порядка имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= -\frac{1}{T}\omega + \frac{k}{T}\delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$  — угол поворота пера руля;  
 $\varphi$  — курс;  
 $\omega$  — угловая скорость;  
 $T$  — постоянная времени;  
 $k$  — коэффициент передачи.

Выполнив необходимую дискретизацию модели с шагом по времени  $\Delta t$  и заменив производные в уравнении (1) конечными разностями, получим:

$$\begin{aligned} \delta &= wh; \\ \dot{\omega} &= -\frac{1}{T}\omega + \frac{k}{T}wh; \\ \frac{\omega(i+1) - \omega(i)}{\Delta t} &= -\frac{1}{T}\omega(i) + \frac{k}{T}wh(i); \\ \omega(i+1) &= \omega(i) + \Delta t \left( -\frac{1}{T}\omega(i) + \frac{k}{T}wh(i) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $w$  — положение рулевого колеса (пера руля);  
 $h$  — коэффициент преобразования положения рулевого колеса в угол положения движителей.  
 Задача нахождения параметров и  $t$  может быть решена аналитически. Для этого сформируем критерий:

$$\sum_{i=1}^n (\omega_{\text{пр}} - \omega_{\text{т}})^2, \quad (3)$$

где  $i$  — номер шага;  
 $n$  — количество шагов;  
 $\omega_{\text{пр}}$  — угловая скорость экспериментальная;  
 $\omega_{\text{т}}$  — угловая скорость теоретическая.

Задача сводится к минимизации данного критерия. Наиболее удобным с практической точки зрения является путь прямой численной оптимизации с помощью вычислительной среды MS Excel, в которую встроена функция поиска решения. Данная функция позволяет выполнить оптимизацию. Результаты вычислений для заданных диапазонов скоростей показаны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты идентификации модели Номото 1-го порядка

$v$	1,5–2 м/с	2,5–3 м/с	3,5–4 м/с	4–5 м/с	6–8 м/с
$k$	–0,20735	–0,31202	–0,32782	–0,28908	–0,2698
$t$	5,744963	4,094419	2,924847	1,644972	1,421113

Сравнительные графики практических угловых скоростей и теоретических, вычисленных по полученным моделям Номото 1-го порядка для заданных диапазонов скоростей, показаны на рис. 3.

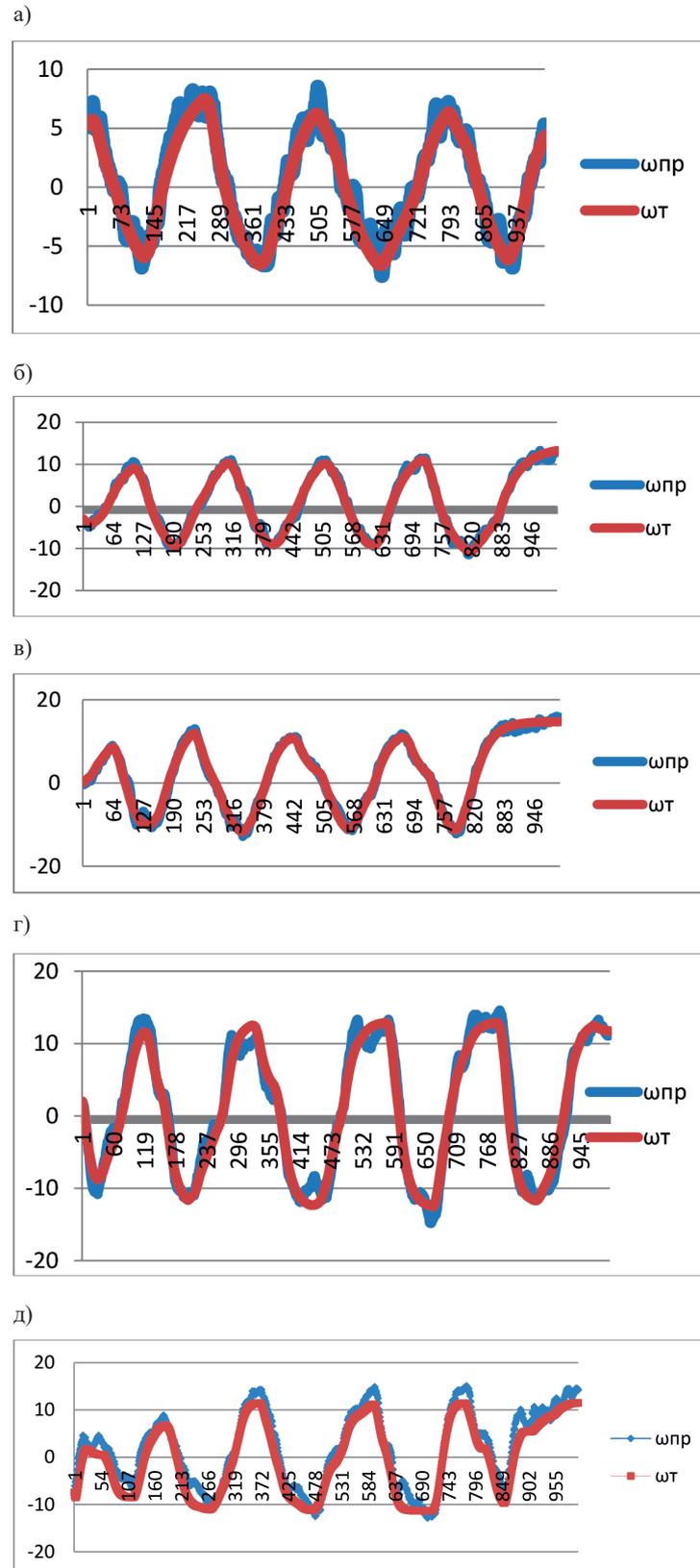


Рис. 3. Сравнительный график результатов практических и теоретических значений угловой скорости: а — диапазон скоростей 1,5–2 м/с; б — диапазон скоростей 2,5–3 м/с; в — диапазон скоростей 3,5–4 м/с; г — диапазон скоростей 5–6 м/с; д — диапазон скоростей 6–8 м/с

Дополнительно идентификацию теоретической модели можно выполнить автоматическим способом с помощью специальных программных средств. Так, коэффициенты модели Номото 1-го порядка, полученные на основе использования экспериментальных данных, были вычислены с помощью программного пакета System Identification Toolbox матричной лаборатории MATLAB [16]. Полученные коэффициенты практически совпали с коэффициентами, вычисленными предыдущим способом и указанными в табл. 1.

Программный пакет System Identification Toolbox позволяет рассчитывать критерий адекватности полученной модели *Fit*, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{Fit} = 100(1 - \text{norm}(y/h-y) / \text{norm}(y - \text{mean}(y))), \quad (4)$$

где  $y$  — измеряемые выходные данные;

$yh$  — данные, полученные в результате моделирования;

$\text{norm}()$  — функция расчета нормы вектора;

$\text{mean}()$  — функция расчета среднего значения.

Полученные критерии *Fit* имеют значения 75–90 % для разных диапазонов скоростей, что свидетельствует о высокой оценке адекватности модели.

Модель Номото 2-го порядка имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_1; \\ \dot{\omega}_1 &= \omega_2; \\ \dot{\omega}_2 &= \frac{1}{T_1 T_2} (-(T_1 + T_2)\omega_2 - \omega_1 + k\delta), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\delta$  — угол поворота пера руля;

$\varphi$  — курс;

$\omega$  — угловая скорость,

$T_1, T_2$  — постоянные времени;

$k$  — коэффициент передачи.

Выполнив дискретизацию модели с шагом по времени, заменив производные в уравнении (5) конечными разностями, получим:

$$\begin{aligned} \omega_1(i+1) &= \omega_1(i) + \Delta t \cdot \omega_2(i); \\ \omega_2(i+1) &= \omega_2(i) + \Delta t \left( \frac{1}{T_1 T_2} (-(T_1 + T_2)\omega_2(i) - \omega_1(i) + k\delta(i)) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Формируем критерий  $\sum_{i=1}^n (\omega_{\text{пр}} - \omega_t)^2$ , и решаем задачу минимизации аналогично, как и для модели Номото 1-го порядка. Результаты вычислений для заданных диапазонов скоростей показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты идентификации модели Номото 2-го порядка**

$v$	1,5–2 м/с	2,5–3 м/с	3,5–4 м/с	4–5 м/с	6–8 м/с
$T1$	1,92377	1,577227	1,269899	0,754507	0,638517
$T2$	1,92377	1,577227	1,269899	0,754507	0,638517
$k$	–0,14718	–0,24642	–0,2928	–0,27247	–0,25611

Сравнительные графики практических угловых скоростей и теоретических, вычисленных по полученным моделям Номото 2-го порядка, для заданных диапазонов скоростей показаны на рис. 4.

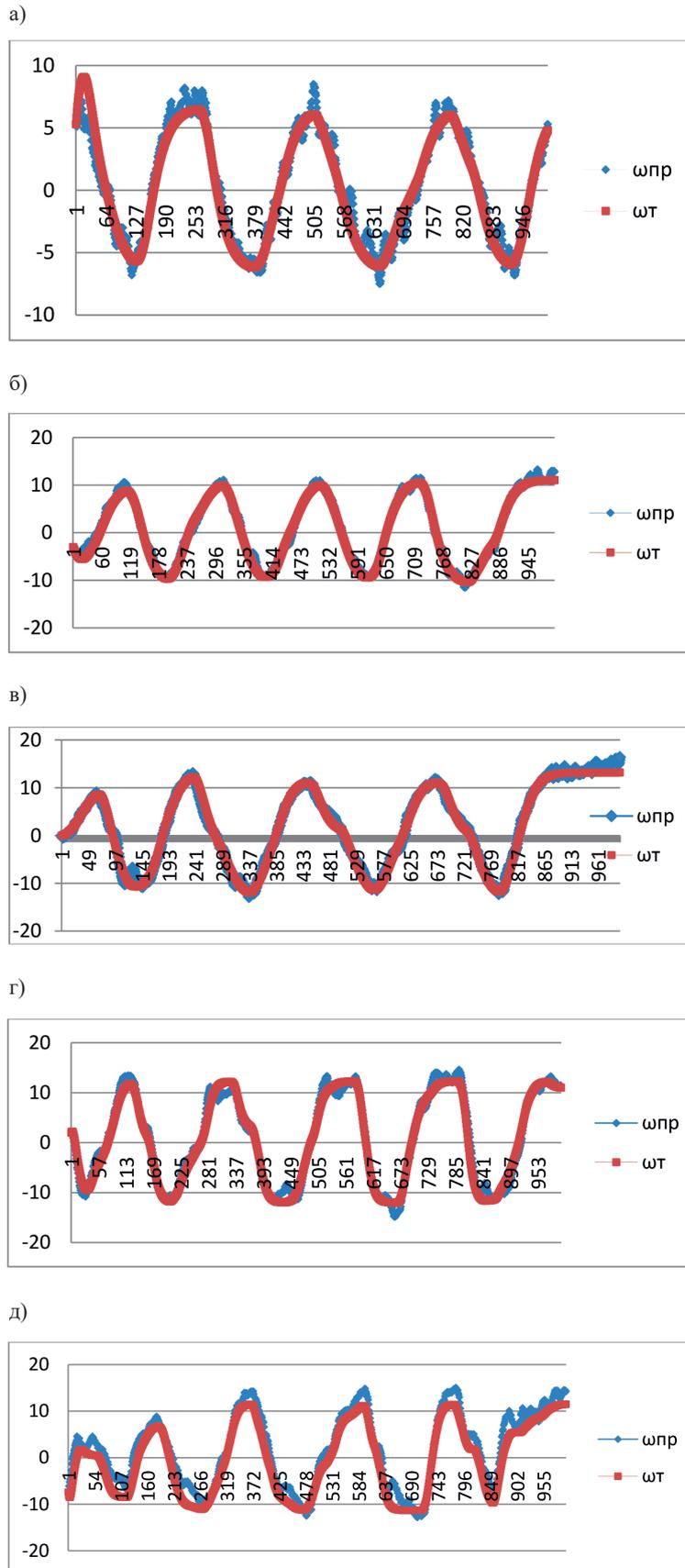


Рис. 4. Сравнительный график результатов практических и теоретических значений угловой скорости: а — диапазон скоростей 1,5–2 м/с; б — диапазон скоростей 2,5–3 м/с; в — диапазон скоростей 3,5–4 м/с; г — диапазон скоростей 4–5 м/с; д — диапазон скоростей 6–8 м/с

Критерий адекватности полученной модели, вычисленный в System Identification Toolbox для модели Номото 2-го порядка, повысился на 1–5 %. Применение данной модели позволило достичь незначительного улучшения результата.

### Заключение (Conclusion)

В работе предложено решение задачи идентификации динамики судна по курсу, заключающееся в определении параметров уравнений на примере традиционных линейных моделей Номото 1-го и 2-го порядка. Построение линейных моделей динамики выполнялось на основе фактических экспериментальных данных, полученных во время морских испытаний экспериментальной платформы БЭК. Сущность применяемого подхода заключалась в согласовании экспериментальных данных о движении судна по курсу и их оценок, получаемых на основе выбранной теоретической модели. Задача построения модели динамики БЭК по курсу была сведена к оптимизации построенного квадратичного критерия путем определения параметров выбранной теоретической модели. Использованный подход обладает достаточно высокой степенью общности и может быть использован для построения более сложных нелинейных моделей динамики судна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paton G.* UK's first fully autonomous vessel the C-Worker 7 is launched / G. Paton // The Times. — 2018 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.thetimes.co.uk/article/uk-s-first-fully-autonomous-vessel-the-c-worker-7-is-launched-86jwnzmm#:~:text=The%20vessel%2C%20C%2DWorker%207,for%20up%20to%2030%20days> (дата обращения: 01.08.2020).
2. *Koikas G.* New Technology trends in the design of Autonomous Ships / G. Koikas, M. Papoutsidakis, N. Nikitakos // International Journal of Computer Application. — 2019. — Vol. 178. — No. 25. — Pp. 4–7. DOI: 10.5120/ijca2019919043.
3. *Komianos A.* The autonomous shipping era. operational, regulatory, and quality challenges / A. Komianos // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.
4. *Вагущенко Л. Л.* Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — Одесса: Латстар, 2002. — 310 с.
5. *Смоленцев С. В.* Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
6. *Позняков С. И.* Сравнение математических моделей с точки зрения коэффициентов влияния / С. И. Позняков, Ю. И. Юдин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 241–245.
7. *Юдин Ю. И.* Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Ю. И. Юдин, С. И. Позняков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 234–239.
8. *Назаров А.* Особенности проектирования глиссирующих катамаранов / А. Назаров // Катера и Яхты. — 2009. — № 2 (218). — С. 61–65.
9. *Fossen T. I.* Marine control systems. Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles / T. I. Fossen // Marine Cybernetics. — Trondheim, Norway, 2009. — Pp. 330–335.
10. *Artyszuk J.* Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion / J. Artyszuk // Annual of Navigation. — 2016. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 23–38. DOI: 10.1515/aon-2016-0002.
11. UM7 datasheet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet\\_v1-6\\_10.1.2016.pdf](http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Datasheet_v1-6_10.1.2016.pdf) (дата обращения 10.07.2019).
12. *Nomoto K.* On the steering qualities of ship / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // Journal of Zosen Kiokai. — 1956. — Vol. 1956. — Is. 99. — Pp. 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99\_75.
13. *Bech M. I.* Paper 17. Some Aspects of the Stability of Automatic Course Control of Ships / M. I. Bech // Journal of Mechanical Engineering Science. — 1972. — Vol. 14. — Is. 7. — Pp. 123–131. DOI: 10.1243/JMES\_JOUR\_1972\_014\_072\_02.

14. *Norrbin N. H.* On the Design and Analysis of the Zig-Zag Test on Base of Quasilinear Frequency Response / N. H. Norrbin // Technical Report No. B140-3. — The Sweden State Shipbuilding Experimental Tank (SSPA), 1963. — Vol. 14. — Is. 7. — Pp. 91–107.
15. *Carrillo S.* Obtaining First and Second Order Nomoto Models of a Fluvial Support Patrol using Identification Techniques / S. Carrillo, J. Contreras // *Ship Science and Technology*. — 2018. — Vol. 11. — Pp 19–28. DOI: <https://doi.org/10.25043/19098642.160>.
16. *Ljung L.* System Identification Toolbox User's Guide / L. Ljung. — The MathWorks, Inc, 2014. — 886 p.

## REFERENCES

1. Paton, Graeme. "UK's first fully autonomous vessel the C-Worker 7 is launched." *The Times* (2018). Web. 1 Aug. 2020 <<https://www.thetimes.co.uk/article/uk-s-first-fully-autonomous-vessel-the-c-worker-7-is-launched-86jwnzmmr#:-:~:text=The%20vessel%2C%20C%2DWorker%207,for%20up%20to%2030%20days>>.
2. Koikas, G., M. Papoutsidakis, and N. Nikitakos. "New Technology trends in the design of Autonomous Ships." *International Journal of Computer Application* 178.25 (2019): 4–7. DOI: 10.5120/ijca2019919043.
3. Komianos, Aristotelis. "The autonomous shipping era. operational, regulatory, and quality challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.
4. Vagushchenko, L. L., and N. N. Tsymbal. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Odesa: Latstar, 2002.
5. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "A simple analytical model of ship movement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
6. Poznyakov, S. I., and Yu. I. Yudin. "Sravnenie matematicheskikh modelei s tochki zreniya koeffitsientov vliyaniya." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 9.2 (2006): 241–245.
7. Judin, J. I., and S. I. Poznjakov. "Manevrennie charakteristiki sudna kak funkzii parametrov ego matematicheskoy modeli." *Vestnik MGTU* 9.2 (2006): 234–239.
8. Nazarov, A. "Osobennosti proektirovaniya glissiruyushchikh katamaranov." *Katera i Yakhty* 2(218) (2009): 61–65.
9. Fossen, Thor I. "Marine control systems. Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles." *Marine Cybernetics*. Trondheim, Norway, 2009. 330–335.
10. Artyszuk, Jarosław. "Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion." *Annual of Navigation* 23.1 (2016): 23–38. DOI: 10.1515/aon-2016-0002.
11. UM7 datasheet. Web. 10 July 2019 <[http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Ddatasheet\\_v1-6\\_10.1.2016.pdf](http://www.chrobotics.com/docs/UM7%20Ddatasheet_v1-6_10.1.2016.pdf)>.
12. Nomoto, Kensaku, Kenshi Taguchi, Keinosuke Honda, and Susumu Hirano. "On the steering qualities of ships." *Journal of Zosen Kiokai* 1956.99 (1956): 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99\_75.
13. Bech, M. I. "Paper 17. Some Aspects of the Stability of Automatic Course Control of Ships." *Journal of Mechanical Engineering Science* 14.7 (1972): 123–131. DOI: 10.1243/JMES\_JOUR\_1972\_014\_072\_02.
14. Norrbin, N. H. "On the Design and Analysis of the Zig-Zag Test on Base of Quasilinear Frequency Response." *Technical Report No. B140-3*. The Sweden State Shipbuilding Experimental Tank (SSPA), 1963. Vol. 14. Is. 7. 91–107.
15. Carrillo, Sandra, and Juan Contreras. "Obtaining First and Second Order Nomoto Models of a Fluvial Support Patrol using Identification Techniques." *Ship Science and Technology* 11.22 (2018): 19–28.
16. Ljung, Lennart. *System Identification Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc, 2014.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дыда Александр Александрович** — доктор технических наук, профессор Морской государственной университет имени адмирала Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
e-mail: [adyda@mail.ru](mailto:adyda@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dyda, Alexander A.** — Dr. of Technical Sciences, professor Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy 50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation  
e-mail: [adyda@mail.ru](mailto:adyda@mail.ru)

**Пляшешник Ксения Николаевна** — аспирант

*Научный руководитель:*

Дыда Александр Александрович  
Морской государственный университет  
имени адмирала Г. И. Невельского  
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, д.50а  
e-mail: [ksushechka\\_1991@mail.ru](mailto:ksushechka_1991@mail.ru)

**Пушкарев Игорь Игоревич** — аспирант

*Научный руководитель:*

Дыда Александр Александрович  
Морской государственный университет имени  
адмирала Г. И. Невельского  
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,  
ул. Верхнепортовая, 50а  
e-mail: [B\\_r\\_i\\_g88@mail.ru](mailto:B_r_i_g88@mail.ru)

**Pliasheshnik, Ksenya N.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Dyda, Alexander A.  
Maritime State University  
named after admiral G.I. Nevelskoy  
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,  
Russian Federation  
e-mail: [ksushechka\\_1991@mail.ru](mailto:ksushechka_1991@mail.ru)

**Pushkarev, Igor I.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Dyda, Alexander A.  
Maritime State University  
named after admiral G.I. Nevelskoy  
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,  
Russian Federation  
e-mail: [B\\_r\\_i\\_g88@mail.ru](mailto:B_r_i_g88@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 6 августа 2020 г.*

*Received: August 6, 2020.*

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733

## RESEARCH OF TRAFFIC ROUTES OF THE LARGE-TONNAGE VESSELS IN THE EASTERN SECTOR OF THE NORTHERN SEA ROUTE

**К. Я. Исaulova**

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

*The features of the transport vessels shipping in the Eastern sector of the Arctic by using an automatic identification system are identified in the paper. The main advantages of using the Northern Sea Route as a transport route for goods transportation between Europe and the countries of the Arctic Pacific region, over against the actively used route through the Suez Canal, are presented. The data characterizing the volume of sea freight for the period from 2009 to 2019 is presented. The uneven hydrographic knowledge of the Eastern and Western sectors of the Northern Sea Route is noted, as well as unfavorable navigation conditions in the Eastern sector. It was revealed that the hydrographic knowledge of the Northern Sea Route does not correspond to the requirements of the International Hydrographic Organization, which prescribes the detection of underwater obstacles with sizes up to one meter and their application on the nautical navigation charts. The main directions for the development of the Northern Sea Route infrastructure for the period up to 2035, which include measures aimed at the formation of navigation and hydrographic support, are considered. The data on the distribution of the ships number during the navigation period in the Eastern sector of the Northern Sea Route are presented. The role of hydrographic research in the development of the transport infrastructure of the Arctic seas is noted. The data obtained as a result of the analysis of the large-tonnage vessels navigation during the summer navigation in the Eastern sector of the Northern Sea Route, as well as the parameters of the lane width of the large-tonnage vessels are displayed. It contains the main stages of the procedure for determining the lateral deviations of the large-tonnage vessels trajectory from the recommended routes. Based on the results of the data obtained, priority areas for carrying out hydrographic work are identified. The application field of the obtained data and the possibility of using the results in solving practical problems are determined.*

*Keywords: Northern Sea Route, lateral deviation, Eastern sector, lane width, hydrographic knowledge, recommended route, geoinformation technology.*

**For citation:**

Isaulova, Kristina Ya. "Research of traffic routes of the large-tonnage vessels in the eastern sector of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralа S. O. Makarova* 12.4 (2020): 726–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733.

**УДК 528.47**

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

**К. Я. Исaulова**

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

*Работа посвящена выявлению особенностей судоходства транспортных судов в Восточном секторе Арктики путем применения автоматической идентификационной системы. Представлены основные преимущества использования Северного морского пути как транспортной магистрали для транспортировки грузов между Европой и странами Арктического Тихоокеанского региона по сравнению с активно используемым маршрутом через Суэцкий канал. Приведены данные, характеризующие объем морских грузоперевозок за период 2009–2019 гг. Отмечается неравномерная гидрографическая изученность Восточного и Западного секторов акватории Северного морского пути, а также неблагоприятные навигационные условия в Восточном*

секторе. Выявлено несоответствие гидрографической изученности Северного морского пути требованиям Международной гидрографической организации, предписывающей обнаружение подводных препятствий размерами до 1 м и нанесение их на морские навигационные карты. Рассмотрены основные направления для развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г., которые включают мероприятия, направленные на формирование навигационно-гидрографического обеспечения. Представлены данные по распределению количества судов в период навигации в Восточном секторе Северного морского пути. Отмечается роль гидрографических исследований в развитии транспортной инфраструктуры арктических морей. Отображены данные, полученные в результате анализа судоходства крупнотоннажных судов в период летней навигации в Восточном секторе Северного морского пути, а также параметры ширины полосы движения крупнотоннажных судов. Содержатся основные этапы процедуры определения боковых отклонений траектории крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов. По результатам полученных данных выявлены приоритетные районы для проведения гидрографических работ. Определена область применения полученных данных и возможность использования результатов при решении практических задач.

**Ключевые слова:** Северный морской путь, боковое отклонение, Восточный сектор, ширина полосы движения, гидрографическая изученность, рекомендованный маршрут, геоинформационная технология.

**Для цитирования:**

Исаулова К. Я. Исследование маршрутов движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 726–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733.

**Введение (Introduction)**

В настоящее время объем грузоперевозок водным транспортом в мире занимает больше половины от общего грузообъема и имеет опережающую динамику по сравнению с другими видами перевозок. Северный морской путь (СМП) является самым коротким маршрутом для осуществления доставки грузов из Европы в страны Арктического Тихоокеанского региона. Если провести сравнение СМП с альтернативным активно используемым маршрутом через Суэцкий канал, то можно выделить ряд преимуществ по использованию СМП [1], а именно:

- протяженность СМП меньше в 2,2 раза, что позволяет снизить затраты на топливо, фрахт судов и также оплату труда персонала;
- отсутствие очередей и оплаты за проход;
- значительная удаленность от районов, характеризующихся наличием морского пиратства.

Активное развитие СМП как важнейшей магистрали российского судоходства в Арктической зоне началось с 2009 г., когда между Европой и Азией по акватории СМП два судна выполнили коммерческий рейс, а в 2011 г. по акватории СМП прошло 34 судна. В настоящее время грузооборот на акватории СМП ежегодно увеличивается [2]. Так, за 10 лет в период с 2009 по 2019 гг. грузооборот увеличился с 20 тыс. т до 31,5 млн т [3]. На рис. 1 представлены данные грузоперевозок по СМП в период 2009–2019 гг.

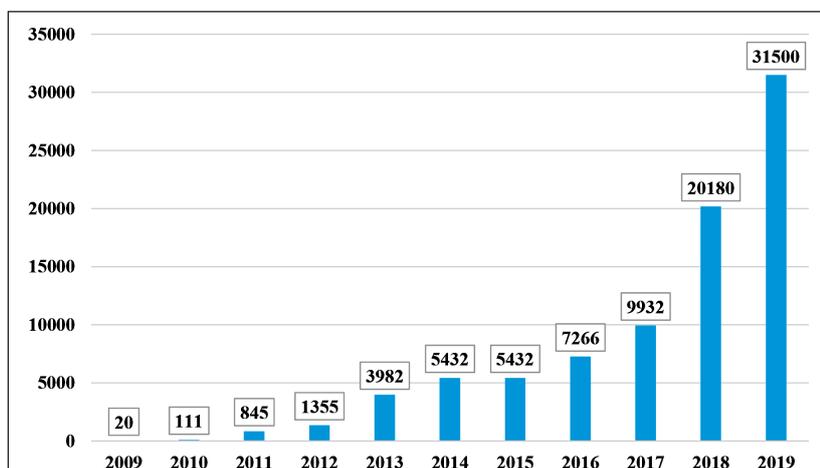


Рис. 1. Объем грузоперевозок по акватории СМП в период 2009–2019 гг.

Основной объем грузоперевозок по СМП составляют перевозки Карского моря, относящиеся к Западному сектору акватории СМП. Навигационные условия в Восточном секторе СМП, к которому относятся море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, являются менее благоприятными, чем в Западном секторе. Акватория СМП в Восточном секторе характеризуется сложными гидрометеорологическими условиями и обилием мелководных участков, а также районов с недостаточной изученностью рельефа дна.

«План развития инфраструктуры СМП на период до 2035 г.» [4] принят для реализации совокупности мероприятий, реализация которых позволит вывести СМП на новый уровень и решить ряд народнохозяйственных задач. Этот документ включает мероприятия, направленные на развитие навигационно-гидрографического обеспечения в акватории СМП, а также предусматривает ежегодное проведение съемки рельефа дна, обеспечение действий средств навигационного оборудования и развитие средств контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС / GPS. Проведение данных мероприятий позволит обеспечить повышение привлекательности и безопасности СМП.

Современный уровень гидрографической изученности Восточного сектора акватории СМП не соответствует в полной мере стандартам Международной гидрографической организации, устанавливаемым для проведения съемки рельефа дна в районах плавания судов с предельно малым безопасным запасом воды под килем [5], [6]. Для устранения этого несоответствия все районы, по которым проходят маршруты крупнотоннажных судов, необходимо обследовать с высокой точностью и подробностью, которая должна гарантировать обнаружение подводных препятствий размерами до 1 м и нанесение их на морские навигационные карты. Ответственность за проведение гидрографических работ на акватории СМП возложена на ФГУП «Гидрографическое предприятие» [7]. Работы по обследованию рельефа дна проводятся в несколько этапов. На первом этапе выполняется обследование маршрутов в полосе, имеющей ширину 2 км, на втором этапе ширина полосы обследования будет увеличена до 10 км. В последующем площадь обследования будет увеличена еще больше.

Выход судна за пределы обследованной полосы связан с возможной его посадкой на неизвестную мель, что подтверждается результатами исследований, обобщенных в работах [8]–[10]. В работах [11], [12] содержатся исследования, посвященные вопросам о максимально допустимых боковых отклонениях от обследованной полосы, методика оценки которых основана на данных морфометрических характеристик рельефа дна арктических морей. Выбор проектной ширины полосы обследования, равной 2 или 10 км, обусловлен в основном простотой планирования гидрографических работ и необходимостью быстрого получения информации о глубинах вдоль всех рекомендованных маршрутов. Вместе с тем проектная ширина полос обследования не учитывает ширину полосы фактического движения судов.

*Целью настоящей работы* является исследование боковых отклонений траектории движения судов от рекомендованных маршрутов в акватории Восточного сектора СМП в летне-осеннюю навигацию 2019 г.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Основная доля всех грузов в акватории СМП перевозится крупнотоннажными судами, в состав которых входят газовозы проекта Yamalmax, контейнеровозы проекта «Норильский никель», танкеры проекта 42K Artic Shuttle Tanker. Осадка судов находится в пределах 9,5–11,8 м. Данные о движении судов получены с использованием геоинформационной технологии (ГИС) [13]–[15], которая позволяет определить местоположение судна с заданной дискретностью, оценить изменение общего количества судов в любой части акватории СМП на выбранный момент времени, а также зафиксировать величину отклонения положения судов относительно рекомендованных маршрутов, заданных ФГУП «Гидрографическое предприятие» [7]. Работы [16], [17] содержат сведения об использовании ГИС в целях исследования параметров морских транспортных потоков.

Схема рекомендованных маршрутов в Восточной части акватории СМП приведена на рис. 2. Рекомендованные маршруты на схеме выделены зеленым цветом. Сплошными линиями отмечены участки обследованных рекомендованных маршрутов, пунктирными — перспективные маршруты, на которых планируется проводить площадное обследование.

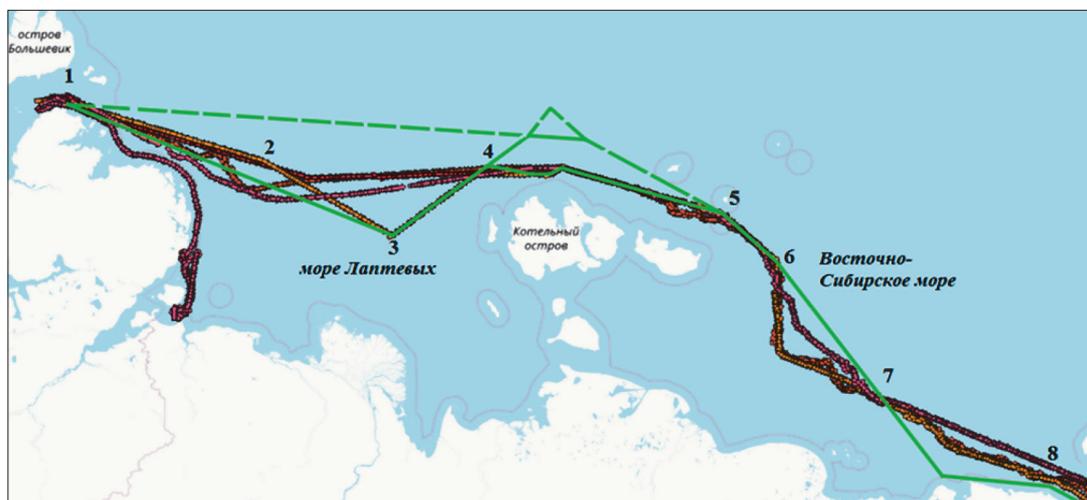


Рис. 2. Схема рекомендованных маршрутов крупнотоннажных судов

Рекомендованные маршруты в центральной и северной части моря Лаптевых проходят через районы с недостаточной гидрографической изученностью, где промер выполнен с подробностью 8000 м. В Восточно-Сибирском море рекомендованные маршруты проходят в районе, в котором рельеф дна обследован с междугалсовым расстоянием, равным 1000 м. На рис. 2 коричневыми линиями отмечены траектории движения крупнотоннажных судов, построенных по данным, полученным от судовых идентификационных систем.

В 2019 г. плавание крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории СМП началось в первой декаде июля [18]. Количество морских судов, находящихся в акватории Восточного сектора, показано на гистограмме, приведенной на рис. 3. В середине июля 2019 г. ежедневно в акватории находилось пять судов, в середине сентября их количество достигло максимального значения — 35 судов, в декабре навигация в Восточном секторе акватории СМП практически прекратилась.

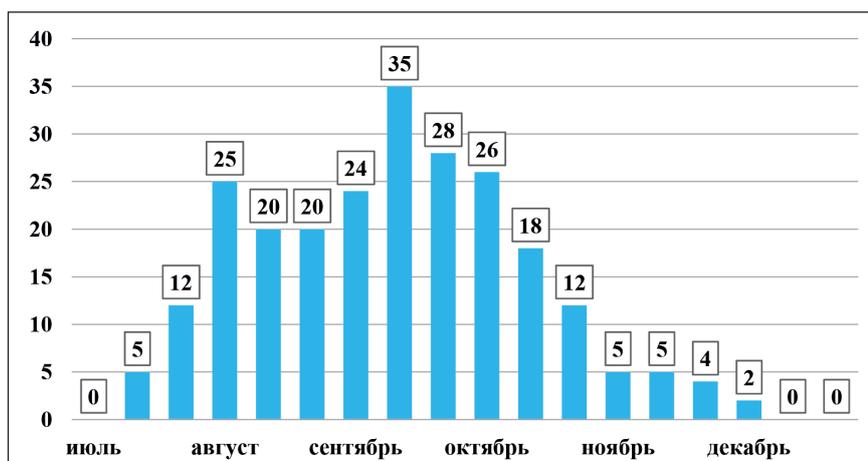


Рис. 3. Распределение количества морских судов в акватории Восточного сектора СМП

Процедура определения боковых отклонений траекторий крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов была разделена на следующие основные этапы:

- построение на электронной морской карте (ЭМК) рекомендованных маршрутов;
- идентификация судов;
- определение на ЭМК местоположения судов;
- измерение минимального и максимального отклонения траекторий судов от рекомендованного курса.

Наряду с боковыми отклонениями на каждом участке акватории определялась ширина полосы движения судов.

### Результаты (Results)

Результаты измерения боковых отклонений траектории крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов в Восточном секторе СМП, приведенные в табл. 1, систематизированы по месяцам с указанием максимальных и минимальных значений боковых отклонений в милях.

Таблица 1

**Боковые отклонения траектории крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов**

Месяц	Море Лаптевых		Восточно-Сибирское море		Чукотское море (пролив Лонга)	
	Западная часть, участок 1–2, max / min миль	Восточная часть, участок 2–4, max / min миль	Западная часть, участок 6–7, max / min, миль		Восточная часть, участок 7–8, max/min миль	
			«О»	«А»		
Июль	2/13	45/55	–	8/35	15/40	6/15
Август	7/40	60/90	7/12	1/40	7/40	7/20
Сентябрь	8/20	50/80	8/30	8	30/70	13/16
Октябрь	5/18	60/75	7/70	–	10/95	1/20
Ноябрь	2/10	60/90	5/80	–	40/100	2/30

Примечание. «О» — основная высокоширотная трасса в Восточно-Сибирском море, «А» — альтернативная.

Номера участков (см. табл. 1) соответствуют номерам точек, показанных на рис. 2. На участке 1–2 в июле 2019 г. среднее боковое отклонение составляло 8 миль. В августе-октябре средняя величина боковых отклонений увеличилась и составила: в августе до 47 миль, в сентябре до 28 миль, в октябре до 23 мили. В ноябре величина боковых отклонений сократилась до 12 миль. На участке 2–4 подавляющее большинство крупнотоннажных судов курсируют между основной и альтернативной высокоширотной трассой, и только малая часть — по основной трассе. На данном участке величина боковых отклонений практически постоянна в течение всей летней навигации и находится в пределах 50,0–67,5 миль.

Маршруты в Восточно-Сибирском море на участках 6–7 и 7–8 значительно отклоняются от рекомендованных маршрутов. На участке 6–7 траектории части судов проходят вдоль основной высокоширотной трассы, траектории другой части судов проходят по альтернативному маршруту. С августа по сентябрь 2019 г. движение судов осуществлялось как по основному, так и по альтернативному маршруту. В этот период наблюдались колебания величины боковых отклонений в пределах 8–20,5 миль на альтернативной трассе и 9,5–19,5 миль на основной. С октября по ноябрь суда на участке 6–7 курсировали только по основной трассе, в этот период величина боковых отклонений в среднем составляла 40 миль.

На участке 7–8, расположенном в 45 милях к северу от острова Айон, с июля по август боковые отклонения от рекомендованного маршрута составляют 23,5–27,5 миль, а с сентября по октябрь данная величина составляет 50–70 миль. В Чукотском море на участке 8–9 величина отклонений колеблется в среднем от 10,5 до 16 миль. Результаты определения ширины полосы движения судов на различных участках акватории в зависимости от месяца приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Ширина полосы движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории СМП**

Месяц	Ширина полосы движения судов, мили				
	Море Лаптевых		Восточно-Сибирское море		Чукотское море (пролив Лонга)
	Западная часть, участок 1–2	Восточная часть, участок 2–4	Западная часть, участок 6–7	Восточная часть, участок 7–8	Участок 8–9
Июль	30	15	35	26	20
Август	24	26	105	40	20
Сентябрь	15	26	75	40	23
Октябрь	14	22	60	35	25
Ноябрь	20	34	60	15	7

Приведенные в таблице данные показывают, что ширина полосы движения судов во всей акватории Восточного сектора акватории СМП гораздо больше, чем 2 км, и имеет непостоянный характер. В западной части моря Лаптевых минимальная ширина полосы движения составляет 14 миль, в восточной части — 15 миль. В западной части Восточно-Сибирского моря минимальная ширина полосы движения составляет 35 миль, в восточной части — 15 миль, в Чукотском море (пролив Лонга) — 7 миль. Максимальная ширина полосы движения судов в море Лаптевых достигает 34 мили в ноябре, в Восточно-Сибирском море — 105 миль в августе, в Чукотском море — 25 миль в октябре.

**Обсуждение результатов (Discussion)**

Данные, полученные в процессе проведения исследования за период 2019 г., показывают, что фактические траектории движения крупнотоннажных судов в летне-осенний навигационный период на отдельных участках не совпадают с рекомендованными маршрутами, на которых проводилось площадное обследование. Это особенно заметно в море Лаптевых на участке между точками 2 и 4, а также в Восточно-Сибирском море между точками 6 и 7, где отклонение траектории движения крупнотоннажных судов от рекомендованных маршрутов достигает несколько десятков миль.

Можно предположить, что положение рекомендованных маршрутов на морских навигационных картах требует существенной корректировки. Также необходима корректировка плана проведения площадного обследования акватории, который целесообразно привести в соответствие с фактическими маршрутами движения судов и фактической шириной полосы их движения.

**Заключение (Conclusion)**

В настоящее время в Восточном секторе СМП отсутствует опыт регулярной зимней навигации. Тем не менее можно предположить, что маршруты движения судов при плавании во льдах в период зимней навигации будут существенно отличаться от траектории движения транспортных судов в период летней навигации, поэтому данное обстоятельство следует учитывать при планировании будущих морских операций. План проведения гидрографических работ в Восточном секторе акватории СМП нуждается в корректировке на основе накопленного опыта эксплуатации крупнотоннажных судов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Киреев Н. Северный морской путь: будущее международных перевозок [Электронный ресурс] / Н. Киреев. — Режим доступа: <https://cont.ws/@nikolaykireev/377852> (дата обращения 10.07.2020).

2. Селин В. С. Современные тенденции и проблемы развития арктических морских грузопотоков / В. С. Селин // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2015. — № 4. — С. 60–73. DOI: 10.15838/esc/2015.4.40.4.
3. МорстрэнсИнфо: информационный отраслевой портал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mortrans.info/morskoj-byulleten/> (дата обращения: 20.06.2020).
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года №3120-р. «План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_341878/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341878/) (дата обращения: 15.07.2020).
5. MSC/Circ.1023. МЕРС/Circ.392. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. — London: International Maritime organization (IMO), 2002. — 52 p.
6. Zhao H. Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example / H. Zhao, H. Hu // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2016. — № 2549. — С. 78–85. DOI: 10.3141/2549-09.
7. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 22.06.2020).
8. Королев И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / И. Ю. Королев // 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.
9. Королев И. Ю. Проверка методики оценки допустимого отклонения судна от высокоширотной трассы Северного морского пути / И. Ю. Королев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 88–94. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94.
10. Ольховик Е. О. Формирование маршрутов движения судов в акватории Северного морского пути / Е.О. Ольховик // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 300–303.
11. 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.
12. Андреева Е. В. Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
13. Морской портал Сканэкс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.scanex.ru/cloud/maritime/> (дата обращения: 25.06.2020).
14. 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.
15. 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.
16. Iakovou E. T. An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing / E. T. Iakovou // Safety science. — 2001. — Vol. 39. — Is. 1-2. — С. 19–29. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4.
17. Eguíluz V. M. A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014 / V. M. Eguíluz, J. Fernández-Gracia, X. Irigoien, C. M. Duarte // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — Article number 30682. DOI: 10.1038/srep30682.
18. Сайт «Администрация Северного Морского Пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsra.ru/> (дата обращения: 26.05.2020).

## REFERENCES

1. Kireev, N. “Severnii morskoi put’: budushchee mezhdunarodnykh perevozok.”. Web. 10 Jul. 2020 <<https://cont.ws/@nikolaykireev/377852>>.

2. Selin, Vladimir Stepanovich. "Current Trends and Problems of Development of the Arctic Marine Freight Traffic." *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast* 4 (2015): 60–73. DOI: 10.15838/esc/2015.4.40.4.
3. Information portal Mortrans.info. Web. 20 Jun. 2020 <<https://www.mortrans.info/morskoj-byulleten/>>.
4. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21 dekabrya 2019 goda №3120-r. «Plan razvitiya infrastruktury Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda». Web. 15.07.2020 <[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_341878/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341878/)>.
5. MSC/Circ.1023. MEPC/Circ.392. *Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*. London: International Maritime organization (IMO), 2002.
6. Zhao, Hui, and Hao Hu. "Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2549 (2016): 78–85. DOI: 10.3141/2549-09.
7. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 22 Jun. 2020 <<http://www.hydro-state.ru/>>.
8. Korolev, Ivan Jurevich. "Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.
9. Korolev, Ivan Ju. "Verification of methods for assessment of the permissible vessel variation from the high-latitude Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 88–94. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94.
10. Olkhovik, E. "Formation of ship's movements in the aquatoria of the northern sea route." *Transport business of Russia* 6 (2018): 300–303.
11. 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.
12. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
13. SCANEX Group. Web. 25 Jun. 2020 <<http://www.scanex.ru/cloud/maritime/>>.
14. 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.
15. 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.
16. Iakovou, Eleftherios T. "An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing." *Safety science* 39.1-2 (2001): 19–29. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4.
17. Eguíluz, Victor M., Juan Fernández-Gracia, Xabier Irigoien, and Carlos M. Duarte. "A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014." *Scientific reports* 6 (2016). DOI: 10.1038/srep30682.
18. Federal state Institution "The Northern Sea Route Administration". Web. 26 May 2020 <<http://www.nsr.ru/>>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Исаулова Кристина Яновна** — 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: [isaulovakya@gumrf.ru](mailto:isaulovakya@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Isaulova, Kristina Ya.** — 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: [isaulovakya@gumrf.ru](mailto:isaulovakya@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 27 июля 2020 г.

Received: July 27, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744

## STUDYING THE FACTORS AFFECTING THE DURATION OF NAVIGATION IN THE NORTHERN SEA ROUTE WATER AREA

**A. L. Tezиков, E. O. Ol'khovik**

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

*The problem of year-round navigation in the water area of the Northern Sea Route is studied in the paper. The results of research obtained at the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping within the framework of the scientific school "Hydrographic support of the Northern Sea Route" in two main interrelated directions are given. The first direction is devoted to the study of the main natural-climatic and navigational-hydrographic factors affecting the conditions of navigation. The second direction is focused on the collection and analysis of statistical information on the parameters of ships movement and substantiation of the possibility of year-round navigation in the waters of all Arctic seas. The results on the distribution of depths over the area of all Arctic seas and stable ice massifs, which impede year-round navigation, are presented. Typical trajectories of vessels movement during summer-autumn and winter-spring navigation are considered. It is noted that permanent navigation is carried out only in the Kara Sea, and in the eastern part only during the ice-free period, with the exception of single sea transitions of vessels of high ice class Arc7. The main trends of changes in the fleet structure, conditions of ships navigation and development of shipping routes network in the Arctic seas, identified over the past ten years, are noted. Data on the number of ship calls to the ports of the eastern sector, which has tripled over the past five years, while the number of ship calls to the ports of the western part of the NSR has increased almost five times, are provided. Particular attention is paid to the results of studies related to the development of shipping routes network in the eastern sector of the Northern Sea Route and the prospects for year-round navigation of ships in the Laptev Sea and the East Siberian Sea water areas.*

*Keywords: Northern Sea Route (NSR), routes of transport vessels, intensity of calls, seasonal dependence, year-round navigation, Arctic seas.*

**For citation:**

Tezиков, Aleksandr L., and Evgeniy O. Ol'khovik. "Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.

**УДК 528.47**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ НАВИГАЦИИ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

**А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик**

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

*Статья посвящена изучению проблемы круглогодичной навигации в акватории Северного морского пути. Приведены результаты исследований, полученные в Государственном университете морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова в рамках деятельности научной школы «Гидрографическое обеспечение Северного морского пути», по двум основным взаимосвязанным направлениям. Первое направление посвящено исследованию основных природно-климатических и навигационно-гидрографических факторов, влияющих на условия судоходства. Второе направление ориентировано на сбор и анализ статистической информации о параметрах движения судов, а также обоснование возможности круглогодичной навигации в акваториях всех арктических морей. Представлены результаты о распределении глубин по площади всех арктических морей и устойчивых ледовых массивов, препятствующих круглогодичной навигации. Рассматриваются типовые траектории движения судов в период летне-осенней и зимне-весенней навигации. Подчеркивается, что постоянное судоходство осуществляется только в Карском море, а в восточной части только в безледный период, за исключением одиночных морских*

*переходов судов высокого ледового класса Arc7. Отмечены основные тенденции изменения структуры флота, условий плавания судов и развития сети судоходных маршрутов в арктических морях, выявленные в течение последних десяти лет. Приводятся данные о количестве судозаходов в порты Восточного сектора акватории СМП, которое увеличилось за последние пять лет в три раза, при этом количество судозаходов в порты Западного сектора акватории СМП увеличилось почти в пять раз. Особое внимание уделено результатам исследований, связанных с развитием сети судоходных маршрутов Восточного сектора акватории Северного морского пути и перспективам круглогодичного плавания судов в акватории моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.*

*Ключевые слова: Северный морской путь, маршруты транспортных судов, интенсивность судозаходов, сезонная зависимость, круглогодичная навигация, арктические моря.*

**Для цитирования:**

Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.

### **Введение (Introduction)**

Перед Российской Федерацией поставлена глобальная задача превращения Северного морского пути (СМП) в постоянно действующую круглогодичную транспортную магистраль, связывающую кратчайшим путем Атлантический и Тихий океан [1]. В ближайшем будущем в акватории СМП ожидается рост интенсивности судоходства и продление сроков навигации, вплоть до превращения в круглогодично действующую транспортную магистраль. Для обеспечения этих мероприятий планируется строительство ледоколов нового поколения [2]. Реализация намеченных планов неизбежно вызовет необходимость плавания судов в акватории СМП не только по рекомендованным маршрутам, но и с существенными отклонениями от них. Подобные отклонения, как правило, связаны с необходимостью обходить тяжелые льды, которые могут перегораживать рекомендованные маршруты.

Круглогодичная навигация в настоящее время осуществляется только в юго-западной части Карского моря, на которую приходится основной грузооборот арктических морских перевозок. В ближайшее время, после завершения постройки и ввода в эксплуатацию мощных атомных ледоколов, способных преодолевать четырехметровые льды, она сможет осуществляться по приполюсным маршрутам, которые не имеют ограничений по лимитирующим глубинам и характеризуются самым коротким расстоянием на пути от Баренцева моря на западе до Берингова пролива на востоке. Проблема круглогодичной навигации в морях Восточного сектора акватории СМП не решается постройкой мощных атомных ледоколов, что связано с малыми глубинами и тяжелыми ледовыми условиями на большей части акваторий моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

Государственный университет морского и речного флота носит имя вице-адмирала С. О. Макарова — прославленного ученого и флотоводца, внесшего значительный вклад в создание ледокольного флота России, изучение и освоение СМП. По традиции, в научной деятельности университета арктическое направление играет заметную роль. В 2016 г. была сформирована научная школа по направлению «Гидрографическое обеспечение Северного морского пути», объединяющая преподавателей, студентов, аспирантов и выпускников Арктического факультета, которые ведут активные исследования по широкому кругу вопросов, связанных с развитием судоходства в арктических водах [3].

СМП представляет собой сложную развивающуюся транспортную систему, в которой с 2010 г. отмечаются значительные изменения, проявляющиеся в первую очередь в резком возрастании интенсивности судоходства, увеличении доли крупнотоннажных судов, расширении сети судоходных маршрутов и площади акватории, на которой используется режим круглогодичной навигации. Эти процессы в основном связаны с началом освоения и вывозом углеводородов из портов Обской губы.

Указом Президента РФ № 204 от 76 мая 2018 г. определены количественные показатели развития СМП на период до 2024 г., в том числе установлено, что к 2024 г. объем морских грузоперевозок должен достичь 80 млн т. Достижение такого показателя потребует проведения широко-масштабных работ по строительству ледокольного и транспортного флота, расширения грузовой базы, а также реализации комплексного плана модернизации инфраструктуры арктической транспортной системы, в том числе относящейся к Восточному сектору акватории СМП.

9 сентября 2019 г. через акваторию СМП к месту постоянного базирования в г. Певек Чукотского автономного округа была доставлена первая в мире Плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов» [4], предназначенная для надежного круглогодичного тепло- и электро-снабжения. Планируется, что она станет одним из ключевых элементов инфраструктуры в рамках развития СМП и позволит реализовывать крупные проекты, логистически связанные с портом Певек. При этом проведена реконструкция порта Певек, которая позволила увеличить глубины у причалов до 11 м.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Реализация проектов развития СМП будет происходить с учетом политических, экономических и экологических ограничений, которые определены требованиями Полярного кодекса, резолюциями Международной морской организации (ИМО) о запрете использования тяжелого топлива в арктических водах, а также секторальными санкциями США и ЕС, введенными в 2014 г. и 2017 г. в отношении российских нефтяных компаний. При проведении научных исследований, направленных на обеспечение безопасности арктического судоходства и гидрографического обеспечения СМП, учитывается вся доступная информация, в том числе и указанные ограничения.

Проблема круглогодичной навигации в Восточном секторе акватории СМП имеет несколько вариантов решений, в каждом из которых существуют определенные ограничения. Первое решение связано с созданием мощных ледоколов, имеющих предельно малую осадку, что позволит им обеспечивать выполнение морских операций на мелководных участках арктического шельфа. При этом часть акватории в зимний период будет оставаться непреодолимой в местах полного промерзания воды и областях расположения стамух и торосов. Второе решение предполагает строительство ледостойких платформ и искусственных островов на глубоководных участках за пределами зоны опасных ледовых образований и использование мощных ледоколов, имеющих большую осадку. Третье решение основано на проведении широкомасштабных дорогостоящих дноуглубительных работ на подходах к арктическим портам, обеспечивающих плавание крупнотоннажных судов и работу мощных ледоколов, имеющих большую осадку. Рассмотренные решения, как и любые другие, должны приниматься с учетом имеющегося опыта арктического судоходства.

Членами научной школы разрабатываются два основных взаимосвязанных научных направления — первое связано с оценкой навигационных свойств акватории арктических морей, второе посвящено сбору статистической информации и изучению параметров движения транспортных судов.

В качестве источников исходных данных были использованы [5], [6]:

- данные, полученные от судовых автоматизированных идентификационных систем;
- данные, полученные от систем управления движения судов;
- космические снимки высокого разрешения;
- данные администрации Северного морского пути;
- морские навигационные карты;
- ледовые карты и др.

### Результаты (Results)

*Распределение глубин.* Исследование глубин в акватории СМП выполнялись с использованием морских навигационных карт. Распределение глубин по морям подтверждено данными, приведенными в табл. 1 [7].

Таблица 1

**Распределение глубин по площади арктических морей**

Диапазон глубин, м	Доля площади, %			
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
0–10	3,5	11,1	14	1
10–20	5,3	37,4	47	
20–30	10,1	22,7	25,5	6
> 30	81,1	28,8	13,5	93

Полученные количественные морфометрические характеристики показывают, что площадь акватории моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря с глубинами менее 20 м превышает 50 %, тогда как площадь таких участков в Карском море составляет менее 9 %, а в Чукотском море — 1 %. Таким образом, риск аварий, связанных с касанием судов грунта и посадкой на мель в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, объективно выше, чем в Карском и Чукотском морях.

*Ледовые условия.* Многолетние наблюдения ледовых условий [8], [9] показывают, что в акватории СМП лед в зонах ледяных массивов (рис. 1) может находиться в течение всего года. При этом наиболее устойчивыми являются массивы 4–7, расположенные в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море.

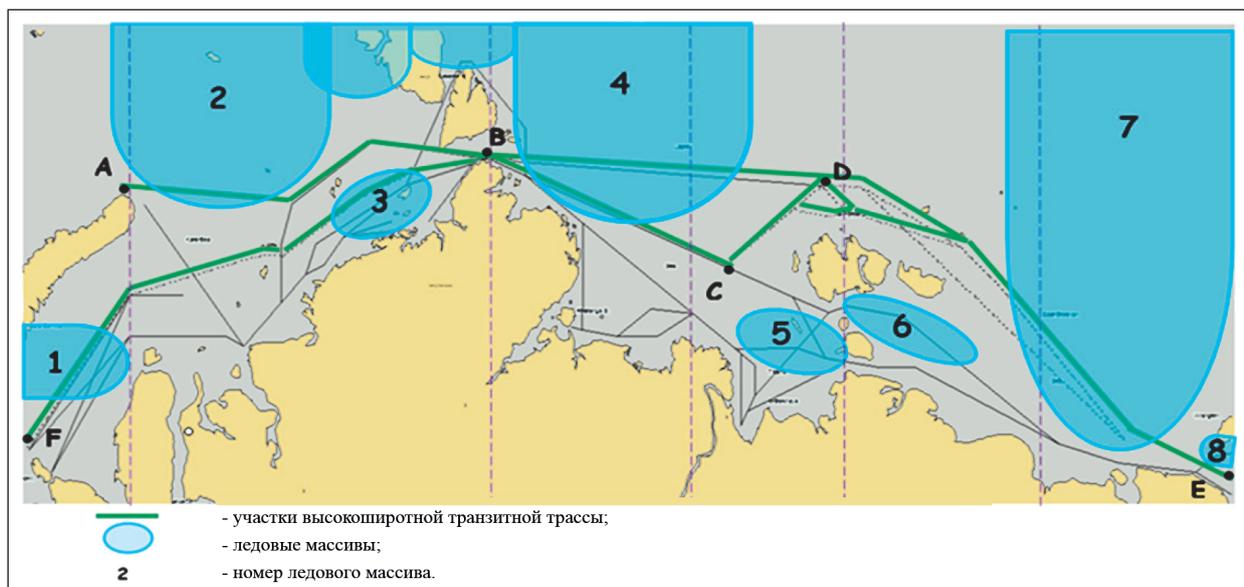


Рис. 1. Ледяные массивы: 1 — Новоземельский; 2 — Карский северный; 3 — Североземельский; 4 — Таймырский; 5 — Янский; 6 — Новосибирский; 7 — Айонский; 8 — Врангелевский

В проливе Санникова, ограниченном массивами 5 и 6, среднемесячная толщина льда за последние двадцать лет изменялась в соответствии с данными, приведенными в табл. 2 [10].

Таблица 2

**Изменение среднемесячной толщины льда  
в течение года**

Средняя толщина льда, см											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
120	149	172	179	195	180	87	4	1	13	41	80

Примечание. Римские цифры соответствуют номеру месяца.

Пролив Санникова, имеющий лимитирующую глубину 12,8 м, используется для транзитного плавания судов с осадкой менее 12 м. По среднестатистическим данным, лед толщиной более 40 см в проливе присутствует в течение 9 мес. При этом с февраля по июнь пролив становится практически непроходимым.

*Влияние сезонности на формирование маршрутов.* В летне-осенний навигационный период (середина июля – середина ноября) судоходство осуществляется по всей акватории СМП, что поясняет схема движения судов, приведенная на рис. 2.



Рис. 2. Траектории движения судов в летне-осенний период

В зимне-весенний период судоходство в Восточном секторе прекращается. Относительно легкие ледовые условия и относительно большие глубины в юго-западной части Карского моря позволяют осуществлять плавание крупнотоннажных транспортных судов в зимне-весенний навигационный период по маршрутам порты Обской Губы – Баренцево море и порт Дудинка – Баренцево море. Схема траекторий движения судов в этот период приведена на рис. 3.



Рис. 3. Траектории движения судов в зимне-весенний период

Опыт круглогодичного плавания по второму маршруту составляет около 20 лет.

*Распределение судов.* Распределение транспортных судов по площади арктических морей в 2019 г. подтверждено гистограммами, приведенными на рис. 4 и 5 [11].

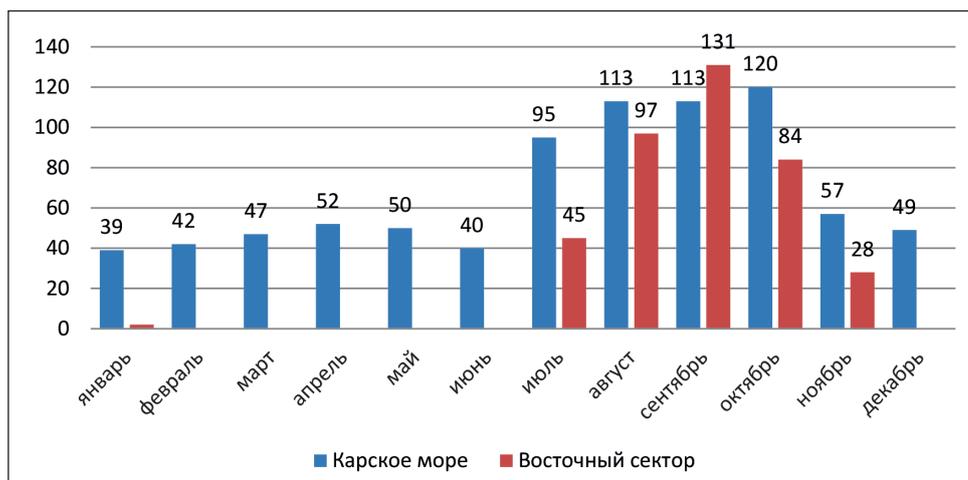


Рис. 4. Распределение среднего ежесуточного количества судов по месяцам

В зимний навигационный период в Карском море ежесуточно работало 39–52 судна. В летне-осенний период 2019 г. (с июля по октябрь) количество судов в акватории Карского моря ежесуточно превысило 100 единиц. В зимний навигационный период в морях Восточного сектора акватории СМП навигация в 2019 г. не осуществлялась. В летне-осенний период максимальное количество судов в Восточном секторе акватории СМП, составляющее 131 судно, отмечалось в сентябре.

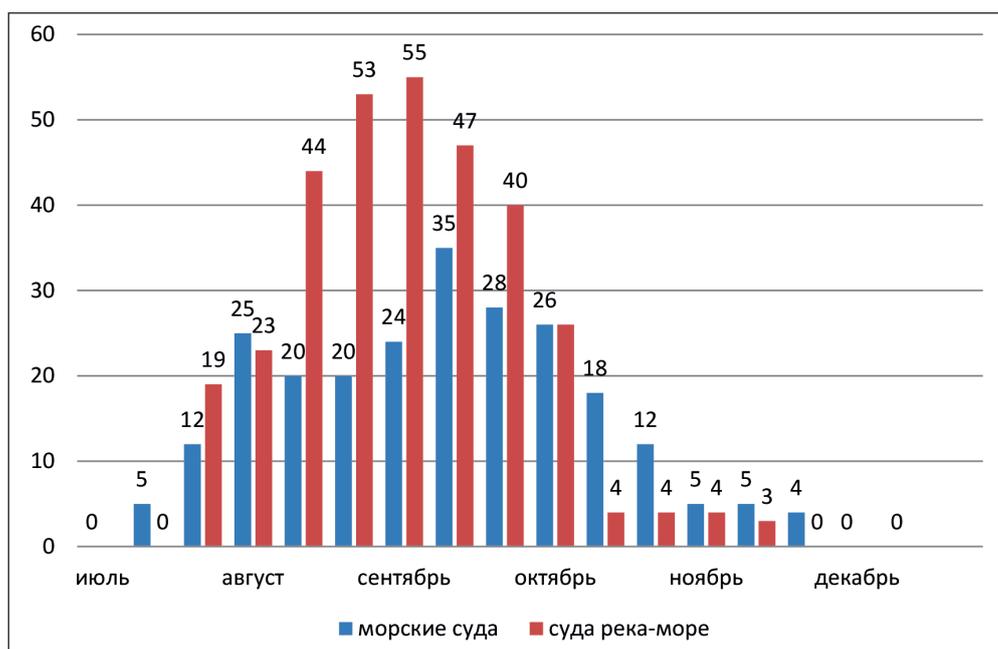


Рис. 5. Распределение судов в акватории Восточного сектора

В Восточном секторе акватории СМП суда класса «река – море» составляют основную часть транспортных судов. Исследование количества судозаходов в порты Восточного сектора акватории СМП показало, что в течение последних пяти лет интенсивность их работы постоянно росла. В порту Певек, расположенном в Восточно-Сибирском море, обслуживается наибольшее количество судов. По общему количеству судозаходов этот порт превосходит порты Хатанга и Тикси, расположенные в море Лаптевых, что подтверждено гистограммой, приведенной на рис. 6.

Исследования траекторий движения транспортных судов в Карском море и морях Восточного сектора акватории СМП [11], [12] позволили оценить величину их отклонений от рекомендованных

маршрутов, ширину полос их движения, а также выявить основные закономерности переформирования сети судоходных маршрутов при переходе от летней к зимней навигации. Часть данных, использованных при проведении исследований судоходных маршрутов, приведена на рис. 7 и 8.

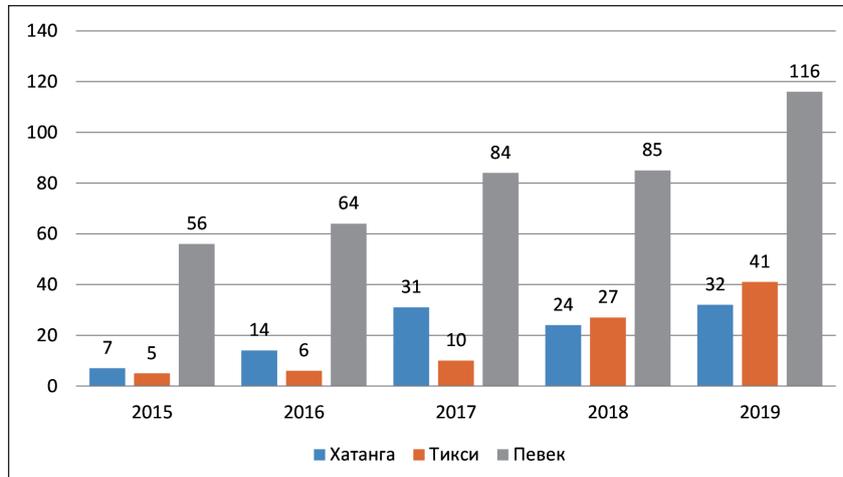


Рис. 6. Количество судозаходов в порты Восточного сектора

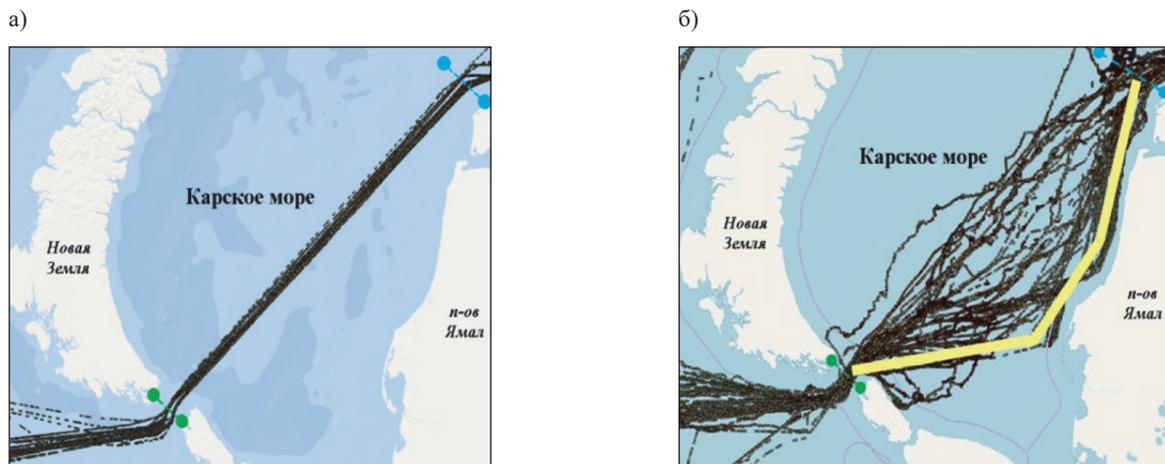


Рис. 7. Маршруты движения судов в сентябре (а) и марте (б)

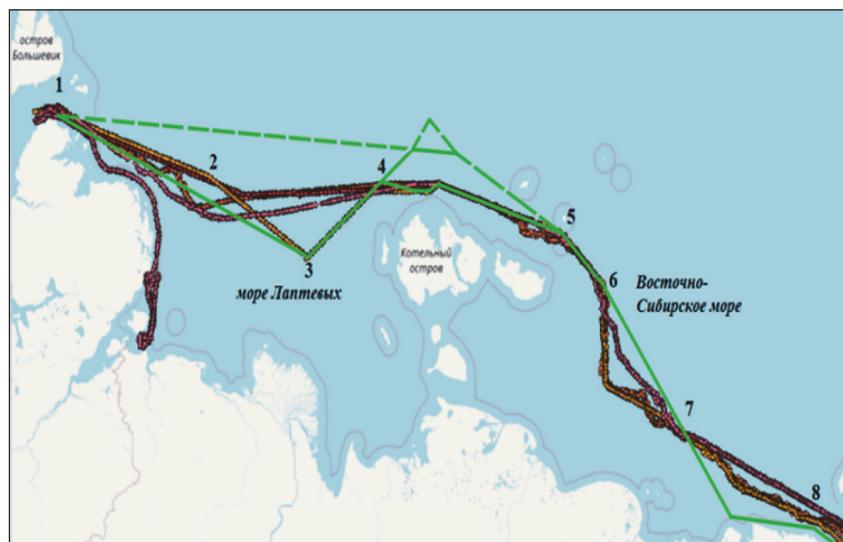


Рис. 8. Маршруты судов в Восточном секторе в сентябре

Используя данные, приведенные на рис. 7, поясняющие процесс переформирования судоходных маршрутов в Карском море, можно предположить, что ширина полос движения судов в Восточном секторе акватории СМП, показанных на рис. 8, при переходе к зимней навигации будет существенно увеличена. Это обстоятельство рекомендуется учитывать при проведении гидрографического обследования данного района [13].

«Белые пятна» на морских навигационных картах. Выполненная оценка гидрографической изученности акватории СМП показала [14] наличие в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море нескольких обширных областей, глубины в которых на морских навигационных картах отсутствуют. На рис. 9 такие области отмечены символом *H* в кружке. При проектировании судоходных маршрутов такие участки пересекаться не должны.

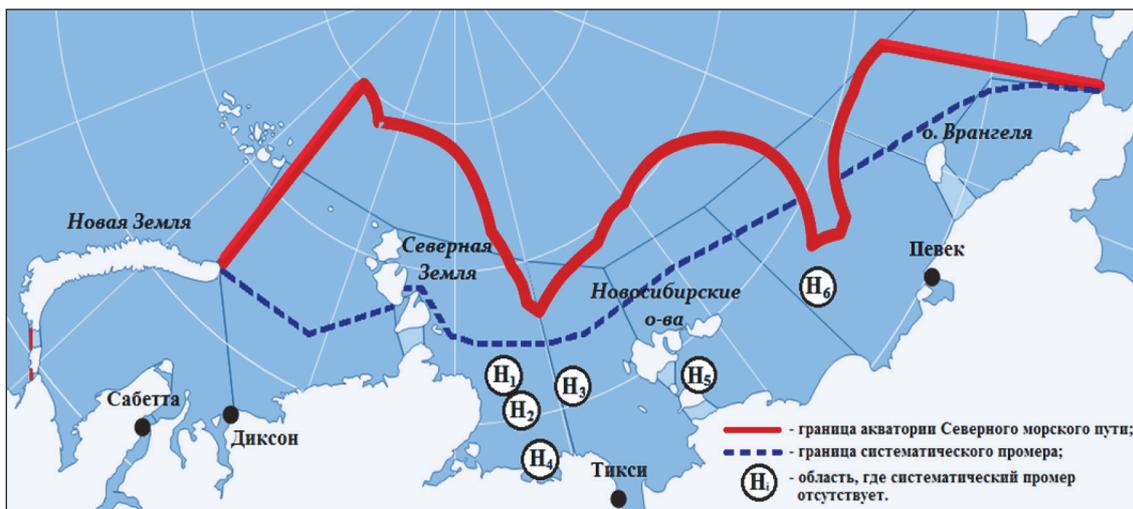


Рис. 9. Гидрографическая изученность акватории СМП

Лимитирующие глубины. Важным направлением исследований условий Восточного сектора является поиск на маршрутах участков с лимитирующими глубинами. Результатом такого поиска служат схемы, одна из которых приведена на рис. 10 [15].

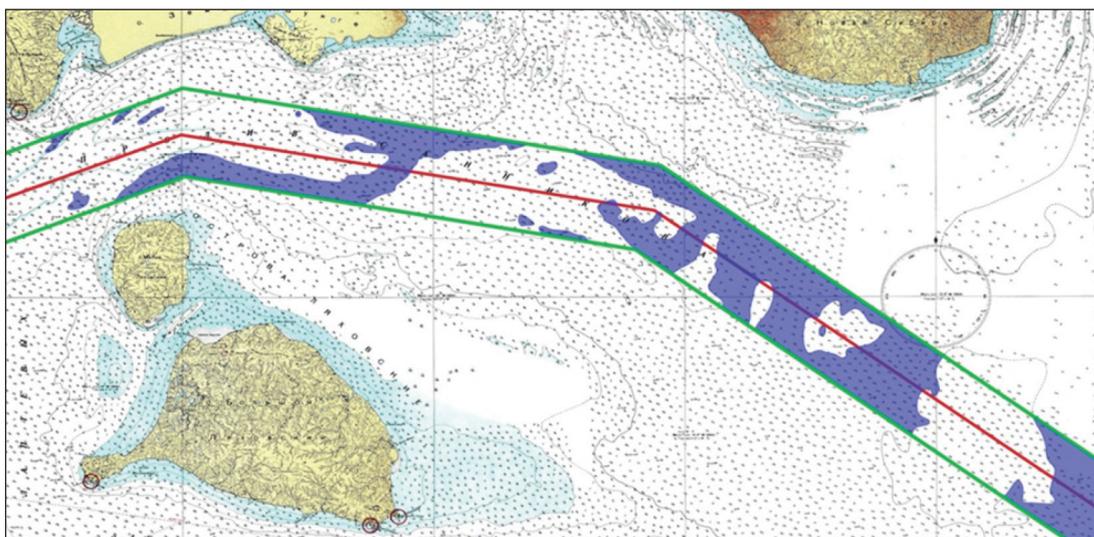


Рис. 10. Участки с лимитирующими глубинами

На рис. 10 показана полоса движения судов в прол. Санникова. На маршруте фиолетовым цветом выделены области с глубинами менее 15 м.

### Заключение (Conclusion)

Задача увеличения объема грузоперевозок до 80 млн т будет выполнена к 2024 г. за счет увеличения интенсивности судоходства, модернизации существующих и строительства новых морских терминалов и портов, а также проведения других мероприятий, которые напрямую не направлены на решение проблемы круглогодичной навигации в акватории СМП.

Необходимость решения проблемы круглогодичной навигации приобретет особую важность, когда значение сезонной неравномерности плотности транспортных потоков в акватории СМП будет представлять собой основное препятствие на пути развития СМП и окажет непосредственное влияние на безопасность арктического судоходства.

Необходимым условием круглогодичного судоходства в Восточном секторе акватории СМП служит создание мелкосидящих судов, способных преодолевать ледяные поля толщиной до 2 м и имеющих достаточную грузместимость.

К достаточным условиям можно отнести все виды обеспечения круглогодичного судоходства, в том числе:

- непрерывные круглогодичные ледовые прогнозы на всю акваторию СМП;
- модернизированную морскую спасательную службу;
- завершение гидрографического обследования дна на всех участках возможного движения судов;
- проведение дноуглубительных работ на участках с лимитирующими глубинами.

Кроме того, следует продолжить поиск инновационных решений по разведке и уменьшению влияния опасных ледовых образований на судоходство.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов А. А.* Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота России) / А. А. Смирнов, С. А. Головинский // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 108–114.
2. *Рукша В. В.* Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.
3. *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.
4. *Ипатова К. С.* Навигационно-гидрографическое обеспечение транспортировки крупногабаритных плавучих объектов в порты Восточного сектора Арктики: ВКР / К. С. Ипатова. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 76 с.
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. *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.
8. *Afonin A.* Conventional and Deep-Water Shipping Passages Along the Northern Sea Route / A. Afonin, E. Olkhovik, A. Tezikov // Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. — IGI Global, 2019. — Pp. 314–337. DOI: 10.4018/978-1-5225-6954-1.ch015.
9. *Плотников В. В.* Изменчивость и сопряженность ледовых условий в системе морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) / В. В. Плотников, В. И. Пустошнова // Метеорология и гидрология. — 2012. — № 7. — С. 54–65.
10. *Холопцев А. В.* Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.

11. Ольховик Е. О. Результаты использования геоинформационных технологий при исследовании параметров судоходства в восточном секторе северного морского пути / Е. О. Ольховик, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Речной транспорт (XXI век). — 2020. — № 1 (93). — С. 40–43.

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

13. 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.

14. Андреева Е. В. «Белые пятна» на картах акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Сборник трудов IX Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». — СПб: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 443–447.

15. Лоцман Е. Е. Навигационно-гидрографическое обеспечение плавания крупнотоннажных судов в проливе Санникова: вып. квалификац. работа / Е. Е. Лоцман. — СПб: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 76 с.

## REFERENCES

1. Smirnov, A. A., and S. A. Golovinsky. “55<sup>th</sup> anniversary of the Russian nuclear icebreaker fleet and development of the Northern sea route.” *Arctic: Ecology and Economy* 4(16) (2014): 108–114.

2. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. “Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern sea route: the history, present and prospects.” *Arctic: Ecology and Economy* 4(20) (2015): 104–110.

3. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezиков. “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.

4. Ipatova, K. S. Navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie transportirovki krupno-gabaritnykh plavuchikh ob’ektov v porty Vostochnogo sektora Arktiki. Thesis. SPb: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.

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. SCANEX Group. Web. 25 Feb. 2020 <<http://www.scanex.ru/cloud/maritime/>>.

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

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

9. Plotnikov, V. V., and V. I. Pustoshnova. “Variability and conjugacy of ice conditions in the system of East Arctic seas (the Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas).” *Russian Meteorology and Hydrology* 37.7 (2012): 468–476. DOI: 10.3103/S1068373912070060.

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

11. Olkhovik, E., K. Isaulova, and A. Tezиков. “Development reference zone. substantiates the necessity of expansion and modernization of state observation net and reactivation of regular studies concerning hydromorphological regime of Ob’s basin northern navigable rivers.” *River transport (XXI<sup>st</sup> century)* 1(93) (2020): 40–43.

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

13. 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.

14. Andreeva, E. V. "«Belye pyatna» na kartakh akvatorii Severnogo morskogo puti." *Sbornik trudov IX Mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 443–447.

15. Lotsman, E. E. Navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie plavaniya krupnotonnazhnykh sudov v prolive Sannikova. Thesis. SPb: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**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](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

**Ольховик Евгений Олегович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [olhovikeo@gumrf.ru](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

**Ol'khovik, 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](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 27 июля 2020 г.

Received: July 27, 2020.

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756

### FRICITION MECHANISM OF POLYAMIDE-6 AGAINST TIN BRONZE UNDER THE BOUNDARY LUBRICATION CONDITIONS

**Y. N. Tsvetkov, K. E. Zhuravleva**

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

*The friction of polyamide-6 against tin bronze BrO5Tz5S5 is investigated. The experiments on a friction machine MI-1 according to the scheme of «a stationary ring against a rotating roller» arranged by both direct and reverse friction pair are carried out. The reverse pair is tested under both water lubrication and dry condition, whereas the direct pair is tested just under water lubrication. The lubrication is implemented by partially immersing the roller into the tray filled with fresh water. At first every friction pair underwent breaking-in with the load equal to that taking place on the surface of real stern-tube bearings during their breaking-in. Then the friction moment is recorded at different loads. When dealing with dry friction, the breaking-in, however, is implemented under water lubrication condition mentioned above, then the roller and the ring are dried thoroughly with paper napkins and fixed again exactly on the previous position. It turned out that friction in polyamide-tin bronze pair under boundary lubrication with water does not depend on the initial roughness of both polyamide and bronze element. And the friction does not depend on the friction scheme (direct or reverse pair) either. Even at comparatively high pressure, characteristic for the real stern-tube bearings breaking-in, the water comes in between the rubbing surfaces. The friction under lubrication condition is caused completely by adhesion, which, in its turn, results from dispersion interaction between adsorbed water films (under water lubrication) or immediately rubbing surfaces (under dry condition). Application of water reduces the friction by 25 % compared to the dry friction.*

*Keywords: stern-tube bearing, friction machine, polyamide, tin bronze, fresh water, boundary lubrication, hydrodynamic lubrication, friction, wear, roughness, adhesion.*

**For citation:**

Tsvetkov, Yuriy N., and Kseniya E. Zhuravleva. "Friction mechanism of polyamide-6 against tin bronze under the boundary lubrication conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.

**УДК 621.89 + 620.179.1**

### МЕХАНИЗМ ТРЕНИЯ КАПРОЛОНА ПО ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЕ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

**Ю. Н. Цветков, К. Е. Журавлева**

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

*Рассмотрены результаты проведенного испытания пары трения: капролон – бронза BrO5Ц5C5. Отмечается, что опыты были проведены на машине трения МИ-1 по схеме «неподвижное кольцо – вращающийся ролик» как на прямой, так и на обратной парах трения. Обратную пару испытывали в условиях смазывания водой и при трении «всухую», прямую — только при смазывании водой. Смазывание выполняли частичным погружением вращающегося роликового образца в ванночку с водой. В каждом опыте сначала осуществляли приработку пары трения в условиях смазывания водой, при этом нагрузку выбирали соответствующей фактическим показателям давления в действующих подшипниках, имеющим место на стадии их приработки. После приработки выполняли регистрацию момента трения при различных нагрузках на пару трения. В опытах без смазки после приработки образцы предварительно тщательно высушивали с помощью бумажных салфеток и устанавливали в прежнее положение с помощью*

специального приспособления. В ходе проведения эксперимента было выявлено, что трение в сопряжении капролон – оловянистая бронза в режиме граничной смазки при смазывании водой нечувствительно к исходной шероховатости бронзовой и капролоновой поверхности и не зависит от того, по какой схеме — обрточной или прямой пары — организована работа сопряжения. Даже при давлениях на площади контакта, характерных для режима приработки дейдвудных капролоновых подшипников, вода надежно поступает в зону трения. Установлено, что трение при граничной смазке практически полностью обусловлено адгезионной составляющей, которая, в свою очередь, определяется дисперсионным взаимодействием между адсорбированными на трущихся поверхностях пленками воды (при работе в воде) или непосредственно между трущимися поверхностями (при работе «всухую»). Отмечается, что применение воды снижает коэффициент трения примерно на 25 %.

*Ключевые слова:* дейдвудный подшипник, машина трения, капролон, оловянистая бронза, пресная вода, граничная смазка, гидродинамическая смазка, трение, износ, шероховатость, адгезия.

**Для цитирования:**

Цветков Ю. Н. Механизм трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки / Ю. Н. Цветков, К. Е. Журавлева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.

### Введение (Introduction)

Дейдвудное устройство, являясь одним из самых важных судовых устройств, относится при этом к наиболее часто повреждаемым объектам судна [1]. От работы дейдвудного подшипника в паре с шейкой гребного вала зависит не только безопасность плавания судна, но и эффективность эксплуатации судовой энергетической установки. В настоящее время применяются дейдвудные подшипники, смазываемые как маслом, так и водой [1]–[3]. Несмотря на ряд преимуществ дейдвудных подшипников, смазываемых маслом [2], по сравнению с дейдвудными подшипниками, работающими в воде, последние имеют более широкое применение. Это обусловлено постоянным ужесточением требований к охране водной среды — утечки масла через уплотнения дейдвудных устройств, смазываемых маслом, составляют в зависимости от водоизмещения судна 1000–5000 л в год [1], [4]. В подшипниках, смазываемых водой, применяются неметаллические материалы: резины, полиамиды, углепластик и др. Тенденция более широкого применения дейдвудных подшипников, смазываемых водой, сохраняется уже в течение длительного периода времени, и работы по совершенствованию неметаллических материалов для этих подшипников ведутся постоянно [5]–[9]. Вместе с тем, по-прежнему, наиболее широкое применение для дейдвудных подшипников, изготовленных из неметаллических материалов, имеет капролон блочный (представитель полиамидов).

Известно, что вязкость воды на 2–3 порядка уступает вязкости масла. При этом капролон имеет повышенное влагопоглощение, поэтому увеличение его объема при эксплуатации в воде может достигать 6–7 % и более, что требует назначения зазоров, превышающих в несколько раз зазоры в подшипниках, работающих при смазывании маслом [10]. Правила Российского морского регистра судоходства регламентируют только условное давление на подшипник, которое определяется как отношение реакции опоры к произведению длины подшипника на его диаметр. Для материалов, работающих при смазывании водой, условное давление не должно превышать 0,25 МПа. Фактическое давление, т. е. давление на площадке контакта, может в 200 раз и более превышать условное. Это обусловлено тем, что к концу гребного вала приложена нагрузка, равная весу гребного винта, и площадь контакта облицовки гребного вала с поверхностью кормового дейдвудного подшипника в начальный период эксплуатации очень мала и практически целиком находится у кормового среза дейдвудного подшипника [11].

Таким образом, ранее изложенное ставит под сомнение возможность реализации в капролоновых дейдвудных подшипниках режима гидродинамической смазки в начальный период работы дейдвудного подшипника — в этот период эксплуатация подшипника происходит в режиме граничной смазки и сопровождается существенно большими потерями на трение и, как следствие, большим расходом топлива. Для возможности управлять этими потерями, необходимо разобрать-

ся в природе трения металла по капролону в условиях граничной смазки, в частности в том, насколько существенным является влияние шероховатости на металлической и капролоновой поверхностях на трение, и происходит ли полное выжимание пленки воды из зоны контакта в период приработки.

Целью работы является исследование механизма трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты проводились на модернизированной машине трения «МИ-1», позволяющей выполнять эксперименты при малых значениях нагрузки на пару трения. Испытания проводили по схеме «неподвижное кольцо – вращающийся ролик». Частота вращения ролика была равна 200 об/мин. Смазывание осуществлялось частичным погружением ролика в ванночку с водой (рис. 1).

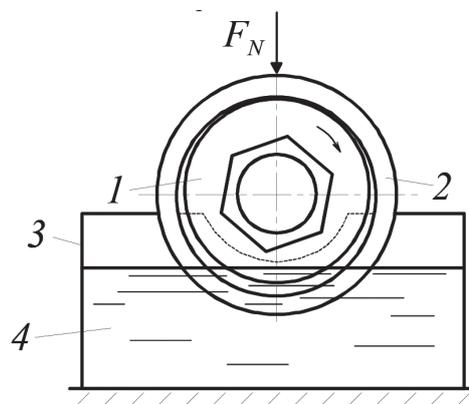


Рис. 1. Схема эксперимента:  
 1 — ролик; 2 — кольцо; 3 — ванночка; 4 — вода

Испытывали обратную и прямую пары трения [12]. В обратной паре трения кольцо было изготовлено из капролона Б марки «В», а ролик — из бронзы БрО5Ц5С5, применяемой для изготовления облицовок шеек гребных валов, работающих в паре с капролоном. Внутренний диаметр кольца был равен 50,56 мм, диаметр ролика — 49,92 мм. В прямой паре трения кольцо было изготовлено из бронзы БрО5Ц5С5, а ролик — из капролона Б марки «В». Внутренний диаметр кольца был равен 50,60 мм, диаметр ролика — 49,90 мм. Ширина колец и роликов составляла около 12 мм. Бронзовые образцы были вырезаны из одной и той же отливки (и кольцо, и ролик). Капролоновые образцы были выточены из одного и того же куска капролона (и кольцо, и ролик).

При проведении всех опытов использовали один и тот же бронзовый ролик в сочетании с одним и тем же капролоновым кольцом, а также один и тот же капролоновый ролик в сочетании с одним и тем же бронзовым кольцом. Перед каждым опытом поверхность трения роликов перешлифовывалась шкуркой № 800, а кольца просто поворачивались на некоторый угол, чтобы в следующем опыте контакт приходился на «свежее» место.

Сначала пару трения прирабатывали при нагрузке  $F_N = 294$  Н (см. рис. 1), что примерно соответствует давлению 40 МПа, — таков порядок давлений в кормовой части кормового дейдвудного подшипника при его приработке. Приработка продолжалась 60–120 мин, до примерной стабилизации момента трения. Каждый опыт заканчивали тем, что не размыкая пару трения, при разных значениях температуры в ванночке (поддерживая ее примерно постоянной, с точностью  $\pm 1,5$  °С) регистрировали момент трения при разных нагрузках, варьируемых в пределах (200...42) Н. На всех образцах измеряли шероховатость до и после испытаний. Измерения проводили с помощью прибора *MahrSurf PSI* на базовой длине 0,8 мм и длине трассирования, равной 5,6 мм.

### Анализ результатов эксперимента (Analysis of Experimental Results)

Как видно из рис. 2, при работе капролона в паре с оловянистой бронзой шероховатость поверхности трения бронзового элемента, как в обратной (рис. 2, а), так и в прямой паре трения (рис. 2, б), практически не изменяется. В то же время значение среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  поверхности капролонового элемента изменяется очень существенно и в процессе приработки приближается к значению  $R_a$  бронзового контртела.

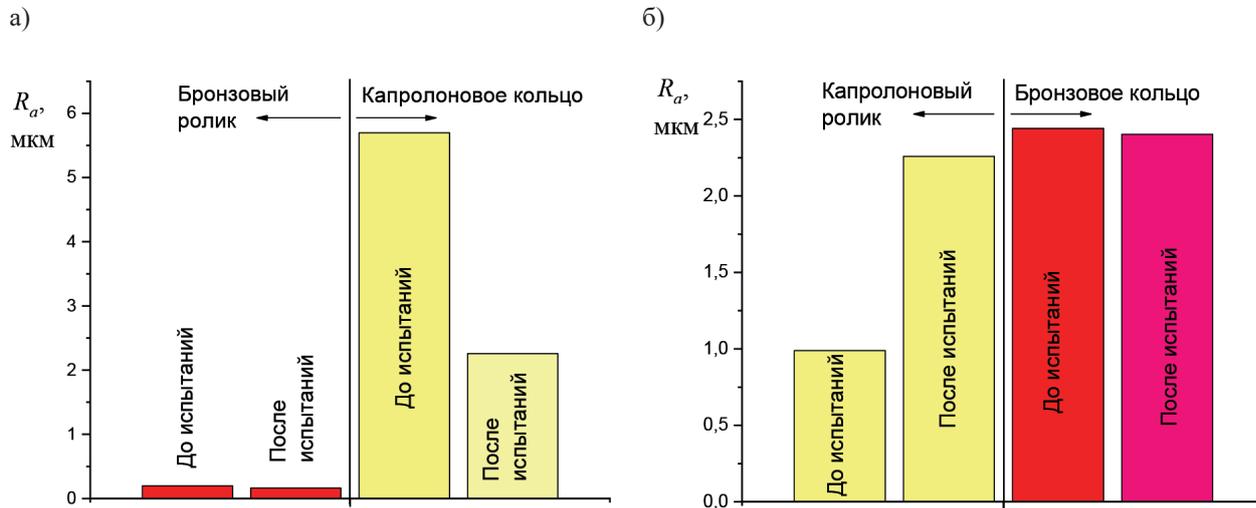


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности трения элементов обратной (а) и прямой (б) пары трения

В прямой паре трения шероховатость бронзового кольца является существенной и сопоставимой с шероховатостью капролонового ролика, поэтому при относительном перемещении неровности более твердой бронзовой поверхности будут деформировать поверхность капролона (рис. 3, а, где стрелками показано направление относительного перемещения поверхности ролика). Перед каждой неровностью будет формироваться зона давления ( $p_{i-1}, p_i, p_{i+1}$ ) в капролоне, которая будет перемещаться по капролону, т. е. конкретный микроробъем поверхностного слоя капролона будет испытывать периодическую *нагрузку – разгрузку*. В этом случае деформационная (гистерезисная) составляющая трения должна быть значительной.

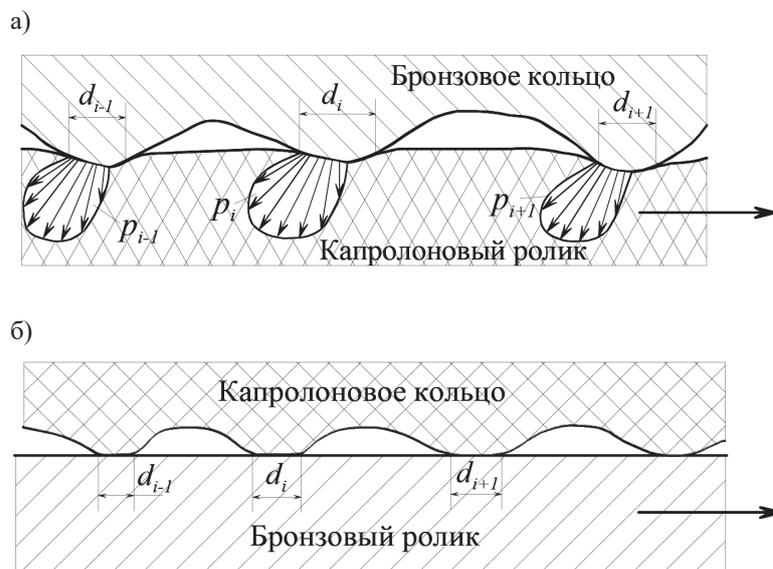


Рис. 3. Влияние шероховатости на трение полимеров по металлу при реализации прямой (а) и обратной (б) пары трения

В обратной паре трения (рис. 3, б) шероховатость капролонового кольца намного выше шероховатости бронзового ролика, поэтому гистерезисная составляющая трения [14] в обратной паре должна быть существенно ниже таковой в прямой паре трения. Т. е. трение в обратной паре определяется главным образом адгезионной составляющей: адгезионные мостики постоянно появляются и разрушаются на фактических пятнах контакта условным диаметром  $d_{i-1}$ ,  $d_i$ ,  $d_{i+1}$  и т. д.

На рис. 4 и 5 показаны примеры зависимостей силы трения (см. рис. 4, а и 5, а) и коэффициента трения (см. рис. 4, б и 5, б) от нагрузки для одного из режимов трения. Следует отметить, что характер представленных зависимостей соблюдается как для прямой (см. рис. 5), так и для обратной (см. рис. 4) пары на всех режимах трения. Как видно из рис. 4 и 5, на графиках  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  имеется разрыв и их можно представить в виде двух участков: А и В. Наличие разрыва указывает на то, что при определенной нагрузке происходит смена механизма, контролирующего трение. В соответствии с биномиальным законом молекулярного трения можно записать

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1)$$

где  $\tau$  — сопротивление сдвигу, обусловленное слипанием поверхностей, приходящееся на единицу фактической площади контакта;  $p_r$  — давление на фактической площади контакта трущихся тел;  $\beta$  — пьезокоэффициент;  $\tau_0$  — постоянная величина.

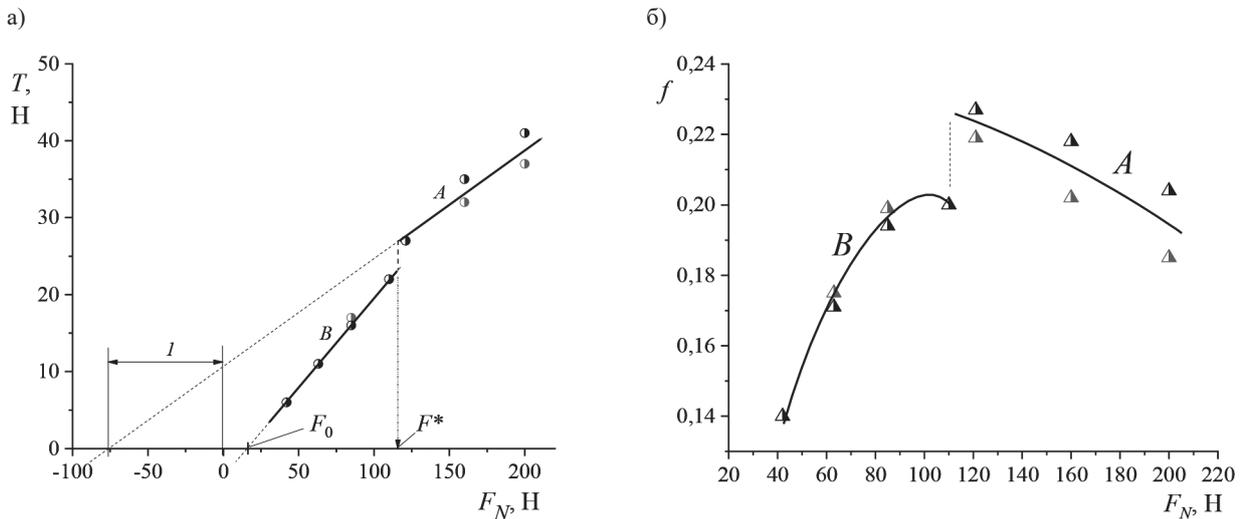


Рис. 4. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения: капролоновое кольцо – бронзовый ролик при смазывании водой при температуре воды 47 °С

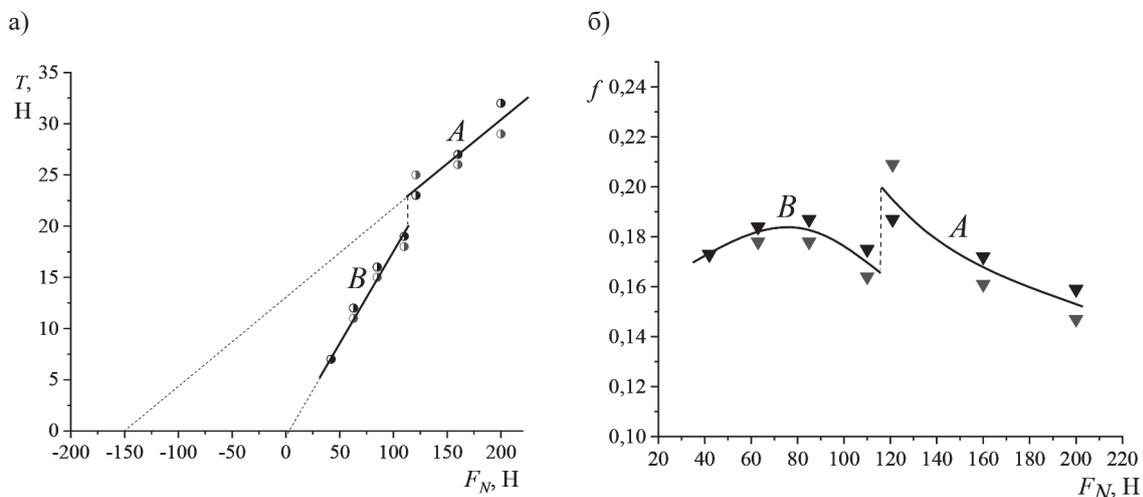


Рис. 5. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения: бронзовое кольцо – капролоновый ролик при смазывании водой при температуре воды 51 °С

Разделив равенство (1) на  $p_r$ , получим следующее выражение для адгезионной составляющей коэффициента трения:

$$f_a = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (2)$$

в котором  $f_a$  — коэффициент трения, равный  $\tau/p_r$ .

Очевидно, что

$$p_r = F_N/A_r. \quad (3)$$

Здесь  $F_N$  — нагрузка на пару трения;  $A_r$  — фактическая площадь контакта; при этом при упругом контакте

$$A_r = CF_N^m, \quad (4)$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные величины.

Значение показателя степени  $m$  колеблется от 0 до 0,33 и зависит от того, чем обусловлен рост  $A_r$  с увеличением нагрузки: ростом площади уже существующих пятен контакта или появлением новых пятен, поскольку в контакт вступают новые неровности [7]. Для реальных поверхностей увеличение  $A_r$  обусловлено главным образом ростом количества пятен контакта, следовательно, в выражении (4) показатель степени при нагрузке близок к единице:  $m = 0,8-0,9$ .

Если адгезионная составляющая трения многократно превышает гистерезисную составляющую, то в этом случае и коэффициент трения определяется главным образом адгезионной составляющей:  $f \approx f_a$ . Тогда, последовательно подставляя выражения (3) и (4) в выражение (2) и принимая, что показатель степени  $(1 - m) \approx 0,2$ , получим

$$f \approx \frac{C\tau_0}{F_N^{0,8}} + \beta. \quad (5)$$

Поскольку величины  $C$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$  являются постоянными для конкретных условий трения, коэффициент трения должен испытывать незначительное снижение с ростом нагрузки (см. рис. 2, б). Таким образом, убывающий характер зависимости  $f(F_N)$  указывает, что трение на участке  $A$  происходит в условиях граничной смазки.

Экстраполяцией участка  $A$  на зависимости  $T(F_N)$  до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 4, а и 5, а) можно определить силу адгезии при трении [8]. Сила адгезии  $F_a$  по абсолютной величине равна отрезку  $l$ , отсекаемому на оси абсцисс (см. рис. 4, а). Значения адгезии были найдены при различных значениях температуры в опытах с прямой и обратной парами трения. Как видно из рис. 6, точки, соответствующие прямой и обратной парам трения, формируют единый массив данных в координатах *сила адгезии – температура воды*. При этом температура воды не оказывает влияния на адгезию, что не противоречит общим представлениям о природе адгезионных сил. В общем случае, появление сил Ван-дер-Ваальса — адгезии между поверхностями трения — объясняется разными видами взаимодействия: дисперсионным, ориентационным, индукционным и конформационным [15]. Наиболее вероятной в данном случае является дисперсионная природа сил Ван-дер-Ваальса (как известно, дисперсионное взаимодействие нечувствительно к температуре).

Расчет средневзвешенных значений коэффициентов трения в зоне граничной смазки (участок  $A$ ) показал, что их значения для прямой и обратной пары трения равны друг другу. Принимая во внимание разное значение шероховатости элементов в прямой и обратной парах трения и, как следствие, разные величины деформационной составляющей, что отмечалось ранее при анализе рис. 3, равенство коэффициентов трения в режиме граничной смазки для прямой и обратной пары трения может служить основанием для утверждения, что деформационной составляющей при трении капролона по бронзе можно пренебречь, независимо от исходной шероховатости капролона и бронзы. Это объясняется, по всей видимости, хорошим прилеганием капролона, который является термопластичным полимером, к поверхности бронзы. Подтверждением этого слу-

жит и тот факт, что, несмотря на заметный износ бронзового кольца при трении по капролоновому ролику, шероховатость бронзы, несмотря на то, что она более, чем в два раза превышает исходную шероховатость капролона, в очаге износа не изменяется, т. е. имеет место равномерный адгезионный износ всей площади контакта бронзового кольца.

Первоначально существовало предположение о том, что отрезок *B* на графиках  $T(F_N)$  соответствует смешанной смазке, т. е. когда на поверхности трущихся тел помимо участков с граничной смазкой начинают появляться участки, на которых реализуется гидродинамический режим смазки. С целью выяснения реальности данного предположения были проведены аналогичные опыты с обратной парой трения (на тех же образцах), но без смазывания водой, т. е. «всухую». В процессе проведения этих опытов также выполняли сначала приработку пары при смазывании водой при нагрузке 294 Н, затем машину трения выключали и ванночку с водой убирали. Образцы высушивали с помощью бумажных салфеток, затем устанавливали в прежнее положение с помощью специального приспособления, а затем проводили опыты «всухую» на разных нагрузках в соответствии с рядом, используемым в опытах с водой. Опыты проводили при разных температурах бронзового ролика: нагрев ролика осуществляли обдувом теплым воздухом, а контроль температуры — с помощью термпары. Таким образом, имитировали ситуацию возможного выдавливания пленок воды из зоны трения.

Как видно из рис. 6, при трении без смазки характер зависимостей  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  такой же, что и в условиях смазывания водой (см. рис. 4), т. е. деление зависимостей  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  на два участка (*A* и *B*) вызвано не сменой режима смазки, а какими-то иными причинами, связанными с природой контактного взаимодействия капролона с бронзой. Сопоставление между собой сил адгезии (рис. 7), определенных по длине отрезка *l* на зависимостях  $T(F_N)$  (см. рис. 4 и 6), показало, что при смазывании водой средняя сила адгезии  $F_a \approx 93$  Н (см. рис. 7, *a*), а при трении «всухую»  $F_a \approx 66$  Н (см. рис. 7, *b*). Более высокое значение адгезии в первом случае указывает на то, что пленки воды в режиме граничной смазки не выдавливаются из зоны контакта, т. е., фактически, в случае смазывания водой имеет место адгезия не между поверхностями капролона и бронзы, а между адсорбированными пленками воды, покрывающими поверхность этих материалов, но насколько эта пленка сплошная, непонятно.

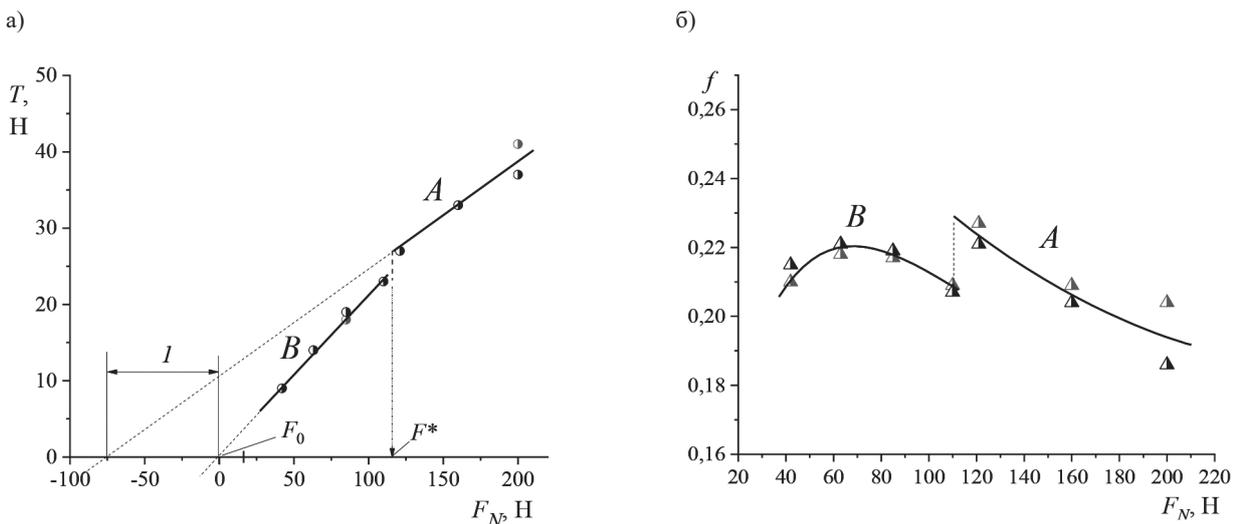


Рис. 6. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения капролоновое кольцо – бронзовый ролик при трении «всухую» при температуре ролика 29,5 °С

Несмотря на то, что адгезия в паре трения при смазывании водой возрастает почти в 1,5 раза по сравнению с условиями трения «всухую», значение коэффициента трения при смазывании водой снижаются примерно на 25 % по сравнению с трением без смазки (рис. 8). Последнее объясняется

тем, что значение коэффициента трения определяется прочностью адгезионных мостиков на сдвиг. В случае адгезии между пленками воды отношение прочности на разрыв к прочности на сдвиг адгезионных связей существенно выше такового в случае адгезии между капролоном и бронзой.

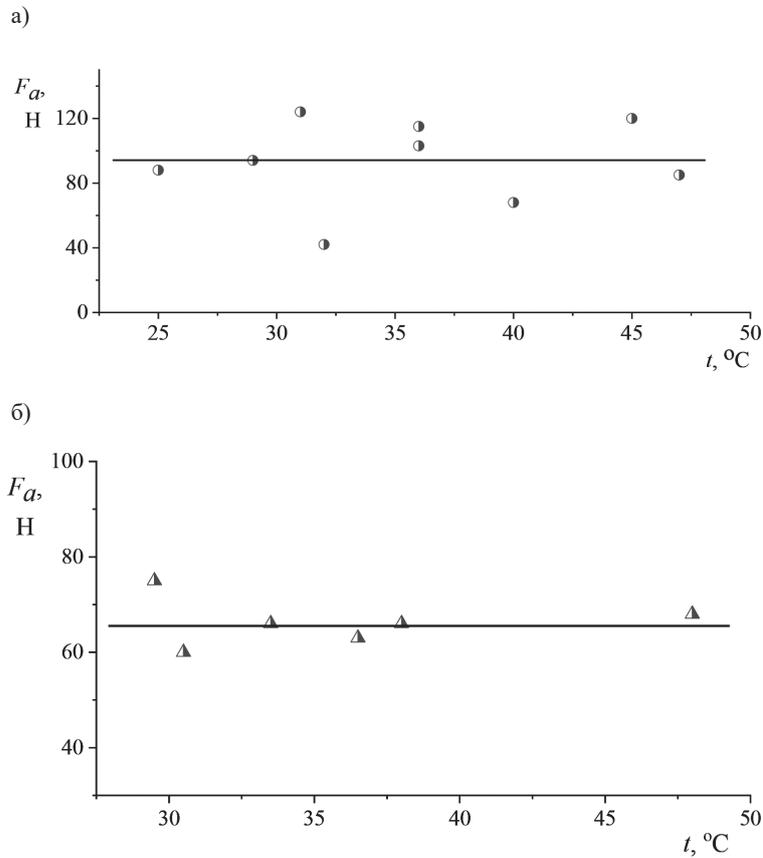


Рис. 7. Зависимость силы адгезии между элементами обратной пары трения от температуры воды при испытании с водой (а) и температуры бронзового ролика при испытании «всухую» (б)

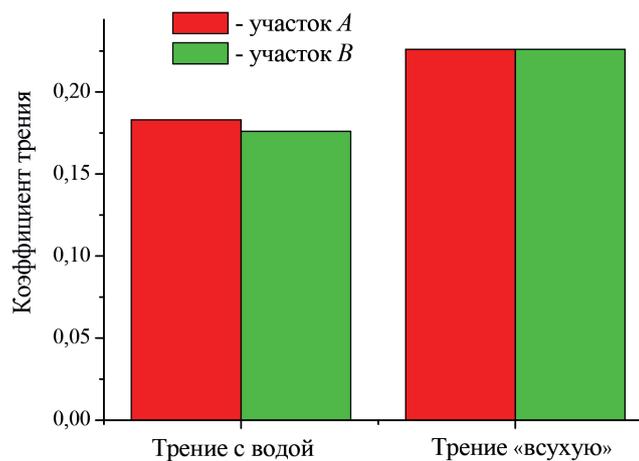


Рис. 8. Сравнение средневзвешенных значений коэффициентов трения при испытаниях обратной пары трения в условиях смазывания водой и «всухую»

Несмотря на то, что в одном случае в зоне контакта присутствуют пленки воды, а в другом — нет, разрыв между участками А и В на рис. 4 и 6 происходит при одном и том же значении

нагрузки  $F^*$ , равно примерно 115 Н (данные приведены в таблице). При этом анализ зависимостей  $f(F_N)$  (см. рис. 4, 5 и 6) показал, что имеет место именно разрыв, как будто, единую горбообразную зависимость разрезали справа от максимума и затем левую часть графика сместили вниз по отношению к правой части. Т. е. разрыв, по всей видимости, вызван упругим восстановлением капролона при уменьшении нагрузки ниже 115 Н, при этом резко снижается площадь контакта и, соответственно, силы адгезии, а появление режима смешанной смазки в зоне  $B$  в условиях смазывания водой является не причиной таких разрывов на графиках, а следствием изменений геометрии контакта. По всей видимости, при сравнительно высоких нагрузках, соответствующих отрезку  $A$ , контакт между капролоном и бронзой — полный, т. е. происходит деформация неровностей капролона и «просветы», соответствующие впадинам неровностей капролона (см. рис. 3), исчезают: поверхности покрыты только адсорбированной пленкой воды. При снижении нагрузки ниже значения  $F^*$  (см. рис. 4,  $a$  и 6,  $a$ ), из-за упругости капролона, «просветы» между выступами восстанавливаются, и в них поступает вода.

**Зависимость характерных значений  $F^*$  и  $F_0$  силы прижима элементов обратной пары трения от температуры воды при смазывании водой и температуры бронзового ролика при трении «всухую»**

Смазывание водой			Трение «всухую»		
Температура воды, °С	$F^*$ , Н	$F_0$ , Н	Температура ролика, °С	$F^*$ , Н	$F_0$ , Н
47	115	17	29,5	116	-1
36	122	14	36,5	113	-1
29	117	0	48,0	114	0
45	115	14	38,0	116	3
36	110	24	33,5	116	1
31	114	1	30,5	116	-1
40	117	-1	-	-	-
32	115	0	-	-	-
25	116	-7	-	-	-
Среднее	116	7	Среднее	115	0

В подтверждение правильности приведенных рассуждений следует сравнить значения  $F_N = F_0$ , получаемые при экстраполяции отрезка  $B$  до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 4,  $a$  и 6,  $a$ ), в случаях трения с водой и без воды. Силу трения в режиме смешанной смазки можно представить следующим образом:

$$T = fF_{\Sigma} = f(F_a - F_{\text{гидр}} + F_N),$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $F_{\Sigma}$  — суммарная сила, прижимающая кольцо к ролику;  $F_a$  — сила адгезии, действующая на участках фактического контакта тел;  $F_{\text{гидр}}$  — гидродинамическая (подъемная) сила, действующая на тех участках поверхности, где реализуется жидкостная смазка;  $F_N$  — внешняя сила, прижимающая кольцо к ролику, задаваемая нагрузочным устройством машины трения.

В точке пересечения экстраполированного участка отрезка  $B$  с осью абсцисс сила трения  $T = 0$ . Таким образом, в точке пересечения  $F_a - F_{\text{гидр}} + F_N = 0$ , а значит, для условий трения с водой, когда на участке  $B$  возможна реализация режима смешанной смазки, можно записать:

$$F_0 = F_{\text{гидр}} - F_a, \quad (6)$$

где  $F_0$  — значение силы  $F_N$  в точке пересечения, т. е. при  $T = 0$ .

Тогда для случая трения «всухую»  $F_{\text{гидр}} = 0$ , и выражение (6) перепишем в виде

$$F_0 = F_a, \quad (7)$$

Обработка приведенных в таблице экспериментальных данных показала, что для условий смазывания водой значение  $F_0 \approx 7$ , т. е. больше нуля, тогда для условий трения без смазки  $F_0 \approx 0$ . Таким образом, в первом случае, действительно, в зоне контакта присутствуют участки, на которых реализуется жидкостная смазка, и, как следствие, возникает подъемная сила, причем, согласно выражению (6),  $F_{\text{гидр}} > F_a$ . Однако значения подъемной силы недостаточно для обеспечения режима гидродинамической смазки. Для этого необходимо обеспечить более высокую частоту вращения ролика — на машине трения МИ-1 она равна 200 об/мин, что соответствует сравнительно невысокой линейной скорости (0,51 м/с). Во втором случае (трение без смазки) таких участков нет, при этом силы адгезии очень малы из-за малой площади контакта.

Следует отметить, что значения  $F_a$  (см. рис. 7),  $F^*$  и  $F_0$ , приведенные в таблице, в случае смазывания водой имеют существенно больший разброс, чем для условия трения «всухую», что свидетельствует о нестабильности пленок воды на поверхностях трения с точки зрения их толщины и площади покрытия. При этом значения  $F^*$  и  $F_0$  оказались так же, как и  $F_a$ , нечувствительными к температуре, несмотря на то, что, согласно ранее изложенному, температура должна оказывать на них влияние, но этот вопрос требует дальнейшего исследования.

### Выводы (Summary)

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Трение в сопряжении *капролон – оловянистая бронза* в режиме граничной смазки при смазывании водой не зависит от того, по какой схеме: обратной или прямой пары, организована работа сопряжения. При этом трение нечувствительно к исходной шероховатости бронзовой и капролоновой поверхностей. В процессе приработки шероховатость бронзового элемента остается прежней, а шероховатость капролонового элемента приближается к шероховатости бронзового.
2. Фактического давления, характерного для режима приработки дейдвудных капролоновых подшипников, недостаточно для предотвращения попадания воды в зону трения, т. е. переход к режиму «сухого» трения в режиме приработки маловероятен.
3. Гистерезисной составляющей трения в сопряжении *капролон – оловянистая бронза* в режиме граничной смазки можно пренебречь, трение в указанном режиме практически полностью обусловлено адгезионной составляющей, которая, в свою очередь, определяется дисперсионным взаимодействием между адсорбированными на трущихся поверхностях пленками воды (при работе в воде) или непосредственно между трущимися поверхностями (при работе «всухую»). Смазывание водой снижает коэффициент трения примерно на 25 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенков П. М. Экологически чистая трибосистема судового движительного комплекса / П.М. Лысенков // Трение, износ, смазка. — 2019. — Т. 21. — № 80 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://tribo.ru/netcat\\_files/313/208/h\\_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95](http://tribo.ru/netcat_files/313/208/h_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95) (дата обращения: 25.02.2020).
2. Litwin W. Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing / W. Litwin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2019. — Vol. 233. — Is. 11. — Pp. 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.
3. Litwin W. Water-lubricated bearings of ship propeller shafts — problems, experimental tests and theoretical investigations / W. Litwin // Polish Maritime Research. — 2009. — Vol. 16. — Is. 4. — Pp. 41–49. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.
4. Roldo L. Design and Materials Selection for Environmentally Friendly Ship Propulsion System / L. Roldo, I. Komar, N. Vulić // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 2013. — Vol. 59. — Is. 1. — Pp. 25–31. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.601.
5. Wu Y. Effects of Typical Physical Properties on Tribological Behaviors of Three Kinds of Polymer Materials for Water-Lubricated Bearings / Y. Wu, X. Bai, C. Yuan, C. Dong, L. Zhang, S. Liu // Tribology Transactions. — 2019. — Vol. 62. — Is. 6. — Pp. 1019–1028. DOI: 10.1080/10402004.2019.1640916.

6. Guo Z. Study on influence of micro convex textures on tribological performances of UHMWPE material under the water-lubricated conditions / Z. Guo, X. Xie, C. Yuan, X. Bai, // *Wear*. — 2019. — Vol. 426–427. — Pp. 1327–1335. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.010.

7. Fuming K. Tribological Properties of Nitrile Rubber/UHMWPE/Nano-MoS<sub>2</sub> Water-Lubricated Bearing Material Under Low Speed and Heavy Duty / K. Fuming, Z. Xincong, H. Jian, Z. Xiaoran, W. Jun // *Journal of Tribology*. — 2018. — Vol. 140. — Is. 6. DOI: 10.1115/1.4039930.

8. Gebretsadik D. W. Friction and wear characteristics of PA 66 polymer composite/316L stainless steel tribopair in aqueous solution with different salt levels / D. W. Gebretsadik, J. Hardell, B. Prakash // *Tribology International*. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 105917. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105917.

9. Григорьев А. К. Стендовые испытания подшипника скольжения из антифрикционного материала Торплас фирмы «Thordon Bearings Inc.» / А. К. Григорьев, В. Н. Звягинцев // *Вопросы материаловедения*. — 2006. — № 2 (46). — С. 166–172.

10. Мамонтов В. А. Анализ износов капролоновых втулок дейдвудных подшипников гребного вала / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, Ч. А. Кужахметов, А. А. Халявкин // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2012. — № 1. — С. 30–35.

11. Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ / М. Б. Рубин, В. Е. Бахарева. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.

12. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) / Д. Н. Гаркунов. — М.: Изд-во МСХА, 2002. — 632 с.

13. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

14. Мур Д. Основы и применения трибоники / Д. Мур. — М.: Мир, 1978. — 487 с.

15. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.

## REFERENCES

1. Lysenkov, P. M. “Ekologicheskii chistaya tribosistema sudovogo dvizhitel'nogo kompleksa.” *Trenie, iznos, smazka* 21.80 (2019). Web. 25 Feb. 2020 <[http://tribo.ru/netcat\\_files/313/208/h\\_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95](http://tribo.ru/netcat_files/313/208/h_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95)>.

2. Litwin, Wojciech. “Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 233.11 (2019): 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.

3. Litwin, Wojciech. “Water-lubricated bearings of ship propeller shafts-problems, experimental tests and theoretical investigations.” *Polish Maritime Research* 16.4 (2009): 41–49. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.

4. Roldo, Liane, Ivan Komar, and Nenad Vulić. “Design and materials selection for environmental friendly ship propulsion system.” *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering* 59.1 (2013): 25–31. DOI:10.5545/sv-jme.2012.601.

5. Wu, Yuhang, Xiuqin Bai, Chengqing Yuan, Conglin Dong, Liyuan Zhang, and Shutian Liu. “Effects of Typical Physical Properties on Tribological Behaviors of Three Kinds of Polymer Materials for Water-Lubricated Bearings.” *Tribology Transactions* 62.6 (2019): 1019–1028. DOI: 10.1080/10402004.2019.1640916.

6. Guo, Zhiwei, Xin Xie, Chengqing Yuan, and Xiuqin Bai. “Study on influence of micro convex textures on tribological performances of UHMWPE material under the water-lubricated conditions.” *Wear* 426-427 (2019): 1327–1335. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.010.

7. Fuming, Kuang, Zhou Xincong, Huang Jian, Zhou Xiaoran, and Wang Jun. “Tribological Properties of Nitrile Rubber/UHMWPE/Nano-MoS<sub>2</sub> Water-Lubricated Bearing Material Under Low Speed and Heavy Duty.” *Journal of Tribology* 140.6 (2018). DOI: 10.1115/1.4039930.

8. Gebretsadik, Daniel W., Jens Hardell, and Braham Prakash. “Friction and wear characteristics of PA 66 polymer composite/316L stainless steel tribopair in aqueous solution with different salt levels.” *Tribology International* 141 (2020): 105917. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105917.

9. Grigoryev, A. K., and V. N. Zvyagintsev. “The bench tests of slide bearing made from the antifricition material torplas of the company “Thordon Bearings Inc.”” *Inorganic Materials: Applied Research* 2(46) (2006): 166–172.

10. Mamontov, Victor Andreevich, Alfred Ivanovich Mironov, Chingiz Asanovich Kuzhakhmetov, and Alexey Aleksandrovich Khalyavkin. “Wear analysis of polycaprolactam bushings of deadwood bearings of the propeller shaft.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 30–35.

11. Rubin, M. B., and V. E. Bakhareva. *Podshipniki v sudovoi tekhnike: Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1987.
12. Garkunov, D. N. *Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin)*. M.: Izd-vo MSKhA, 2002.
13. Kragel'skii, I. V., M. N. Dobychin, and V. S. Kombalov. *Osnovy raschetov na treniye i iznos*. M.: Mashinostroenie, 1977.
14. Moore, D. F. *Principles and Applications of Tribology*. Oxford: Pergamon Press, 1975.
15. Akhmatov, A.S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. M.: Fizmatgiz, 1963.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Цветков Юрий Николаевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru), [ZvetkovUN@gumrf.ru](mailto:ZvetkovUN@gumrf.ru)  
**Журавлева Ксения Евгеньевна** —  
инженер-технолог  
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»  
198184, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Канонерский остров, 41  
e-mail: [xenia.cher97@gmail.ru](mailto:xenia.cher97@gmail.ru), [kaf\\_tsr@gumrf.ru](mailto:kaf_tsr@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tsvetkov, Yuriy N.** —  
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: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru), [ZvetkovUN@gumrf.ru](mailto:ZvetkovUN@gumrf.ru)  
**Zhuravleva, Kseniya E.** —  
Process engineer  
JSC “Kanonersky Shiprepairing Yard”  
41 Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,  
Russian Federation  
e-mail: [xenia.cher97@gmail.ru](mailto:xenia.cher97@gmail.ru), [kaf\\_tsr@gumrf.ru](mailto:kaf_tsr@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2020 г.  
Received: June 20, 2020.*

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-757-764

## OPERATION AT VARIABLE MODES OF CLOSED MICRO-GAS TURBINE PLANTS WITH OXIDIZER-OXYGEN FOR UNDERWATER EQUIPMENT

**V. T. Matviienko<sup>1</sup>, V. A. Ocheretianyi<sup>2</sup>, A. V. Dologlonyan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, Russian Federation

<sup>2</sup> — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

<sup>3</sup> — Institute of natural and technical systems, Sevastopol, Russian Federation

*In the Arctic, submarines and equipment in the near future will carry out transport operations with overcoming ice fields underwater, as well as exploration, construction and operation of underwater objects. It is possible to use gas turbine plants in a single-circuit version, which operate on hydrocarbon fuel, as closed ones for underwater equipment. The oxidizing agent is usually oxygen. The working fluid of closed gas turbine plants (CGTP) is a mixture of combustion products of hydrocarbon fuel and oxygen. Studies of the thermodynamic cycle characteristics of CGTP with oxygen as an oxidizer with various initial data have shown the possibility of operating micro-gas turbine plants at nominal conditions with acceptable efficiency in engines with heat recovery. Higher efficiency indicators are obtained in CGTP with a turbocompressor utilizer (TCU) and a heat regenerator. However, power plants of underwater equipment are often operated at partial loads under various types of loads associated with their purpose. When determining characteristics in variable modes, the nominal parameters are the initial data. For CGTP with TCU and heat recovery (R), the efficiency is relatively 15 ... 20% higher than for CGTP with R, and the specific power is 1.5 times higher. Investigation of the CGTP characteristics at partial loads is carried out under generator and screw loading, which are typical for underwater equipment. It has been established that CGTP with TCU and R at all loading modes have higher efficiency than CGTP with R. CGTP at partial loads with a screw type of loading are more economical than at variable generator loads. CGTP can produce mechanical and thermal energy, ensuring high energy efficiency of the plant in a submerged position.*

*Keywords: closed gas turbine plant, micro-gas turbine, heat recovery, turbocompressor utilizer, variable mode.*

### For citation:

Matviienko, Valerii T., Vladimir A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. "Operation at variable modes of closed micro-gas turbine plants with oxidizer-oxygen for underwater equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 757–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-757-764.

**УДК 621.438**

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ЗАМКНУТЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ОКИСЛИТЕЛЕМ КИСЛОРОДОМ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

**В. Т. Матвеевко<sup>1</sup>, В. А. Очеретяный<sup>2</sup>, А. В. Дологлонян<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

<sup>3</sup> — ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Российская Федерация

*В статье отмечается, что в Арктике подводные суда и техника в ближайшем будущем будут выполнять транспортные операции с преодолением ледовых полей в подводном положении, а также разведку,*

обустройство и эксплуатацию подводных объектов. Обращается внимание на то, что в качестве замкнутых для подводной техники можно применять газотурбинные установки в одноконтурном варианте, работающие на углеводородном топливе, в которых окислителем обычно является кислород. Рабочим телом замкнутых газотурбинных установок является смесь продуктов сгорания углеводородного топлива и кислорода. Исследования характеристик термодинамических циклов замкнутых газотурбинных установок с кислородом в качестве окислителя при различных исходных данных показали возможность работы микрогазотурбинных установок на номинальных режимах с приемлемой экономичностью в двигателях с регенерацией теплоты. Более высокие показатели по экономичности получены в замкнутых газотурбинных установках с турбокомпрессорным утилизатором и регенератором теплоты. При этом отмечается, что энергетические установки подводной техники часто эксплуатируются на частичных нагрузках при различных видах нагружения, связанных с их назначением. Подчеркивается, что при определении характеристик на переменных режимах исходными данными являются номинальные параметры. Для замкнутых газотурбинных установок с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты КПД выше в 1,15–1,20 раза, чем для замкнутых газотурбинных установок с регенерацией теплоты, а удельная мощность больше в 1,5 раза. Исследования характеристик замкнутых газотурбинных установок на частичных нагрузках производились при генераторном и винтовом нагружениях, характерных для подводной техники. Установлено, что замкнутые газотурбинные установки с турбокомпрессорным утилизатором и регенератором теплоты на всех режимах нагружения имеют экономичность выше, чем замкнутые газотурбинные установки с регенераторами теплоты. Замкнутые газотурбинные установки на частичных нагрузках при винтовом типе нагружения более экономичны, чем на переменных генераторных нагрузках, и могут производить механическую и тепловую энергию, обеспечивая высокую энергоэффективность установки в подводном положении.

*Ключевые слова:* замкнутая газотурбинная установка, микрогазотурбина, регенерация теплоты, турбокомпрессорный утилизатор, переменный режим.

**Для цитирования:**

Матвеевко В. Т. Эксплуатация на переменных режимах замкнутых микрогазотурбинных установок с окислителем кислородом для подводной техники / В. Т. Матвеевко, В. А. Очеретяный, А. В. Долгопянов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 757–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-757-764.

---

## Введение (Introduction)

В ближайшем будущем подводные аппараты и суда будут играть существенную роль в обустройстве прибрежной и подводной инфраструктуры Арктического шельфа, в том числе в ходе выполнения транспортных операций с преодолением ледовых полей в подводном положении. Замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ) занимают особое место среди различных типов воздухонезависимых энергетических установок для подводной техники [1], [2]. Они способны в одноконтурном варианте работать на органических видах топлива [3], [4] с различными термодинамическими циклами. Окислителем топлива обычно является кислород, который находится на борту подводного аппарата в газообразном или жидком состоянии в соответствующих системах хранения.

Рабочее тело одноконтурной ЗГТУ представляет собой смесь продуктов сгорания углеводородного топлива и кислорода, поскольку в переходный период работы установки, после запуска ЗГТУ на воздухе, начинается сброс излишков рабочего тела из замкнутого контура и изменение его состава. В процессе сгорания топлива в ЗГТУ образуются продукты реакции в виде двуокиси углерода и паров воды, также в контур ЗГТУ добавляется окислитель. После сброса излишков рабочего тела его состав изменяется посредством постепенного замещения азота  $N_2$  двуокисью углерода  $CO_2$ . Через конечное количество циклов обмена состав рабочего тела стабилизируется и перед турбиной он состоит из  $CO_2 + O_2 + H_2O$ , где вода присутствует в виде пара на линии насыщения.

Характеристики циклов замкнутых микрогазотурбинных установок (ЗМГТУ) с окислителем — кислородом при различных исходных данных [3] — можно использовать при определении параметров рабочих циклов при номинальных нагрузках. Однако энергоустановки подводной техники, как правило, эксплуатируются на частичных нагрузках и при различных

видах нагружения, связанных с ее назначением. Поэтому необходимо определить при различных схемных решениях энергоэффективные режимы работы ЗМГТУ как при номинальных, так и на частичных нагрузках.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Схемы и характеристики замкнутых газотурбинных установок на номинальных режимах. В микрогазотурбинных установках традиционно применяется схема газотурбинного двигателя с регенерацией теплоты. Авторы патента [4] в ЗГТУ для подводного аппарата применили двигатель с регенерацией теплоты, где окислителем топлива является кислород. Схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты, приведенная на рис. 1, является более экономичной по сравнению со схемой ГТД простого цикла. Регенератор в ЗМГТУ выполняет также функцию предварительного охлаждения газа перед концевым охладителем газа (ОГ) в замкнутом контуре. Удаление из контура избыточного количества двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  производится растворением их в барботере (Б). Пополнение рабочего тела кислородом производится в смесителе (СМ) перед компрессором двигателя.

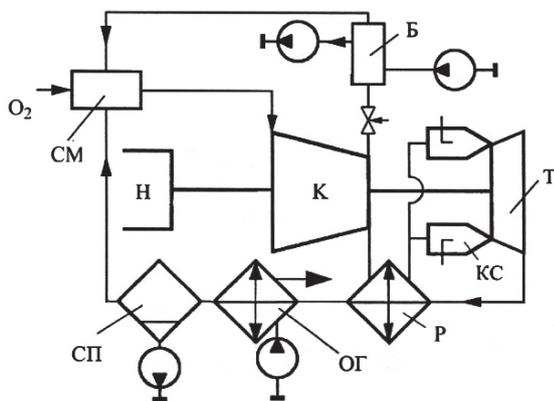


Рис. 1. Схема одноконтурной ЗМГТУ с регенерацией теплоты: К — компрессор; Т — турбина; КС — камера сгорания; Р — регенератор, ОГ — охладитель газа; СМ — смеситель; Н — нагрузка; СП — сепаратор влаги; Б — барботер

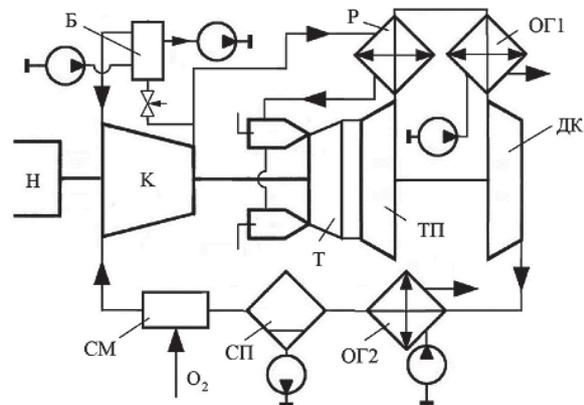


Рис. 2. Схема одноконтурной ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией теплоты: ТП — турбина перерасширения; ДК — дожимающий компрессор; ОГ1 — охладитель газа перед ДК; ОГ2 — охладитель газа

Повышение КПД ЗМГТУ с регенерацией теплоты (см. рис. 1) можно осуществить [5] за счет подключения турбокомпрессорного утилизатора (ТКУ) непосредственно к турбине двигателя (рис. 2). Турбина перерасширения (ТП) позволяет увеличить мощность турбин двигателя, за которыми расположен регенератор и охладитель газа (ОГ1), за счет повышения в силовой турбине степени расширения. Дожимающий компрессор (ДК) в замкнутом контуре установки выполняет роль первой ступени сжатия рабочего тела в двигателе ЗМГТУ.

При определении характеристик термодинамического цикла ЗМГТУ на номинальном режиме параметры элементов двигателя установки выбирались с учетом конструктивных особенностей, присущих микрогазотурбинным двигателям [6]–[9]. В микрогазотурбинных установках возможно использование неохлаждаемой турбины для начальных температур рабочего тела, вплоть до  $T_3 = 1373$  К. Температура рабочего тела на входе в компрессор принималась  $T_1 = 313$  К. Такую температуру можно достичь при нахождении объекта в подводном положении.

Результаты исследования характеристик рабочих циклов ЗМГТУ приведены в работе [11]. При анализе термодинамических циклов одноконтурных ЗМГТУ в существующие математические модели были внесены параметры нового рабочего тела — смеси продуктов сгорания углеводородного топлива и двуокиси углерода. Для определения параметров термодинамических циклов

одноконтурных ЗМГТУ исследования проводились при изменении степени повышения давления  $\pi_k$  в компрессоре двигателя и при степени повышения давления в дожимающем компрессоре ТКУ, принятом  $\pi_{dk} = 2,25$ .

Характеристики циклов ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией теплоты (ТП + Р), а также ЗМГТУ с регенерацией теплоты (Р) показаны на рис. 3, где рабочее тело представляет собой смесь газов  $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , а окислителем является кислород.

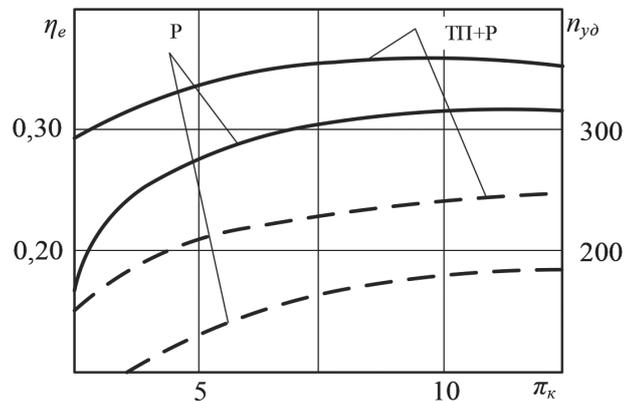


Рис. 3. Зависимости КПД ( $\eta_e$ ) и удельной мощности  $n_{уд}$ , кВт/(кг/с) от степени повышения давления  $\pi_k$  для ЗМГТУ  
Условные обозначения:  
 $\eta_e$  — сплошные линии;  $n_{уд}$  — пунктирные линии

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, показал, что при оптимальных степенях повышения давления  $\pi_k$  одноконтурные ЗМГТУ с ТКУ и Р имеют относительно более высокий КПД, чем ЗГТУ с Р на 15–20 %, а удельная мощность в среднем возрастает в 1,5 раза. Из приведенных на рисунке зависимостей выбираются оптимальные параметры ЗМГТУ на номинальном режиме, которые принимаются в качестве исходных данных при анализе работы ЗМГТУ на переменных режимах (частичных нагрузках).

### Результаты (Results)

Для судового энергетического комплекса характерна как винтовая, так и генераторная нагрузка. Энергетическая установка судового энергетического комплекса должна быть всережимной, поэтому необходимо определить и обеспечить высокую энергетическую эффективность ее не только на номинальном, но и на переменных режимах.

В микрогазотурбинной установке двигатель традиционно выполнен одновальным с блокированной с газогенератором силовой турбиной. При выработке переменного тока такая схема является предпочтительной. В этом случае двигатель работает на постоянных оборотах и обладает достаточной приемистостью, воспринимая переменную генераторную нагрузку.

В ЗМГТУ используют высокочастотные электрогенераторы, поэтому в случае применения специальных схем электродвижения объекта двигатель будет воспринимать винтовую нагрузку за счет изменения числа оборотов двигателя и, соответственно, необходимо приблизить ее регулирование к количественному типу.

Математические модели и программное обеспечение, ранее используемые при анализе характеристик МГТУ [10]–[13] при различных типах нагружения установок, были применены с внесением параметров нового рабочего тела — смеси продуктов сгорания углеводородного топлива и двуокиси углерода.

На рис. 4 и 5 даны характеристики одноконтурных ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией теплоты (схема 1Б/Р + ТП) и ЗМГТУ с регенерацией теплоты (схема 1Б/Р) при генераторном типе нагружения. При винтовом типе нагружения в обозначение схемы добавляется символ *V*.

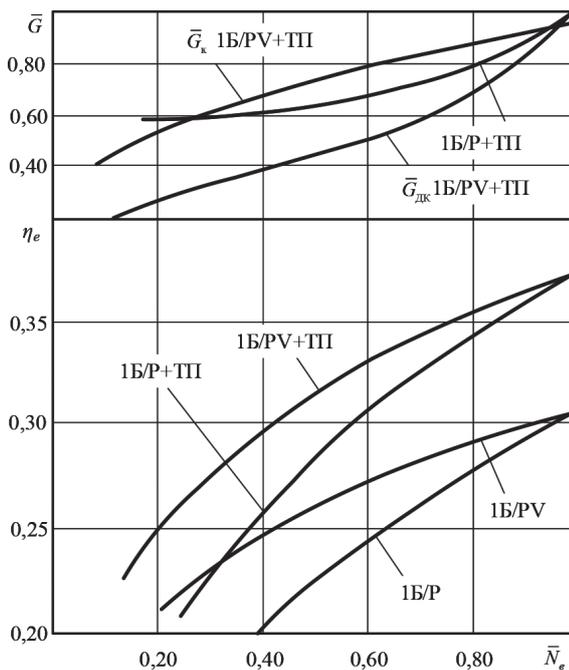


Рис. 4. Характеристики термодинамических циклов одноконтурных ЗМГТУ на частичных нагрузках при  $T_3 = 1373$  К,  $\pi_k = 5$ ,  $\pi_{dk} = 2,25$  и  $\sigma = 0,8$

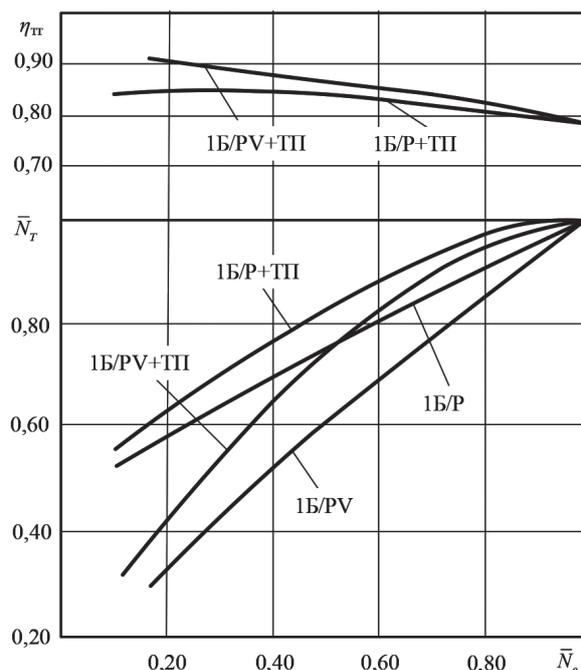


Рис. 5. Теплотехнические характеристики одноконтурных ЗМГТУ на частичных нагрузках при  $T_3 = 1373$  К,  $\pi_k = 5$ ,  $\pi_{dk} = 2,25$  и  $\sigma = 0,8$

На рис. 4 и 5 использованы следующие условные обозначения:  $\bar{N}_e$  — относительная эффективная мощность;  $\bar{G}_k$  — относительный расход рабочего тела;  $\bar{N}_T$  — относительная тепловая мощность;  $\eta$  — КПД;  $T$  — температура, К;  $\pi$  — степень повышения давления.

### Обсуждение (Discussion)

Во всем диапазоне значений относительной эффективной мощности  $\bar{N}_e$ , т. е. при частичных нагрузках, эффективный КПД ( $\eta_e$ ) в схеме одноконтурной ЗМГТУ с ТКУ и Р выше, чем в схеме ЗМГТУ с Р для всех типов нагружения.

При винтовом виде нагружения КПД ( $\eta_e$ ) для всех схем двигателей (см. рис. 1 и 2) выше, чем при генераторном типе нагружения, поскольку закон регулирования двигателя приближается к количественному (относительный расход рабочего тела  $\bar{G}_k$  при меньшей мощности установки уменьшается).

В схемах на рис. 1 и 2 охладитель газа после регенератора теплоты можно использовать в качестве котла-утилизатора для обеспечения теплом объектов на обитаемых аппаратах. Таким образом, ЗМГТУ с ТКУ и Р обладает высокой энергетической эффективностью при использовании ее в когенерационном режиме. Так, теплотехнический (общий) КПД  $\eta_{tt} = 0,8$  и стабилен во всем диапазоне режимов нагружения, а при мощности  $\bar{N}_e = 0,5-0,6$  относительная тепловая мощность когенерационной установки составит  $\bar{N}_T = 0,8-0,9$ .

### Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. ЗМГТУ в одноконтурном исполнении способны работать на углеводородном топливе с окислителем кислородом, причем ЗМГТУ с ТКУ и Р на всех режимах нагружения имеют эффективный КПД выше, чем ЗМГТУ с Р (регенерацией теплоты).

2. Одноконтурные ЗМГТУ при винтовом нагружении на частичных нагрузках экономичнее, чем на переменных генераторных нагрузках.

3. ЗМГТУ могут производить механическую и тепловую энергию, обеспечивая высокую энергоэффективность установки в условиях подводного плавания.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00469.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышев, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33) — С. 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152.

2. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.

3. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

4. Пат. 2542166 Российская Федерация, МПК F02C1 1/04. Энергетическая установка подводного аппарата / В. Ю. Дорофеев, В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков; заявит. и патентообл. ОАО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит»». — № 2013153997/06; заяв. 04.12.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

5. Пат. 180005 Российская Федерация, МПК F02C 6/12. Газотурбинная воздухонезависимая установка подводного аппарата / В. Т. Матвеев, А. В. Дологлонян, В. А. Очеретяный; заявит. и патентообл. ФГБВОУ «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова». — № 2011111332; заявл. 04.04.2017; опубл. 30.02.2018, Бюл. № 16.

6. Bianchi M. Inverted Brayton cycle employment for low-temperature cogenerative applications / M. Bianchi, G. N. di Montenegro, A. Peretto // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2002. — Vol. 124. — Is. 3. — Pp. 561–565. DOI: 10.1115/1.1447237.

7. Bianchi M. A feasibility study of inverted brayton cycle for gas turbine repowering / M. Bianchi, G. N. di Montenegro, A. Peretto, P. R. Spina // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2005. — Vol. 127. — Is. 3. — Pp. 599–605. DOI: 10.1115/1.1765121.

8. Kennedy I. Experimental investigation of an inverted Brayton cycle for exhaust gas energy recovery / I. Kennedy, Z. Chen, B. Ceen, S. Jones, C. D. Copeland // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2019. — Vol. 141. — Is. 3. — Pp. 032301. DOI: 10.1115/1.4041109.

9. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А. Н. Арбеков [и др.]. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 678 с.

10. Матвеев В. Т. Энергоэффективность воздухонезависимых микрогазотурбинных установок сложных циклов для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.

11. Matviienko V. T. Closed-Cycle Micro Gas-Turbine System with Overexpansion Turbines and Heat Regeneration for Underwater Application / V. T. Matviienko, A. V. Dologlonyan, A. N. Grekov // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — IEEE, 2019. — С. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933910.

12. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas-turbine engine with overexpansion turbine / V. Matviienko, V. Ocheretianyi // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. — 2010. — Vol. 44007. — Pp. 33–37. DOI: 10.1115/GT2010-22029.

13. Матвеев В. Т. Эффективность работы газотурбинного двигателя с регенерацией теплоты на частичных винтовых нагрузках / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный // Вісник СевНТУ. — 2011. — № 119. — С. 118–121.

## REFERENCES

1. Chernyshov, Evgeny Aleksandrovich, Elena Anatolievna Romanova, and Aleksey Dmitrievich Romanov. "Development of air independent power stations of submarines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152.
2. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Shipbuilding* 4 (2012): 29–33.
3. Matviienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. "Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.
4. Dorofeev, V. Yu., V. V. Zamukov, and D. V. Sidorenkov. RU 2 542 166, IPC FO2C1 1/04. Energeticheskaya ustanovka podvodnogo apparata. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2015.
5. Matveenko, V. T., A. V. Dologlonyan, and V. A. Ocheretyanyi. RU 180005, IPC F 02 S 6/02. Gazoturbinaya vozdukhonezavisimaya ustanovka podvodnogo apparata. Russian Federation, assignee. Publ. 30 May 2018.
6. Bianchi, M., G. Negri di Montenegro, and A. Peretto. "Inverted Brayton cycle employment for low-temperature cogenerative applications." *J. Eng. Gas Turbines Power* 124.3 (2002): 561–565. DOI: 10.1115/1.1447237.
7. Bianchi, M., G. N. di Montenegro, A. Peretto, and P. R. Spina. "A feasibility study of inverted brayton cycle for gas turbine repowering." *J. Eng. Gas Turbines Power* 127.3 (2005): 599–605. DOI: 10.1115/1.1765121.
8. Kennedy, Ian, Z. Chen, B. Ceen, S. Jones, and C.D. Copeland. "Experimental investigation of an inverted Brayton cycle for exhaust gas energy recovery." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 141.3 (2019): 032301. DOI: 10.1115/1.4041109.
9. Arbekov, A. N., et al. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnykh i kombinirovannykh ustanovok* M. Izd. MGTU im. N.E. Bauman, 2017.
10. Matviienko, Valerii T., Vladimir A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. "Energy efficiency of air-independent micro-gas-turbine plant of complex cycles for the underwater equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.
11. Matviienko, V. T., A. V. Dologlonyan, and A. N. Grekov. "Closed-Cycle Micro Gas-Turbine System with Overexpansion Turbines and Heat Regeneration for Underwater Application." *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2019. 1–4. DOI: 10.1109/FarEast-Con.2019.8933910.
12. Matviienko, V., and V. Ocheretianyi. "Variable regimes operation of cogenerative gas-turbine engine with overexpansion turbine." *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Vol. 44007. 2010. 33–37. DOI: 10.1115/GT2010-22029.
13. Matviienko, V. T., and V. A. Ocheretyanyi. "Efficiency of performance of gas turbine engine with heat regeneration on partial loading." *Visnik SevNTU* 119 (2011): 118–121.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Матвеев Валерий Тимофеевич** — доктор технических наук, профессор Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова 299028, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Дыбенко Павла 1, корп. А  
 e-mail: [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru)

**Очеретяный Владимир Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
 e-mail: [ocheret-1961@rambler.ru](mailto:ocheret-1961@rambler.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Matviienko, Valerii T.** — Dr. of Technical Sciences, professor Nakhimov Black Sea Higher Naval School 1–A, Dybenko Pavla Str., Sevastopol, 299028, Russian Federation  
 e-mail: [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru)

**Ocheretianyi, Vladimir A.** — PhD, associate professor Sevastopol State University 33, Universitetskaia Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation  
 e-mail: [ocheret-1961@rambler.ru](mailto:ocheret-1961@rambler.ru)

**Дологлонян Андрей Вартазарович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБНУ «Институт природно-технических систем»  
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,  
ул. Ленина, 28  
e-mail: [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru)

**Dologlonyan, Andrey V.** —  
PhD, associate professor  
Institute of nature and technical systems  
28, Lenina Str., Sevastopol, 299011,  
Russian Federation  
e-mail: [dologlonyan@mail.ru](mailto:dologlonyan@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 21 июля 2020 г.*

*Received: July 21, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774

## CLASSIFICATION OF MODERN METHODS FOR IMPROVING THE WORKING PROCESS OF MARINE DIESEL ENGINE

**P. A. Erofeev<sup>1</sup>, V. A. Zhukov<sup>2</sup>, S. G. Chernyi<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> — Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

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

*An analytical review of the main methods for improving the working process of marine diesel engines, with a method for their systematization and grouping is provided in the paper. The issue of modern methods and ways of improving the criteria for environmental friendliness, economy and energy efficiency of a diesel engine as the main ship power plant, taking into account the requirements of the MARPOL 73/78 convention, as well as compliance with the Register rules, has been studied. Based on the analysis performed, a block diagram of methods for improving the working process of a marine diesel engine is presented. The proposed block diagram makes it possible for the user to easily select the method of interest for modernizing the operation of the ship power plant, with its further detailed study. The object of scientific research is methods of improving the working process of marine diesel engines. The purpose of the research is: analysis of both basic and modern methods of modernization of the working process of the marine diesel engine, with the further possibility of their systematization and grouping in the form of a structural diagram; implementation of the collected and analyzed information in the form of the structural diagram of methods for modernizing the working process of the marine diesel engine. The research of both modern approaches and basic methods of modernization of the working process of the marine diesel engine is carried out by an analytical method followed by implementation into the block-diagram. A block diagram of the classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engines is obtained. The results obtained allow us to conclude that the proposed block diagram makes it possible for the user to easily select the method of interest for modernization of the ship power plant operation with its further detailed study. There are uniqueness and novelty of the block diagram associated with the use of new topical methods for improving the diesel engine.*

*Keywords: energy efficiency, marine diesel engine, modernization method, block diagram, workflow, efficiency coefficient.*

**For citation:**

Erofeev, Pavel A., Vladimir A. Zhukov, and Sergei G. Chernyi. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

**УДК 681.5**

## КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**П. А. Ерофеев<sup>1</sup>, В. А. Жуков<sup>2</sup>, С. Г. Черный<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская Федерация

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

*В статье приводится аналитический обзор основных методов улучшения рабочего процесса судовых дизельных двигателей со способом их систематизации и группировки. Изучен вопрос современных методов и способов повышения критериев экологичности, экономичности и энергоэффективности*

дизельного двигателя как основной судовой энергетической установки с учетом требований Конвенции МАРПОЛ-73/78, а также соблюдением правил российских классификационных обществ. На основе выполненного анализа представлена блок-схема методов усовершенствования рабочего процесса судового дизельного двигателя. Предлагаемая блок-схема дает возможность простоты выбора пользователем интересующего метода модернизации работы судовой энергетической установки с дальнейшим подробным его изучением. Отмечается, что объектом научного исследования являются методы усовершенствования рабочего процесса судовых дизельных двигателей. Результатами проведенного научного исследования являются: анализ как базовых, так и современных методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя с дальнейшей возможностью их систематизации и группировки в виде структурной схемы и реализация собранной и проанализированной информации в виде структурной схемы методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя. Отмечается, что исследования как современных подходов, так и базовых методов модернизации рабочего процесса судового дизельного двигателя проводились аналитическим методом с последующей реализацией в блок-схему. Имеет место уникальность блок-схемы и новизна, связанные с применением новых актуальных методов усовершенствования дизельного двигателя.

*Ключевые слова:* энергоэффективность, судовой дизельный двигатель, метод модернизации, структурная схема, рабочий процесс, коэффициент полезного действия.

**Для цитирования:**

Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

### Введение (Introduction)

Актуальным требованием, предъявляемым Международной морской организацией (ИМО) к морским судам различного назначения, является их высокая энергоэффективность. Формализация данного требования осуществлена путем введения для новых (находящихся в постройке) судов проектного (конструктивного) индикатора энергетической эффективности (EEDI) [1] и для существующих (находящихся в эксплуатации) судов является эксплуатационным критерием (индикатором) энергетической эффективности судна ( $EEOI, \frac{\text{масса CO}_2}{\text{т} \cdot \text{км}}$ ) [2]:

$$EEDI = \frac{(M_{\text{ТЭРпроект}} C_F)}{A_{\text{проект}}};$$
$$EEOI = \frac{(M_{\text{ТЭРфакт}} C_F)}{A_{\text{факт}}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{ТЭРпроект}}, M_{\text{ТЭРфакт}}$  — проектное и действительное потребление топлива всеми судовыми потребителями энергии, кг топлива/ рейс;  $A_{\text{проект}}, A_{\text{факт}}$  — соответственно, проектная и действительная произведенная работа судна, т·км/рейс;  $C_F$  — безразмерный конверсионный фактор приведения расхода топлива к выбросам  $\text{CO}_2$ , кг  $\text{CO}_2$ /кг топлива.

Из представленных выражений (1) видно, что оба индикатора представляют собой отношение количества произведенного парникового газа  $\text{CO}_2$  к величине транспортной работы судна за определенный период времени (рейс, год и т. д.) и различаются лишь способом подсчета величин, входящих в них. Показатели, устанавливаемые ИМО, учитывают три основных фактора:

- расход топлива;
- выбросы диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ );
- работу (судовой энергетической установки или судна в целом).

Указанные показатели энергетической эффективности морской техники являются интегральными. Для оценки уровня энергоэффективности конкретного технического объекта необходима локализация показателей.

Локализация показателей, обеспечивающая возможность их определения и анализа, может осуществляться как по времени: час, рейс, навигация, год, так и по виду объектов: тип двигателя, тип

и назначение судна, судоходная компания и др. [3]. Уточненная формула показателя IMO EEDI учитывает часовой расход топлива каждым судовым потребителем и скорость движения судна в милях за час. Аналогичные показатели энергоэффективности устанавливаются российскими национальными стандартами [4], [5] и применяются к судам, эксплуатирующимся на внутренних водных путях.

В соответствии со «Стратегией развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» приоритетными задачами являются повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок на внутреннем и мировом водном транспорте. При этом одним из перспективных направлений повышения производительности эксплуатируемого морского и речного флота считается снижение эксплуатационных потерь, которое может быть достигнуто путем рационального использования топлива и смазочных материалов, а также улучшения технических показателей эксплуатации флота. Решение указанных задач, в первую очередь, необходимо для обеспечения конкурентоспособности водного транспорта по отношению к другим видам транспорта [6].

Основными потребителями топлива и источниками эмиссии CO<sub>2</sub> на судах являются главные и вспомогательные двигатели, в качестве которых как на морских, так и на речных судах уже более ста лет применяются, главным образом, дизельные двигатели. Для дизельных двигателей наиболее информативными локальными показателями энергоэффективности являются удельный эффективный расход топлива и эффективный КПД. Важнейшей целью совершенствования рабочего процесса судового дизеля и его конструкции является повышение энергоэффективности, объективно характеризуемой данными показателями.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Эффективный КПД судового дизеля, характеризующий совокупность процессов преобразования химической энергии топлива в механическую энергию, передаваемую потребителю, определяется равенством [3]:

$$\eta_e = \eta_t \eta_{oi} \eta_{\text{мех}}, \quad (2)$$

где  $\eta_t$  — термический КПД идеального цикла (для судового дизеля — цикл Тринклера);  $\eta_{oi}$  — относительный индикаторный КПД, оценивающий степень приближения процессов действительного цикла к идеальным термодинамическим процессам;  $\eta_{\text{мех}}$  — механический КПД, учитывающий механические потери, сопровождающие преобразование тепловой энергии в работу в реальном двигателе.

Анализируя возможности повышения энергетической эффективности рабочих процессов судовых дизелей, необходимо четко представлять, за счет увеличения каких КПД обеспечивается рост эффективности работы двигателя. Отсутствие таких представлений приводит к ошибкам, описанным в работах [7], [8]. В качестве основы при выборе путей совершенствования термического цикла и соответственно повышения термического КПД следует использовать концепцию предельно возможных и максимально достижимых границ цикла, изложенную в работах [9], [10]. Совершенствование термодинамических циклов судовых дизелей, как и любых других тепловых двигателей в соответствии с теоремой Карно, направлено, в конечном счете, на расширение температурного диапазона, в котором осуществляется цикл и повышение термического КПД —  $\eta_t$ . Основным ресурсом расширения этого диапазона является повышение максимальной температуры цикла, ограничиваемой в реальных двигателях конструктивными и технологическими факторами.

Повышение максимальной температуры цикла приводит к возрастанию температур отработавших газов и охлаждающей жидкости двигателя, что приводит к расширению возможностей использования вторичных энергетических ресурсов для повышения энергоэффективности судовых энергетических установок. Перспективы использования вторичных энергетических ресурсов и технические средства для реализации данного ресурса повышения энергоэффективности рассмотрены в работах [11]–[15]. Основными источниками вторичных энергетических ресурсов являются: теплота, отводимая отработавшими газами; теплота, отводимая от надвучного воздуха; теплота, отводимая теплоносителем системы охлаждения [16]. Совершенствование рабочих процессов судовых дизелей с целью повышения их энергоэффективности связывают также с когенерационными циклами,

такими как органический цикл Ренкина [17]–[20], в котором может использоваться как вода из системы охлаждения дизеля, так и специальные теплоносители. Перспективным является использование в судовой энергетике установок, включающих системы рекуперации теплоты отработавших газов и охлаждающей жидкости в цикле Брайтона [21], [22]. Для оценки результативности предлагаемых мер по повышению энергоэффективности судовых энергетических установок в настоящее время используются различные методики, базирующиеся как на традиционных подходах [23], так и реализующие методы численного моделирования [24], [25] и нечеткой логики [26].

Анализ литературных источников как отечественных, так и зарубежных авторов показывает, что повышение энергоэффективности судовых энергетических установок и их экологической безопасности непосредственно зависит от качества рабочих процессов главных и вспомогательных судовых дизелей. С целью разработки мер по дальнейшему совершенствованию рабочих процессов дизелей необходимо систематизировать возможные направления модернизации.

### Результаты (Results)

При разработке классификации были выделены две группы судовых дизелей: находящиеся в эксплуатации и проектируемые, для которых возможности воздействия на рабочий процесс существенно отличаются. В результате сбора и анализа научно-технической информации разработана классификация методов усовершенствования рабочего процесса судового дизеля, представленная на рисунке.



Методы совершенствования рабочего процесса дизельного двигателя

### Обсуждение (Discussion)

Первая группа классификации включает конструктивные и технологические методы, которые используются для дизельных двигателей, находящихся в эксплуатации, при этом данные методы не требуют серьезного вмешательства в конструкцию двигателя. Данные методы повышения качества рабочего процесса судового дизельного двигателя базируются на изменении физико-химических свойств топливовоздушной смеси с помощью воздействия на топливо и совершенствования топливоподготовки, а именно: подогрева топлива, использования присадок к топливу, обработки топлива электростатическим полем, озонирования топлива, применения катализаторов. С целью улучшения экономических и экологических показателей дизелей, находящихся в эксплуатации, может также использоваться замена традиционного дизельного топлива альтернативным топливом, использование более высококачественного топлива, а также применение водотопливных эмульсий [27]–[29]. Для находящихся в эксплуатации двигателей могут также рассматриваться различные методы воздействия на воздушный заряд, подаваемый в цилиндр через впускной клапан ДВС: использование электростатического поля для ионизации воздуха, добавка озона  $O_3$  или кислорода  $O_2$  в воздушный заряд, дополнительная турбулизация воздушного заряда, рециркуляция отработавших газов. Изменение свойств топлива и окислителя интенсифицирует процесс сгорания и теплоподвода к рабочему телу, обеспечивая, таким образом, повышение относительного индикаторного КПД —  $\eta_{oi}$ .

Указанные способы требуют меньших затрат по сравнению с конструктивными изменениями, так как являются технологическими способами модернизации. Они позволяют добиться повышения экологической безопасности и энергоэффективности дизельных двигателей различных типов и марок в широком диапазоне мощностей и частот вращения коленчатого вала. Недостатками этих методов является то, что практически все они находятся в стадии разработки и требуют дополнительных исследований с проведением лабораторных, стендовых и натурных испытаний с целью адаптации методов к конкретным двигателям и условиям их эксплуатации, а также разработки дополнительного оборудования и аппаратуры для судовых дизельных двигателей. При оценке целесообразности использования указанных методов необходимо учитывать не только эффективность метода (увеличение эффективного КПД  $\eta_e$ , снижение выбросов диоксида углерода  $CO_2$  и сокращение токсичности и дымности отработавших газов), но и затраты, связанные с модернизацией систем двигателя.

Во вторую группу классификации входят мероприятия, проводимые на этапе проектирования дизельного двигателя. К конструктивным изменениям, оказывающим наиболее существенное влияние на повышение энергоэффективности рабочего цикла дизеля, относятся следующие: оптимизация формы камеры сгорания, подбор вихревого отношения, применение четырех клапанных головок цилиндров, оптимизация работы узлов трения, оптимизация режимов охлаждения дизельного двигателя; оптимизация параметров наддува, применение топливной аппаратуры с высокой энергией впрыскивания, оптимизация распыливания топлива за счет применения форсунок с электронным управлением, применение двух- и многоступенчатого впрыска, электронное регулирование рабочих параметров дизельного двигателя [30]–[32], введение в цикл дизеля дополнительных рабочих ходов [33]. Указанные методы требуют более серьезных изменений конструкции двигателя по сравнению с методами первой группы. Реализация методов в различной степени обеспечивает повышение термического, относительного индикаторного и механического КПД, определяющих величину эффективного КПД двигателя.

В свою очередь, методы второй группы требуют дополнительных материальных и временных ресурсов для проведения научных исследований, опытно-конструкторской проработки, доводочных испытаний и опытной эксплуатации. С целью сокращения периода внедрения созданных конструкций необходимо широко использовать моделирование объектов и процессов. Все проводимые модернизации судовых дизелей должны соответствовать требованиям Правил классификационных обществ: Российского морского регистра судоходства и Российского речного регистра судоходства, касающихся энергетических установок судов или проходить их свидетельство.

### Заключение (Conclusion)

Предлагаемая классификация методов совершенствования рабочих процессов судовых дизелей позволяет систематизировать и автоматизировать процедуру выбора направления модернизации судовой энергетической установки, с дальнейшим его подробным исследованием. На основе разработанной схемы планируется создание базы данных имеющихся конструктивных решений и разработок и математических моделей рабочих процессов. В процессе реализации выбора и исследования модернизации судового дизеля с целью совершенствования рабочего процесса новое поколение судовых дизельных двигателей приобретет следующие положительные характеристики:

- многотопливность;
- оптимальное давление впрыска топлива;
- максимально допустимое давление цикла;
- комбинированные механизмы контроля выбросов, встроенные в двигатель;
- проведение технического обслуживания на основе оценки реального состояния двигателя в условиях эксплуатации;
- возможность сбора, передачи и обработки данных о работе двигателя в режиме реального времени с целью оптимизации работы судна;
- удаленное подключение к данным, позволяющее проводить диагностику двигателя и выбор корректирующих действий.

Создание и внедрение прогрессивных технологий, определяющих основные направления развития судовых дизелей, являются перспективными тенденциями в судостроении и смежных областях техники. Непрерывно продолжающееся совершенствование судовых дизелей, обеспечивающее повышение их энергоэффективности и экологической безопасности, позволяет с большой долей вероятности утверждать, что дизельный двигатель выдержит испытание временем, оставаясь основным двигателем для большинства судов в мире в долгосрочной перспективе, а также будет широко использоваться в перспективных гибридных судовых энергетических установках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МЕРС.1/Circ.681. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships. — London: International Maritime Organization, 2009. — 8 p.
2. МЕРС.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI). — London: International Maritime Organization, 2009. — 10 p.
3. *Ерофеев В. Л.* Управление энергоэффективностью объектов морской техники и судовых двигателей внутреннего сгорания: монография / В. Л. Ерофеев [и др.]; под ред. В. Л. Ерофеева, В. А. Жукова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 184 с.
4. ГОСТ Р 51541–99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность, состав показателей. Общие положения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. — 8 с.
5. ГОСТ Р 51387–99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. — 16 с.
6. Распоряжение Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/22004/> (дата обращения: 10.08.2020).
7. *Ерофеев В.Л.* Неточность термодинамических определений и терминов – путь к вечному двигателю второго рода / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.
8. *Ерофеев В. Л.* О качестве и достоверности научно-технической информации / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Сб. тез. докладов нац. науч.-практ. конф. проф.-преп. сост. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 76–78.
9. *Тузов Л. В.* Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты / Л. В. Тузов, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 1 (259). — С. 3–6.

10. *Ерофеев В. Л.* Пределы повышения энергетической эффективности топливоиспользования поршневого ДВС / В. Л. Ерофеев, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 2 (260). — С. 33–38.

11. *Choi B. C.* Thermodynamic analysis of a transcritical CO<sub>2</sub> heat recovery system with 2-stage reheat applied to cooling water of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship / B. C. Choi // Energy. — 2016. — Vol. 107. — Pp. 532–541. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.116.

12. *Ерофеев, В. Л.* О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

13. *Zhu S.* A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles / S. Zhu, K. Zhang, K. Deng // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — Vol. 120. — Pp. 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

14. *Liu X.* Performance analysis and optimization of an electricity-cooling cogeneration system for waste heat recovery of marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, M. He // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 214. — Pp. 112887. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112887.

15. *Dere C.* Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach / C. Dere, C. Deniz // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 220. — Pp. 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.

16. *Lion S.* A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery / S. Lion, I. Vlaskos, R. Taccani // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.

17. *Larsen U.* Expansion of organic Rankine cycle working fluid in a cylinder of a low-speed two-stroke ship engine / U. Larsen, J. Wronski, J. G. Andreasen, F. Baldi, L. Pierobon // Energy. — 2017. — Vol. 119. — Pp. 1212–1220. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.069.

18. *Sellers C.* Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water / C. Sellers // Energy Procedia. — 2017. — Vol. 129. — Pp. 495–502. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.168.

19. *Liu X.* A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, M. He // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 265. — Pp. 121502. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121502.

20. *Ouyang T.* Design and optimisation of an advanced waste heat cascade utilisation system for a large marine diesel engine / T. Ouyang, G. Huang, Z. Su, J. Xu, F. Zhou, N. Chen // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 273. — Pp. 123057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123057.

21. *Pan P.* Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle waste heat recovery system for an ocean-going 9000 TEU container ship / P. Pan, C. Yuan, Y. Sun, X. Yan, M. Lu, R. Bucknall // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 221. — Pp. 113077. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113077.

22. *Feng Y.* Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine / Y. Feng, Z. Du, M. Shreka, Y. Zhu, S. Zhou, W. Zhang // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 206. — Pp. 112483. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112483.

23. *Ерофеев В. Л.* Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

24. *Tsitsilonis K.M.* A novel systematic methodology for ship propulsion engines energy management / K. M. Tsitsilonis, G. Theotokatos // Journal of Cleaner Production. — 2018. — Vol. 204. — Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.154.

25. *Barone G.* Sustainable energy design of cruise ships through dynamic simulations: Multi-objective optimization for waste heat recovery / G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, A. Palombo, M. Vicidomini // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 221. — Pp. 113166. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113166.

26. *Tran T. A.* Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method / T. A. Tran // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 107383. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107383.

27. *Бабаев А. И.* Влияние свойств топлива на токсичность отработавших газов дизелей / Анализ технического уровня и тенденций развития ДВС / А. И. Бабаев // Информцентр - НИИД. — М., 1994. — Вып. 10. — С. 3–35.
28. *Дудышев В. Д.* Экономия топлива и снижение токсичности бензиновых двигателей / В. Д. Дудышев // Экология и промышленность России. — 2003. — № 5. — С. 39–41.
29. *Курников А. С.* Разработка методики проектирования комплекса систем обеспечения обитаемости и повышения экологической безопасности судов на основе активированных окислительных технологий / А.С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. 5: Судовая и промышленная энергетика. — 2003. — № 5. — С. 9–27.
30. *Kaluza P.* The complex network of global cargo ship movements / P. Kaluza, A. Kölsch, M. T. Gastner, B. Blasius // Journal of the Royal Society Interface. — 2010. — Vol. 7. — Is. 48. — Pp. 1093–1103. DOI: 10.1098/rsif.2009.0495.
31. MAN Diesel & Turbo. (2008, August 19). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Retrieved December 2010 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.mandieselturbo.com/files/news/files09187/7780-0060-00ppr.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files09187/7780-0060-00ppr.pdf) (дата обращения: 12.08.2020).
32. *Безюков О. К.* Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания / О.К. Безюков, В.А. Жуков, В.Н. Тимофеев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 272 с.
33. *Жуков В. А.* Двигатели с шеститактным рабочим циклом: порядок работы и схемы коленчатых валов / В. А. Жуков, А. И. Яманин, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

## REFERENCES

1. *MEPC.1/Circ.681. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships.* London: International Maritime Organization, 2009.
2. *MEPC.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI).* London: International Maritime Organization, 2009.
3. *Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, O. V. Mel'nik, O. K. Bezyukov, E. V. Erofeeva, and A. A. Martynov. Upravlenie energoeffektivnost'yu ob'ektov morskoi tekhniki i sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya: monografiya.* Edited by V. L. Erofeev, V. A. Zhukov. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018.
4. *GOST R 51541–99. Energy conservation. Energy efficiency. Composition of indicators. Basic concept.* М.: ИПК Izdatel'stvo standartov, 2000.
5. *GOST R 51387–99. Energy conservation. Norm-method securing. Basic concept.* М.: ИПК Izdatel'stvo standartov, 2000.
6. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 fevralya 2016 g. № 327-r «Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda».* Web. 10 Aug. 2020 <<http://government.ru/docs/22004/>>.
7. *Erofeyev, Valentin Leonidovich, Vladimir Anatolevich Zhukov, and Alexander Sergeevich Pryakhin. "Inexactitude of thermodynamical definition and terms is a way to the perpetual engine of the second kind." Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 6(40) (2016): 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.*
8. *Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, and O. V. Mel'nik. "O kachestve i dostovernosti nauchno-tekhnicheckoi informatsii." Sb. tez. dokladov nats. nauchno-prakt. konf. prof.-prepod. Sost. FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova».* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2019. 76–78.
9. *Tuzov, L. V., N. B. Ganin, and A.S. Pryakhin. "Ideal thermodynamic cycle for reciprocating engine with isochoric and isothermal heat supply." Dvigatelistroyeniye 1(259) (2015): 3–6.*
10. *Yerofeyev, V. L., N. B. Ganin, and A. S. Pryakhin. "Fuel efficiency enhancement resources." Dvigatelistroyeniye 2(260) (2015): 33–38.*
11. *Choi, Byung Chul. "Thermodynamic analysis of a transcritical CO2 heat recovery system with 2-stage reheat applied to cooling water of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship." Energy 107 (2016): 532–541. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.116.*
12. *Erofeyev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. "On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine." Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.*

13. Zhu, Sipeng, Kun Zhang, and Kangyao Deng. “A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120 (2020): 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

14. Liu, Xiangyang, Manh Quang Nguyen, and Maogang He. “Performance analysis and optimization of an electricity-cooling cogeneration system for waste heat recovery of marine engine.” *Energy Conversion and Management* 214 (2020): 112887. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112887.

15. Dere, Caglar, and Cengiz Deniz. “Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach.” *Energy Conversion and Management* 220 (2020): 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.

16. Lion, Simone, Ioannis Vlaskos, and Rodolfo Taccani. “A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery.” *Energy Conversion and Management* 207 (2020): 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.

17. Larsen, Ulrik, Jorrit Wronski, Jesper Graa Andreasen, Francesco Baldi, and Leonardo Pierobon. “Expansion of organic Rankine cycle working fluid in a cylinder of a low-speed two-stroke ship engine.” *Energy* 119 (2017): 1212–1220. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.069.

18. Sellers, Christopher. “Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water.” *Energy Procedia* 129 (2017): 495–502. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.168.

19. Liu, Xiangyang, Manh Quang Nguyen, Jianchu Chu, Tian Lan, and Maogang He. A novel waste heat recovery system combing steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine / X. Liu, M. Q. Nguyen, J. Chu, T. Lan, M. He // *Journal of Cleaner Production*. – Volume 265, 20 August 2020, 121502//doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121502.

20. Ouyang, Tiancheng, Guicong Huang, Zixiang Su, Jisong Xu, Feng Zhou, and Nan Chen. “Design and optimization of an advanced waste heat cascade utilization system for a large marine diesel engine.” *Journal of Cleaner Production* 273 (2020): 123057. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123057.

21. Pan, Pengcheng, Chengqing Yuan, Yuwei Sun, Xiping Yan, Mingjian Lu, and Richard Bucknall. “Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle waste heat recovery system for an ocean-going 9000 TEU container ship.” *Energy Conversion and Management* 221 (2020): 113077. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113077.

22. Feng, Yongming, Zhiqiang Du, Majed Shreka, Yuanqing Zhu, Song Zhou, and Wenping Zhang. “Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine.” *Energy Conversion and Management* 206 (2020): 112483. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112483.

23. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. “Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

24. Tsitsilonis, Konstantinos-Marios, and Gerasimos Theotokatos. “A novel systematic methodology for ship propulsion engines energy management.” *Journal of Cleaner Production* 204 (2018): 212–236. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.154.

25. Barone, Giovanni, Annamaria Buonomano, Cesare Forzano, Adolfo Palombo, and Maria Vicidomini. “Sustainable energy design of cruise ships through dynamic simulations: Multi-objective optimization for waste heat recovery.” *Energy Conversion and Management* 221 (2020): 113166. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113166.

26. Tran, Tien Anh. “Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method.” *Ocean Engineering* 207 (2020): 107383. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107383.

27. Babaev, A. I. “Vliyanie svoistv topliva na toksichnost’ otrabotavshikh gazov dizelei / Analiz tekhnicheskogo urovnya i tendentsii razvitiya DVS.” *Informtsentr – NIID. M.*, 1994. Vol. 10. Pp. 3–35.

28. Doudyshev, V. D. “Saving fuel and reducing toxicity of gasoline engines.” *Ecology and Industry of Russia* 5 (2003): 39–41.

29. Kurnikov, A. S. “Development of a technique of designing of a complex of systems of maintenance habitability and increase of ecological safety of ships on the basis of the activated oxidizing technologies.” *Bulletin of VSAWT* 5 (2003): 9–27.

30. Kaluza, Pablo, Andrea Kölzsch, Michael T. Gastner, and Bernd Blasius. “The complex network of global cargo ship movements.” *Journal of the Royal Society Interface* 7.48 (2010): 1093–1103. DOI: 10.1098/rsif.2009.0495.

31. MAN Diesel & Turbo. (2008, August 19). Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Retrieved December 2010. Web. 12 Aug. 2020 <www.mandieselturbo.com:/files/news/files/9187/7780-0060-00ppr.pdf>.

32. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O.Makarova, 2015.

33. Zhukov, Vladimir A., Alexander I. Yamanin, and Olesya V. Melnik. "Six storke engines: operating procedure and schemes of crankshafts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ерофеев Павел Андреевич** — аспирант

*Научный руководитель:*

Черный Сергей Григорьевич

ФГБОУ ВО «Керченский Государственный

Морской Технологический Университет»

298309, Российская Федерация, г. Керчь,

ул. Орджоникидзе, 82.

e-mail: [pavel.erofeev.95@mail.ru](mailto:pavel.erofeev.95@mail.ru)

**Жуков Владимир Анатольевич** —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru), [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru)

**Черный Сергей Григорьевич** —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Керченский Государственный

Морской Технологический Университет»

298309, Российская Федерация, г. Керчь,

ул. Орджоникидзе, 82

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: [sergiiblack@gmail.com](mailto:sergiiblack@gmail.com), [kaf\\_koib@gumrf.ru](mailto:kaf_koib@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Erofeev, Pavel A.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Chernyi, Sergei G.

Kerch State Maritime

Technological University

82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,

Russian Federation

e-mail: [pavel.erofeev.95@mail.ru](mailto:pavel.erofeev.95@mail.ru)

**Zhukov, Vladimir A.** —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru), [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru)

**Chernyi, Sergei G.** —

PhD, associate professor

Kerch State Maritime

Technological University

82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: [sergiiblack@gmail.com](mailto:sergiiblack@gmail.com), [kaf\\_koib@gumrf.ru](mailto:kaf_koib@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 31 июля 2020 г.*

*Received: July 31, 2020.*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788

## OPTIMAL CONTROL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ACCORDING TO THE CRITERION OF ENERGY LOSSES

**V. F. Samosejko<sup>1</sup>, V. O. Guskov<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — Electrosila Plant — branch of PJSC “Power machines”,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The control algorithm allowing to control an electric drive with an asynchronous motor optimally according to the criterion of minimum energy losses is represented in this study. The “electromagnetic torque/energy loss” ratio is used as an indicator of energy efficiency control. The synthesis of the control system is carried out by means of the voltage equations of the asynchronous motor. In this study the equations of error currents of vector control are used that allows to come from differential equations of the 4<sup>th</sup> order describing the dynamic of electromagnetic processes of asynchronous motor to the equations of the 2<sup>nd</sup> order. Electromagnetic processes are controlled by creating two control loops for magnetizing and load currents. It is described how to adjust the modular optimum of the circuits of the magnetizing current and the load current. As a result of synthesis of electromagnetic processes, electromagnetic torque of the asynchronous motor is formed. High operation speed and robustness for the control system is provided by the use of virtual dissipation loops. Simulation and comparison of the proposed optimal control system by the criterion of energy loss with a control system at the direct magnetizing current are performed. The dependences of the energy efficiency indicator from the moment of resistance on the asynchronous motor shaft and the rotor speed of the asynchronous motor for compared control systems are identified. The comparison by the indicator of energy efficiency and the quality of dynamic process highlights the advantages of the suggested control system. Optimal control according to the criterion of energy losses allows you to control the asynchronous motor with a higher value of energy efficiency indicator, in contrast to a control system where a constant magnetizing current is maintained. The quality of the dynamic processes of the optimal control system according to the criterion of energy losses is not much inferior to the quality of the dynamic processes of the control system with direct magnetizing current.*

*Keywords: asynchronous motor, vector control, optimal control, indicator of energy efficiency, magnetizing current, load current, energy losses.*

**For citation:**

Samosejko, Veniamin F., and Vladimir O. Guskov. “Optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of energy losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 775–788. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

**УДК 621.3.072.6**

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО КРИТЕРИЮ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

**В. Ф. Самосейко<sup>1</sup>, В. О. Гуськов<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — Завод «Электросила» — филиал ПАО «Силовые машины»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье предложен алгоритм управления, позволяющий осуществлять управление асинхронным двигателем оптимально по критерию минимума потерь энергии. В качестве показателя энергоэффективности*

управления используется отношение электромагнитный момент / потери мощности. Синтез системы управления осуществляется при помощи уравнений напряжения асинхронного двигателя. Применяются уравнения токов ошибок векторного управления, позволяющие перейти от дифференциальных уравнений 4-го порядка, описывающих динамику электромагнитных процессов асинхронного двигателя, к уравнениям 2-го порядка. Управление электромагнитными процессами ведется путем создания двух контуров управления токами намагничивания и нагрузки. Описана операция настройки контуров тока намагничивания и тока нагрузки на «модульный оптимум». В результате синтеза электромагнитных процессов формируется электромагнитный момент асинхронного электродвигателя. Высокое быстродействие и свойство робастности для системы управления обеспечиваются применением контуров виртуальной диссипации. Выполнено моделирование и сравнение предложенной оптимальной системы управления по критерию потеря энергии с системой управления при постоянном токе намагничивания. Выявлены зависимости показателя энергоэффективности от момента сопротивления на валу асинхронного двигателя и скорости вращения ротора асинхронного двигателя для сопоставляемых систем управления. Сравнение по показателю энергоэффективности и качеству динамических процессов выделяет преимущества предложенной системы управления над системой управления при постоянном токе намагничивания. Оптимальное управление по критерию потерь энергии позволяет управлять асинхронным двигателем с более высоким значением показателя энергоэффективности в отличие от системы управления, в которой поддерживается постоянство тока намагничивания. Качество динамических переходных процессов оптимальной системы управления по критерию потерь энергии ненамного уступает качеству динамических процессов системы управления с постоянным током намагничивания.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, векторное управление, оптимальное управление, показатель энергоэффективности, ток намагничивания, ток нагрузки, потери энергии.

**Для цитирования:**

Самосейко В. Ф. Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 775–788. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

---

### Введение (Introduction)

Асинхронный двигатель является одной из наиболее распространенных электрических машин в мире, занимая лидирующее место по установленной мощности, намного опережая остальные типы электродвигателей. Широкое распространение он получил благодаря простоте конструкции и изготовления, высокой надежности эксплуатации, сравнительно низкой себестоимости и широкому спектру применения.

Асинхронный электропривод успешно эксплуатируется на объектах водного транспорта в системах движения различных судов и т. д. К электроприводам, эксплуатируемым на таких объектах, предъявляются строгие требования, среди которых важное место занимают *экономичность* и *энергоэффективность*. В электроприводе потери существуют в преобразователях электрической и механической энергии, а также в электромеханических преобразователях. В электрических преобразователях в основном имеются электрические потери, потери на гистерезис, потери в полупроводниковых приборах и т. д. В механических преобразователях потери возникают при преодолении сил сопротивления движению. В электромеханических преобразователях имеют место потери, присущие и электрическим, и механическим преобразователям. Повышения энергоэффективности добиваются с помощью использования современных материалов и технологий.

Данная работа посвящена повышению энергоэффективности при управлении асинхронным двигателем. Наиболее энергоэффективным и оптимальным способом управления [1] асинхронным электродвигателем является *частотное регулирование*, ставшее возможным благодаря созданию инверторов и преобразователей частоты на базе IGBT. Частотное регулирование, в свою очередь, делится на *скалярное* [2] и *векторное управление* [3].

Существует ряд отечественных работ, посвященных энергоэффективному управлению асинхронным электродвигателем, в которых рассмотрены алгоритмы управления, позволяющие минимизировать электрические и магнитные потери. Критериями энергоэффективности могут служить отношения: «ток статора / электромагнитный момент» [4]–[6], «электромагнитный мо-

мент / электрические потери» [1] или, к примеру, КПД [7], [8]. В работах [9]–[11] исследованы вопросы скалярного управления. Так, в работе [11] энергоэффективность оценивается с помощью специального коэффициента, выведенного из схемы замещения [12], который помимо активных потерь учитывает потребление реактивной мощности, в работах [13], [14] рассмотрено энергоэффективное управление в системе прямого управления моментом. Помимо работ отечественных ученых, существует большое количество зарубежных исследований, посвященных вопросам энергоэффективного управления [15]–[17].

Наибольшим потенциалом для создания энергоэффективного управления обладает векторное управление и его разновидности. В данной статье предложен алгоритм управления, позволяющий реализовать оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии. Исходя из того, что электродвигатель служит для создания вращающего момента, в работе за показатель энергоэффективности принято отношение «электромагнитный момент / потери мощности». Знаменатель выбранного отношения состоит из электрических и магнитных потерь мощности.

### Методы и материалы (Methods Materials)

Модель оптимального по критерию потерь энергии алгоритма управления асинхронным двигателем построена на основе модифицированного векторного управления, описанного в статье [18].

*Уравнения напряжений асинхронного электродвигателя.* На обмотки статора подается напряжение  $U_S$ , при этом по статору начинают протекать токи  $I_S$  и  $I_R$ . Векторы  $U_S$ ,  $I_S$  и  $I_R$  являются периодическими функциями времени. Угловая частота токов статора  $\omega_1$  и токов ротора  $\omega_2$  имеет связь в виде разности:  $\omega_1 - \omega_2 = \omega$ , где  $\omega$  — угловая электрическая скорость вращения ротора. На основании законов Кирхгофа, уравнения напряжений в матричной форме принимают вид [1]:

$$\begin{aligned} U_S &= R_S \cdot I_S + L_S \cdot pI_S + L_{SS} \cdot pI_S + L_{SR} \cdot pI_R; \\ 0 &= R_R \cdot I_R + L_R \cdot pI_R + pL_{RR} \cdot pI_R + L_{RS} \cdot pI_S, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I_S$ ,  $I_R$  — соответственно вектора токов статора и ротора;  $R_S$ ,  $R_R$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $L_{SS}$ ,  $L_{RR}$  — матрицы индуктивностей обмоток статора и ротора;  $L_{SR}$  и  $L_{RS}^T$  — соответственно матрицы взаимной индуктивности обмоток статора и ротора;  $p$  — оператор дифференцирования по времени.

Осуществление синтеза системы управления невозможно в случаях, когда дифференциальные уравнения имеют периодические коэффициенты. Для получения возможности осуществления синтеза используется преобразование Горева – Парка, трансформирующее периодические коэффициенты в постоянные. Результатом замены переменных в уравнениях (1) является в данном случае переход к уравнениям с постоянными коэффициентами во вращающейся системе координат  $d-q$ . Угловая скорость вращения новой системы координат равна  $\omega_1$ :

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot I_1 + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot E \cdot I_1 + L_{01} \cdot pI_1 + \omega_1 \cdot L_0 \cdot E \cdot I_2 + L_0 \cdot pI_2; \\ 0 &= R_2 \cdot I_2 + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot E \cdot I_2 + L_{02} \cdot pI_2 + \omega_2 \cdot L_0 \cdot E \cdot I_1 + L_0 \cdot pI_1. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_{01} = L_0 + L_1$  и  $L_{02} = L_0 + L_2$  — полные индуктивности обмоток статора и ротора;  $R_1 = R_S$ ;  $R_2 = R_R$ ;  $L_0$  — основная индуктивность;  $L_1 = L_S$ ;  $L_2 = L_R$ ;  $E$  — матрица поворота на угол  $\pi/2$ .

В данной системе координат напряжения и токи оказываются непериодическими функциями, а в установившихся режимах работы — константами.

Динамику электромагнитных процессов в осях  $d-q$ , представленную уравнениями (2), в развернутом виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} u_d &= R_1 \cdot i_d - L_{01} \cdot (\omega_1 \cdot i_q - pi_d) - L_0 \cdot (\omega_1 \cdot j_q - pj_d); \\ u_q &= R_1 \cdot i_q + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_d + L_{02} \cdot pi_q + L_0 \cdot (\omega_1 \cdot j_d + pj_q); \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - L_{02} \cdot (\omega_2 \cdot j_q - p j_d) - L_0 \cdot (\omega_2 \cdot i_q - p i_d);$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q + L_{02} \cdot p j_d - L_0 \cdot (\omega_2 \cdot i_q - p i_d), \quad (4)$$

где  $i_d$  и  $i_q$  — элементы вектора  $\mathbf{I}_1$  токов статора;  $j_d$  и  $j_q$  — элементы вектора  $\mathbf{I}_2$  токов ротора.

Параметры асинхронного электродвигателя целесообразно записывать в относительных единицах, помечая их символом\*.

*Электромагнитный момент асинхронной машины.* В обмотках статора и ротора запасена электромагнитная энергия, которая определяется по формуле

$$W(\gamma) = 0,5 \cdot \mathbf{I}_S^T \cdot \mathbf{L}_{SS} \cdot \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_S^T \cdot \mathbf{L}_{SR}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_R + 0,5 \cdot \mathbf{I}_R^T \cdot \mathbf{L}_{RR} \cdot \mathbf{I}_R. \quad (5)$$

Электромагнитный момент асинхронной машины в естественной системе координат [1] представим в виде:

$$M = p_n \cdot \frac{\partial W(\gamma)}{\partial \gamma} = p_n \cdot \mathbf{I}_S^T \cdot \frac{\partial \mathbf{L}_{SR}(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \mathbf{I}_R = p_n \cdot \mathbf{I}_R^T \cdot \frac{\partial \mathbf{L}_{RS}(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \mathbf{I}_S. \quad (6)$$

Электромагнитный момент можно выразить посредством векторов токов статора и ротора, определенных в системе координат  $d$ - $q$ :

$$M = 0,5 \cdot p_n \cdot m \cdot \mathbf{I}_1^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2. \quad (7)$$

В развернутом виде можно представить электромагнитный момент используя элементы векторов токов статора и ротора:

$$M^* = L_0^* \cdot i_d^* \cdot j_q^* - L_0^* \cdot i_q^* \cdot j_d^*. \quad (8)$$

*Уравнение движения ротора.* Механические процессы в асинхронной машине описываются с помощью уравнения движения ротора асинхронного двигателя. Данное уравнение записано в относительных единицах и представлено в виде следующей формулы:

$$T_m \cdot p \omega^* = M^* - M_c^*, \quad (9)$$

где  $T_m$  — механическая постоянная времени;  $\omega^* = \Omega / \Omega_0$  — относительная угловая скорость вращения ротора;  $M^*$  — относительный электромагнитный момент;  $M_c^*$  — относительный момент сопротивления движению.

Датчики тока позволяют системе управления получать информацию о токах, протекающих в статоре. Замкнутая обмотка ротора не позволяет получить информацию о протекающих в нем токах. Поскольку данное обстоятельство затрудняет синтез системы управления, в данном случае необходима замена переменных для токов ротора:

$$j_d^* = -\frac{L_0^* \cdot (i_d^* - a_d - x_d^*)}{L_{02}^*}; \quad j_q^* = -\frac{L_0^* \cdot (i_q^* - a_q - x_q^*)}{L_{02}^*}, \quad (10)$$

где  $a_d$  и  $a_q$  — константы, характеризующие намагничивание статора;  $x_d$  и  $x_q$  — достаточно малые токи, так называемые *токи ошибок векторного управления*.

Ортогональная система координат  $d$ - $q$  может быть произвольно привязана к плоскости поперечного сечения асинхронной машины, так как магнитная система асинхронной машины имеет симметрию. В данном случае ось, являющаяся продольной магнитному полю, обозначается символом  $d$ , а ось, являющаяся поперечной магнитному полю — символом  $q$ . Токи  $i_d$  и  $i_q$  представляют собой проекции тока статора на оси системы координат  $d$ - $q$ . Ток  $i_d$  называется *током намагничивания*, ток  $i_q$  — *током нагрузки*. Константа  $a_q$ , характеризующая ток намагничивания по оси  $q$ , равна нулю. Следовательно, принимается  $a_d = i_d^*$ . В результате при замене переменных (10) в уравнениях (3) и (4) получается новая система  $A$  дифференциальных уравнений, в которой переменными состояниями являются токи намагничивания и нагрузки, а также токи ошибок векторного управления:  $x_d$  и  $x_q$ .

*Уравнения ошибок векторного управления.* Уравнения напряжений системы дифференциальных уравнений  $A$  для относительных токов ошибок векторного управления имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T_{02}^* \cdot p x_d^* &= i_d^* - a_d - x_d^* + \omega_2^* \cdot T_{02}^* \cdot x_q^*; \\ T_{02}^* \cdot p x_q^* &= i_q^* - x_q^* - \omega_2^* \cdot T_{02}^* \cdot (a_d - x_d^*), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $T_{02}^* = L_{02}^* / R_2^*$  — относительная постоянная времени затухания токов ошибок;  $R_2^*$  — относительное сопротивление ротора;  $\omega_2^*$  — относительная частота токов ротора.

Приняв в уравнениях (11)  $x_d^* = x_q^* = 0$ , получим два алгебраических уравнения:

$$i_d^* = a_d; \quad \omega_2^* = \frac{1}{L_{02}^* / R_2^*} \cdot \frac{i_q^*}{i_d^*} = \frac{1}{T_{02}^*} \cdot \tan(\theta_l), \quad (12)$$

где  $\tan(\theta_l) = i_q^* / i_d^*$  — тангенс угла токовой нагрузки.

При условии выполнения равенств (12) и условий  $a_q = 0$  и  $a_d = i_d^*$  в статическом режиме обеспечивается выполнение равенств  $x_d^* = x_q^* = 0$ . Из соотношений (10) можно сделать вывод, что токи ротора асинхронной машины при  $x_d^* = x_q^* = 0$  принимают следующие значения:

$$j_d^* = 0; \quad j_q^* = -\frac{L_0^*}{L_{02}^*} \cdot i_q^*. \quad (13)$$

При использовании в расчете равенств (12) уравнения ошибок векторного управления записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_{02}^* \cdot p x_d^* + x_d^* - x_q^* \cdot \tan(\theta_l) &= 0; \\ T_{02}^* \cdot p x_q^* + x_q^* + x_d^* \cdot \tan(\theta_l) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Корни характеристического уравнения для системы дифференциальных уравнений (14) определяются при помощи выражения:

$$p_{1,2} = \frac{-1 \pm j \cdot \tan(\theta_l)}{T_{02}^*}, \quad (15)$$

где  $j$  — мнимая единица.

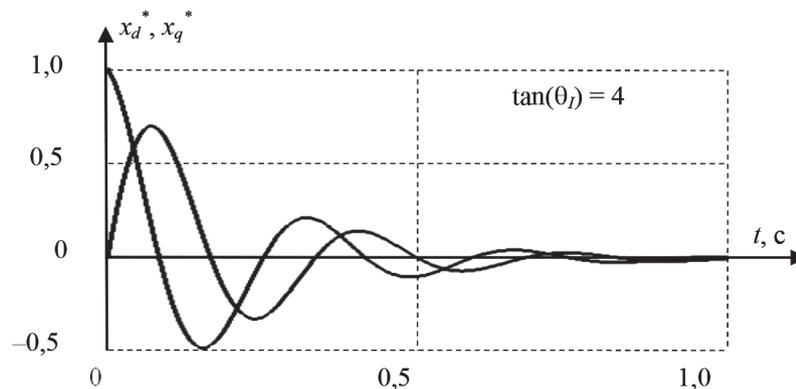


Рис. 1. Графики токов ошибок векторного управления  $x_d^*, x_q^*$  при возмущениях

Тангенс угла токовой нагрузки  $\theta_l$  является показателем колебательности динамических процессов. Постоянная времени затухания токов ошибок управления  $T_{02}$  сопоставима с механической постоянной времени. Исходя из этого токи ошибок векторного управления представляют собой медленно изменяющиеся переменные. При выполнении условия (12) эти переменные динамически стремятся к нулю, как показано на рис. 1.

*Уравнения векторного управления.* Уравнения напряжений системы дифференциальных уравнений  $A$  для токов статора при  $x_d^* = x_q^* = 0$  примут следующий вид:

$$u_d^* = R_1^* \cdot i_d^* - \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + L_d^* \cdot p i_d^*;$$

$$u_q^* = R_1^* \cdot i_q^* + \omega_1^* \cdot L_d^* \cdot i_d^* + L_q^* \cdot p i_q^* , \quad (16)$$

Устойчивость для данной системы дифференциальных уравнений достигается путем выполнения условий (12).

Угловая частота напряжения статора может быть получена через относительную частоту вращения ротора  $\omega^*$ :

$$\omega_1^* = \omega^* + \omega_2^* , \quad (17)$$

где  $\omega_2^*$  — относительная угловая частота токов ротора, определяемая из выражения (12).

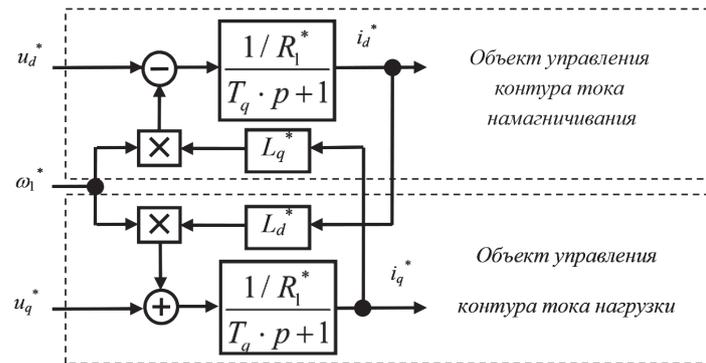


Рис. 2. Структурная схема электрической части асинхронного электродвигателя

На рис. 2 приведена структурная схема асинхронного двигателя, составленная в соответствии с уравнениями (16). Данная схема является основой для синтеза контуров управления токами намагничивания  $i_d$  и нагрузки  $i_q$ .

### Результаты (Results)

*Синтез контуров управления токами намагничивания и нагрузки.* Известно, что в асинхронном двигателе протекают динамические процессы, имеющие колебательный характер. Для улучшения качества динамических процессов асинхронного двигателя целесообразно выполнить демпфирование токов намагничивания и нагрузки. В данной работе демпфирование обеспечивается путем ввода в систему управления специальных контуров, которые выполняют виртуальную диссипацию. Применение контуров виртуальной диссипации позволяет увеличить быстродействие системы управления, при этом придавая ей свойство робастности. При выполнении синтеза регуляторов контуров управления токами намагничивания  $i_d$  и нагрузки  $i_q$  за основу были взяты уравнения (16). Синтез системы осуществляется согласно схеме, приведенной на рис. 2.

*Регуляторы тока намагничивания.* Управление током намагничивания осуществляется посредством специального контура виртуальной диссипации [18], в состав которого входит пропорциональный параллельный регулятор. Термин «параметр виртуальной диссипации», обозначаемый как  $R_x^*$ , является коэффициентом передачи пропорционального параллельного регулятора.

Выполнение условия  $R_x^* > 2 \cdot L_k^* \cdot |\omega_1^*|$  способствует изменению характера динамических процессов, которые из колебательных превращаются в апериодические. Относительное сопротивление обмоток статора намного меньше значения параметра  $R_x^*$ . Это обстоятельство заставляет объект управления трансформироваться из колебательного звена в апериодическое. Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W = \frac{1/R_x^*}{T_q \cdot p + 1} , \quad (18)$$

где  $T_q$  — постоянная времени контура намагничивания с виртуальной диссипацией, определяемая по формуле

$$T_q = L_q^* / (\omega_1 \cdot R_x^*). \quad (19)$$

Ток нагрузки  $i_q$  будет оказывать возмущающее воздействие, что, в свою очередь, приведет к ошибкам в управлении. Астатизм управления током намагничивания достигается путем введения второго контура управления, в котором используется интегральный регулятор, имеющий следующую передаточную функцию:

$$W = \frac{R_x^*}{2 \cdot T_Q \cdot p}. \quad (20)$$

Структурная схема контура управления током намагничивания приведена на рис. 3.

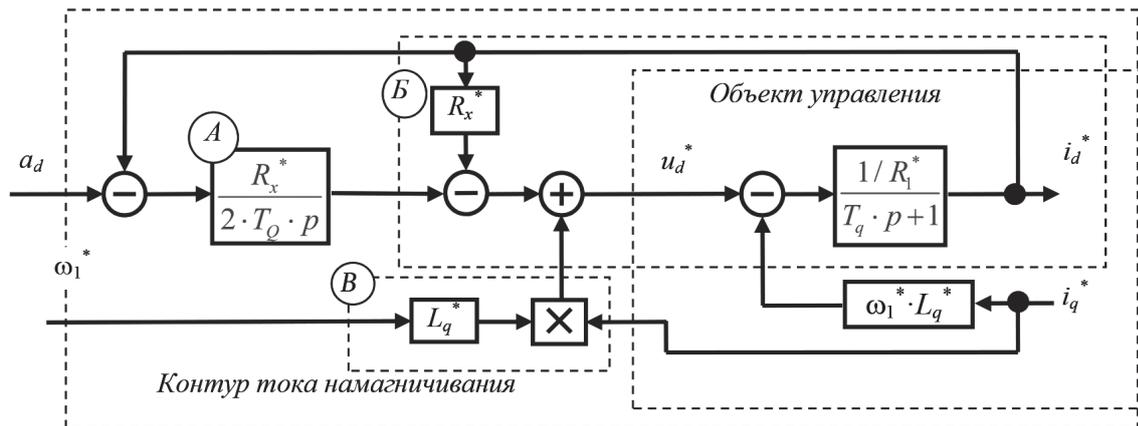


Рис. 3. Структурная схема контура управления током намагничивания асинхронного электродвигателя:  
 А — регулятор тока намагничивания; Б — контур виртуальной диссипации;  
 В — узел компенсации влияния тока нагрузки;  $a_d$  — задание тока намагничивания  $i_d$

*Регуляторы тока нагрузки.* Схема управления током нагрузки построена на основе модели управления током намагничивания и имеет в своем составе аналогичные регуляторы и контура. Постоянная времени у интегрального регулятора тока нагрузки такая же, как у интегрального регулятора контура тока намагничивания:

$$T_q = L_q^* / (\omega_6 \cdot R_x^*). \quad (21)$$

Аналогичным также является значение параметра  $R_x^*$ . Структурная схема контура управления током нагрузки приведена на рис. 4. Контур токов намагничивания и нагрузки настроены на «модульный оптимум».

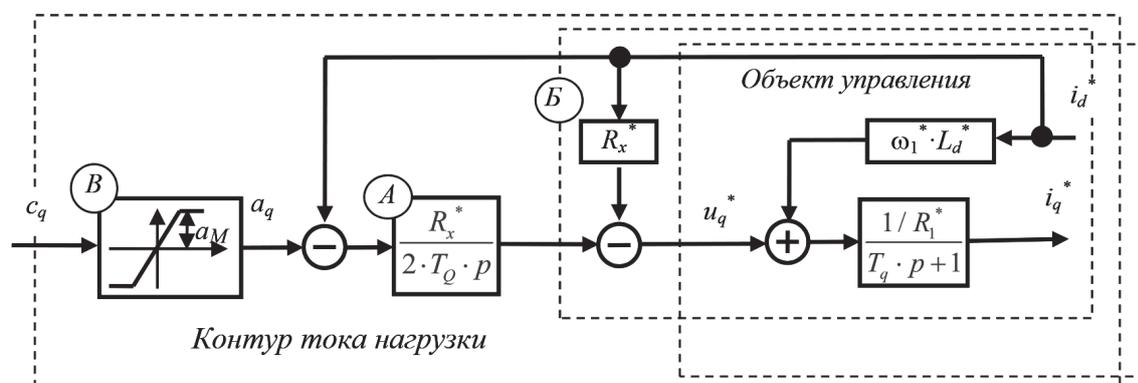


Рис. 4. Структурная схема контура управления током нагрузки асинхронного электродвигателя:  
 А — интегральный регулятор тока нагрузки; Б — контур виртуальной диссипации;  
 В — блок ограничения тока нагрузки;  $c_q$  — задание тока нагрузки  $i_q$

Ограничение тока нагрузки применяется в случаях, когда необходимо лимитировать электромагнитный момент или ток статора. Реализация ограничения тока нагрузки осуществляется с помощью звена «насыщение», которое представлено блоком 5 на рис. 6.

*Регуляторы скорости.* Создание контура скорости обусловлено необходимостью поддерживать скорость на уровне заданного значения. При настройке на «модульный оптимум» регулятор контура скорости будет представлять собой пропорциональное звено:

$$k_{pc} = \frac{L_{01}^* \cdot L_{02}^* \cdot T_{мех}}{L_0^{*2} \cdot 4 \cdot T_q} \approx \frac{T_{мех}}{4 \cdot T_q}. \quad (24)$$

Важным недостатком пропорционального звена является наличие статической ошибки, определяемой с помощью формулы

$$\Delta\omega^* = \frac{M_c^* \cdot 4 \cdot T_q}{T_{мех}}. \quad (25)$$

Электропривод ответственных узлов и механизмов не должен допускать возможность иметь статическую ошибку. Добиться астатизма можно путем введения интегрального регулятора. Реализовать интегральный регулятор можно во втором контуре скорости. При этом система управления будет иметь первый контур скорости, настроенный на «модульный оптимум» и являющийся объектом управления второго контура. Астатизм будет обеспечиваться благодаря интегральному регулятору второго контура скорости.

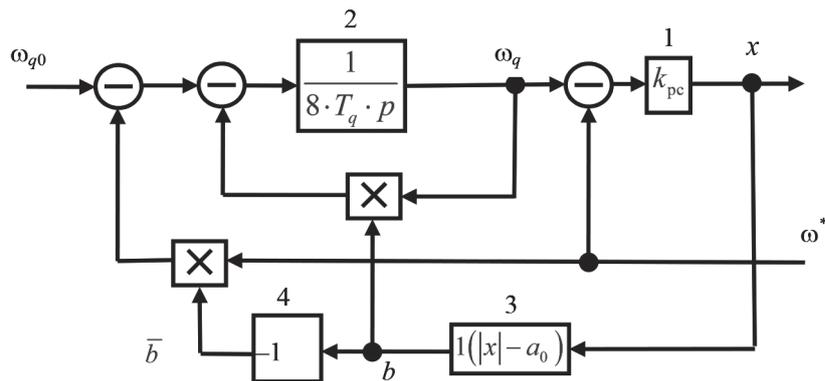


Рис. 5. Структурная схема адаптивного регулятора скорости:

- 1 — пропорциональный регулятор скорости; 2 — интегральный регулятор скорости;
- 3 — звено, реализующее единичную функцию; 4 — звено, реализующее логическую инверсию

Представленная на рис. 5 схема реализации регулятора скорости обладает свойством адаптироваться [19] к режиму работы электропривода. В момент, когда система управления стабилизирует ток, регулятор скорости представляет собой пропорциональное звено 1. В момент, когда система управления стабилизирует скорость вращения ротора, схема формирует второй контур управления скоростью, который имеет в своем составе интегральный регулятор 2. Данная схема при двух разных режимах работы позволяет иметь разные регуляторы.

*Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии.* Относительные электрические и магнитные потери мощности асинхронного электродвигателя можно представить в следующем виде:

$$\Delta P^* = R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}, \quad (26)$$

где  $R_d^* \approx R_1^* + R_0^* \cdot \omega_1^{*1.3}$  — продольное относительное сопротивление обмотки статора;

$R_0^* \approx L_d^{*2} \left( (1 - \eta_n) \cdot \left( 1 - \frac{0,03}{p_n^2} \right) - 2 \cdot R_1^* \right)$  — относительное сопротивление, характеризующее по-

тери в магнитопроводе;  $R_q^* \approx R_1^* + R_2^*$  — поперечное относительное сопротивление обмотки статора.

Относительный электромагнитный момент асинхронного двигателя напрямую связан с токами  $i_d^*$  и  $i_q^*$ :

$$M^* = L_d^* \cdot i_d^* \cdot i_q^*, \quad (27)$$

где  $L_d^* \approx L_{01}^* \approx L_{02}^*$  — относительная продольная индуктивность.

Согласно формулам (26) и (27), показатель энергетической эффективности (электромагнитный момент/ потери мощности) предстанет в следующем виде:

$$\Theta^* = \frac{M^*}{\Delta P^*} = \frac{L_d^* \cdot i_d^* \cdot i_q^*}{R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}}. \quad (28)$$

Из формулы (28) видно, что при уменьшении потерь при заданном значении электромагнитного момента увеличивается показатель энергетической эффективности. Электромагнитный момент и потери напрямую зависят от токов,  $i_d^*$  и  $i_q^*$ . Минимум выражения  $R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}$  достигается при условии

$$R_d^* \cdot i_d^{*2} = R_q^* \cdot i_q^{*2}. \quad (29)$$

Таким образом, задача управления оптимального по критерию потерь энергии сводится к определению токов намагничивания  $i_d^*$  и нагрузки  $i_q^*$  при заданном значении электромагнитного момента  $M^*$  с минимальными потерями мощности. Для достижения цели данной задачи необходимо воздействовать на ток намагничивания. Задание на ток намагничивания выражается из формулы (29) и выглядит следующим образом:

$$a_d = \sqrt{\frac{R_q^*}{R_d^*}} \cdot i_q^*. \quad (30)$$

При формировании системы управления также целесообразно ввести ограничение на ток намагничивания, — его текущее значение не должно превышать номинальное, так как это ведет к дополнительному нагреву и потерям энергии. Реализация ограничения тока намагничивания, так же, как и тока нагрузки, осуществляется с помощью звена «насыщения», представленного блоком б на рис. 6.

*Управление асинхронным двигателем при постоянном токе намагничивания.* Данный тип управления электрическими машинами является одним из наиболее распространенных, поэтому он будет противопоставлен предложенному оптимальному управлению. Принцип действия всех электрических машин основан на взаимодействии двух магнитов. В случае с асинхронным двигателем одним магнитом является статор, другим — ротор. За намагниченность машины отвечает ток намагничивания  $i_d^*$ , который имеет существенное влияние на динамику машины. Номинальный относительный ток намагничивания, обеспечивающий номинальную намагниченность машины, определяется с помощью формулы

$$i_d^* = \frac{1}{L_d^*}. \quad (31)$$

Данное значение тока намагниченности находится на изгибе кривой намагничивания. Дальнейшее увеличение тока намагничивания, как отмечалось ранее, является нерациональным и ведет к нагреву и дополнительным потерям энергии, так как машина входит в режим насыщения.

Структурная схема для управления асинхронным двигателем с постоянным номинальным намагничиванием и энергетически оптимальным управлением приведена на рис. 6, откуда видно, что разница заключается лишь в задании тока намагничивания.

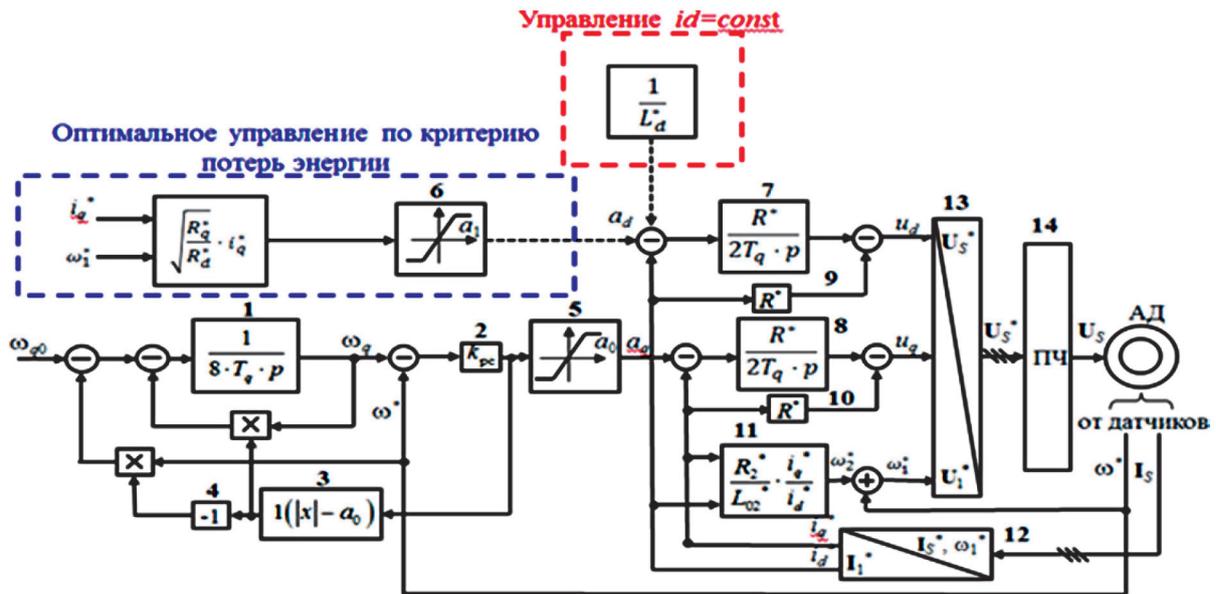


Рис. 6. Структурная схема систем управления асинхронным двигателем:  
 1 — интегральный регулятор скорости; 2 — пропорциональный регулятор скорости;  
 3 — звено, реализующее единичную функцию; 4 — звено, реализующее инверсию;  
 5, 6 — звенья ограничения токов нагрузки и намагничивания соответственно;  
 7, 8 — интегральные регуляторы контуров токов намагничивания и нагрузки соответственно;  
 9, 10 — параметры виртуальной диссипации; 11 — звено определения частоты токов ротора;  
 12, 13 — блоки преобразования координат токов и напряжения соответственно; 14 — преобразователь частоты

### Обсуждение (Discussion)

Результаты моделирования систем управления асинхронным двигателем представлены в виде графиков переходных процессов и приведены на рис. 7.

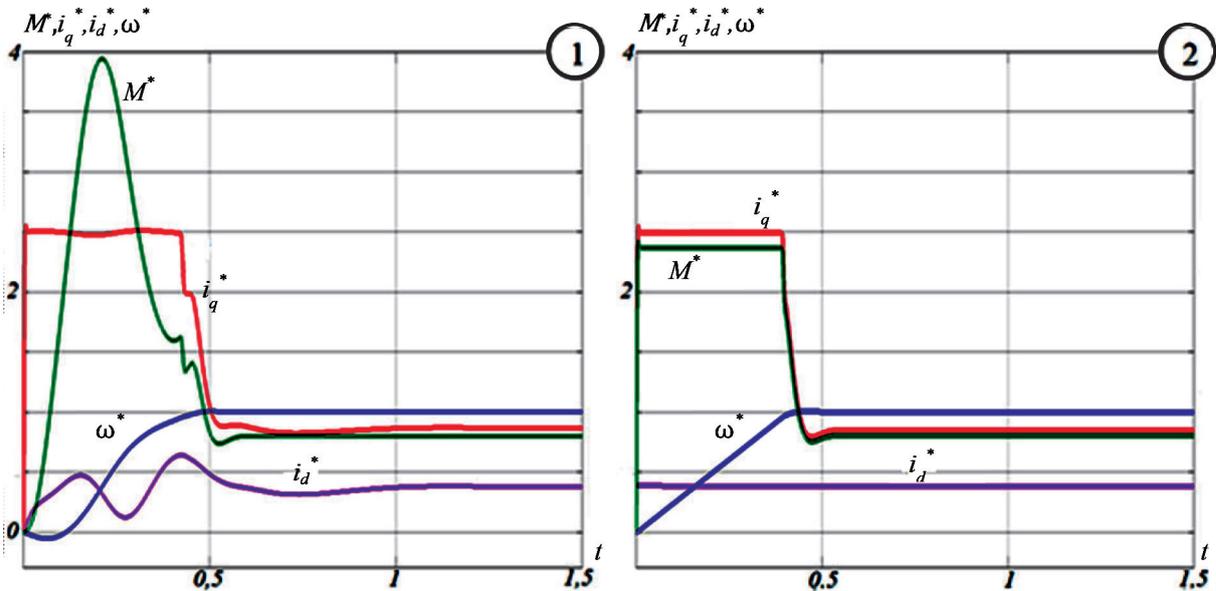


Рис. 7. Пуск асинхронного двигателя под нагрузкой  $M_c^* = 0,8 \cdot M_{ном}^*$ :  
 1 — оптимальное управление по критерию потерь энергии;  
 2 — управление при постоянном токе намагничивания

Графики зависимости показателя энергоэффективности от момента сопротивления на валу двигателя и скорости вращения ротора приведены на рис. 8, откуда видно, что время

переходных процессов для двух противопоставляемых систем управления асинхронным двигателем сопоставимо, что в первую очередь достигается за счет введения контура виртуальной диссипации с энергетически оптимальным управлением только при нагрузке, близкой к номинальной.

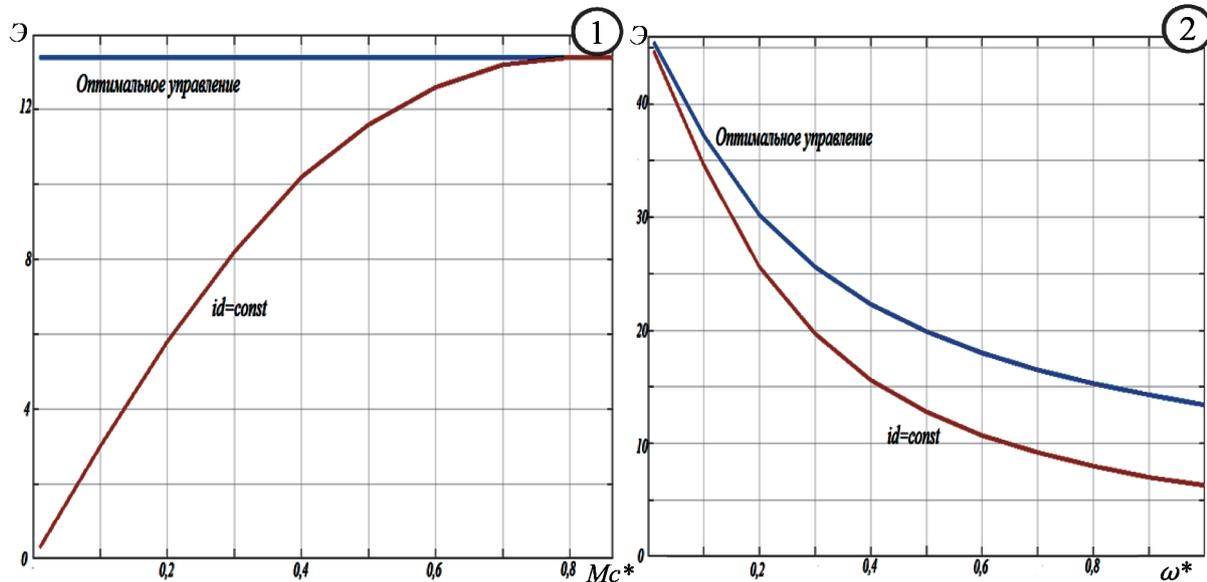


Рис. 8. Графики зависимостей показателя энергоэффективности:  
 1 — зависимость от нагрузки на валу при  $\omega^* = \omega_{\text{НОМ}}^*$ ;  
 2 — зависимость от скорости вращения при  $M_c^* = 0,25 \cdot M_{\text{НОМ}}^*$

Из графиков, приведенных на рис. 8, видно что оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии имеет преимущество перед системой управления с постоянным током намагничивания. Показатель энергоэффективности оптимальной системы управления не зависит от момента сопротивления в отличие от системы управления с постоянным током намагничивания. Это достигается за счет распределения электрических и магнитных потерь. В системе управления с постоянным намагничиванием имеем большие магнитные потери при малых значениях момента сопротивления, так как ток намагничивания всегда имеет постоянное значение независимо от нагрузки. С увеличением скорости вращения ротора асинхронного двигателя показатель энергоэффективности снижается независимо от вида системы управления за счет увеличения магнитных потерь при увеличении частоты токов статора.

### Заключение (Conclusion)

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальное управление по критерию потерь энергии позволяет управлять асинхронным двигателем с более высоким значением показателя энергоэффективности в отличие от системы управления, при которой поддерживается постоянство тока намагничивания. Энергоэффективность систем управления с постоянным номинальным намагничиванием сопоставима с энергетически оптимальным управлением только при нагрузке, близкой к номинальной.
2. При значениях нагрузки, близких к номинальному значению и выше, оптимальная система управления трансформируется в систему управления при постоянном токе намагничивания, данная трансформация обеспечивается звеном ограничения тока намагничивания.
3. Качество динамических переходных процессов предложенной системы управления ненамного уступает качеству динамических процессов системы управления с постоянным током намагничивания. Улучшить качество динамических процессов можно с помощью увеличения параметра виртуальной диссипации.

Введение контура виртуальной диссипации и введение новых переменных — токов ошибок векторного управления, существенно упрощают синтез динамики электромагнитных процессов в асинхронном электродвигателе, так как уравнения, описывающие динамику асинхронного двигателя, трансформируются в уравнения второго порядка, а не третьего, как в классическом векторном управлении. Введение контура виртуальной диссипации наделяет систему управления высоким быстродействием, а также придает ей свойство робастности [20]. Предложенная система управления может быть применима к электроприводам в различных технологических процессах, которые не требуют работы асинхронного двигателя на скорости выше номинальной. Согласно полученным результатам моделирования, данный тип управления может заменить управление с постоянным током намагничивания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
2. Емельянов А. П. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А. П. Емельянов, Б. А. Чуркин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2014. — Т. 14. — № 3. — С. 85–90.
3. Фираго Б. И. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2015. — № 5. — С. 5–16.
4. Мещеряков В. Н. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / В. Н. Мещеряков, В. В. Данилов // Электротехнические системы и комплексы. — 2018. — № 3 (40). — С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11.
5. Мещеряков В. Н. Оптимизация взаимного положения векторов тока статора и магнитного потока асинхронного двигателя при векторном управлении / В. Н. Мещеряков, П. Н. Левин. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2006. — № 1. — С. 25–27.
6. Мещеряков В. Н. Асинхронный электропривод с поддержанием оптимального угла между моментобразующими векторами / В. Н. Мещеряков, П. Е. Цветков, О. В. Мещерякова // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2013. — № 1 (31). — С. 17–21.
7. Макаров В. Г. Оптимальное управление токами электрических машин / В. Г. Макаров, В. А. Матюшин // Вестник Казанского технологического университета. — 2010. — № 11. — С. 186–194.
8. Гарганеев А. Г. Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя / А. Г. Гарганеев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 130–134.
9. Космодамианский А. С. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 44–50.
10. Пугачев А. А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного технического университета. — 2015. — № 3 (64). — С. 32–37.
11. Васильев Д. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д. А. Васильев [и др.] // Вестник НГИЭИ. — 2019. — № 4 (95). — С. 110–115.
12. Носков В. А. М-образная схема замещения асинхронной машины / В. А. Носков // Электричество. — 2012. — № 10. — С. 50–53.
13. Пат. 2587162 Российская Федерация, МПК H02P 27/06, H02P 23/00, H02P 25/02. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя в системе прямого управления моментом / Г. А. Федяева, А. Н. Тарасов, Т. В. Смородова, Д. В. Конохов; заяв. и патентообл. Брянский государственный технический университет. — № 2015104690/07; заявл. 11.02.2015; опублик. 20.06.2016, Бюл. № 17.
14. Пат. 159869 Российская Федерация, МПК H02P 21/12, H02P 25/02, H02P 27/08. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом без датчика температуры обмоток / Г. А. Федяева, А. Н. Тарасов, Т. В. Смородова, Д. В. Конохов; заяв.

и патентообл. Брянский государственный технический университет. — № 2015109540/07; заявл. 19.05.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

15. *Karlovsky P.* Loss Reduction in Induction Motor Drive Using Model Predictive Control / P. Karlovsky, J. Lettl // 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). — IEEE, 2018. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679073.

16. *Karlovsky P.* Iron Loss Minimization Strategy for Predictive Torque Control of Induction Motor / P. Karlovsky, O. Lipcak, J. Bauer // *Electronics*. — 2020. — Vol. 9. — Is. 4. — Pp. 566. DOI: 10.3390/electronics9040566.

17. *Abdelati R.* Optimal control strategy of an induction motor for loss minimization using Pontryaguin principle / R. Abdelati, M. F. Mimouni // *European Journal of Control*. — 2019. — Vol. 49. — Pp. 94–106. DOI: 10.1016/j.ejcon.2019.02.004.

18. *Самосейко В. Ф.* Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В. Ф. Самосейко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

19. Пат. 2622183 Российская Федерация, МПК G05B 11/36, H02P 29/00. Быстродействующий адаптивный регулятор частоты вращения электродвигателя / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. И. Шарашкин, И. В. Гагаринов; заявл. и патентообл. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». — № 2015145548; заявл. 22.10.2015; опубл. 13.06.2017, Бюл. № 17.

20. *Рустамов Г.А.* Робастная система управления с повышенным потенциалом / Г. А. Рустамов // *Известия Томского политехнического университета*. — 2014. — Т. 324. — № 5. — С. 13–20.

## REFERENCES

1. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.
2. Emelianov, A. P., and B. A. Churkin. “Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current.” *Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”* 14.3 (2014): 85–90.
3. Firago, B. I., and D. S. Vasilyev. “On the issue of vector control of the asynchronous motors.” *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 5 (2015): 5–16.
4. Meshcheryakov, Victor N., and Vladimir V. Danilov. “Increase of energy efficiency for induction motor with vector control by means of regulation of flux-generation component of stator current at half static load.” *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(40) (2018): 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11.
5. Meshcheryakov, V. N., and P. N. Levin. “Optimizatsiya vzaimnogo polozheniya vektorov toka statora i magnitnogo potoka asinkhronnogo dvigatelya pri vektornom upravlenii.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 1 (2006): 25–27.
6. Meshcheryakov, V. N., P. E. Tsvetkov, and O. V. Meshcheryakova. “Asinkhronnyi elektroprivod s podderzhanie optimal'nogo ugla mezhdya momentobrazuyushchimi vektorami.” *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* 1(31) (2013): 17–21.
7. Makarov, V. G., and V. A. Matyushin. “Optimal'noe upravlenie tokami elektricheskikh mashin.” *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 11 (2010): 186–194.
8. Garganev, A. G., A. T. Yarovoi, L. Yu. Babushkina, A. S. Karakulov, S. V. Langraf, and A. A. Rasstrigin. “Energoberegayushchaya modifikatsiya vektornogo upravleniya asinkhronnogo dvigatelya.” *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* 308.7 (2005): 130–134.
9. Kosmodamianskii, A. S., V. I. Vorob'ev, and A. A. Pugachev. “Scalar control systems for a traction induction motor.” *Russian Electrical Engineering* 87.9 (2016): 518–524. DOI: 10.3103/S1068371216120105.
10. Pugachev, A. A. “Minimizatsiya moshchnosti poter' v elektroprivode so skalyarnoi sistemoi upravleniya asinkhronnym dvigatelem.” *Vestnik Cherepovetskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3(64) (2015): 32–37.
11. Vasil'ev, D. A., L. A. Panteleeva, P. N. Pokoev, and V. A. Noskov. “Energy efficient asynchronous motor control.” *Bulletin NGIEI* 4(95) (2019): 110–115.
12. Noskov, V. A. “M-obraznaya skhema zameshcheniya asinkhronnoi mashiny.” *Elektrichestvo* 10 (2012): 50–53.
13. Fedyayeva, G. A., A. N. Tarasov, T. V. Smorudova, and D. V. Konokhov. RU 2 587 162 C1, IPC H02P 27/06, H02P 23/00, H02P 25/02. Sposob energoeffektivnogo dvukhzonnogo regulirovaniya skorosti asinkhronnogo dvigatelya v sisteme pryamogo upravleniya momentum. Russian Federation, assignee. Publ. 20 June 2016.

14. Fedyaeva, G. A., A. N. Tarasov, T. V. Smorudova, and D. V. Konokhov. RU 159 869 U1, IPC H02P 21/12, H02P 25/02, H02P 27/08. Sistema energoeffektivnogo dvukhzonnogo regulirovaniya skorosti asinkhronnogo dvigatelya s pryamym upravleniem momentom bez datchika temperatury obmotok. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2016.
15. Karlovsky, Pavel, and Jiri Lettl. "Loss Reduction in Induction Motor Drive Using Model Predictive Control." *2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. IEEE, 2018. 1–4. DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679073.
16. Karlovsky, Pavel, Ondrej Lipcak, and Jan Bauer. "Iron Loss Minimization Strategy for Predictive Torque Control of Induction Motor." *Electronics* 9.4 (2020): 566. DOI: 10.3390/electronics9040566
17. Abdelati, Riadh, and M. Faouzi Mimouni. "Optimal control strategy of an induction motor for loss minimization using Pontryaguin principle." *European Journal of Control* 49 (2019): 94–106. DOI: 10.1016/j.ejcon.2019.02.004.
18. Samosejko, Veniamin F. "The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.
19. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. I. Sharashkin, and I.V. Gagarinov. RU 2 622 183 C2, IPC G05B 11/36, H02P 29/00. Bystrodeistvuyushchii adaptivnyi regulyator chastoty vrashcheniya elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 13.06.2017.
20. Rustamov, Gazanfar A. "Robust control system with high potential." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 324.5 (2014): 13–20.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Самосейко Вениамин Францевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [samoseyko@mail.ru](mailto:samoseyko@mail.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)  
**Гуськов Владимир Олегович** — инженер  
Завод «Электросила» —  
филиал ПАО «Силовые машины»  
196105, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Московский пр., 139  
e-mail: [vladimir\\_guskov@inbox.ru](mailto:vladimir_guskov@inbox.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Samoseiko, Veniamin F.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [samoseyko@mail.ru](mailto:samoseyko@mail.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)  
**Guskov, Vladimir O.** — Engineer  
Electrosila Plant —  
branch of PJSC "Power machines"  
139 Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105,  
Russian Federation  
e-mail: [vladimir\\_guskov@inbox.ru](mailto:vladimir_guskov@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 19 июня 2020 г.  
Received: June 19, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800

## PREVENTIVE PROTECTION OF AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEMS FROM GENERATORS REVERSE POWER

**N. V. Shirokov**

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

*Development of approaches that ensure the safe operation of an Autonomous electric power system in abnormal modes associated with the failure of its elements during operation is considered in the paper. Special attention is paid to the processes that occur in the network when one of the generator units switches to the motor mode of operation. The problem of timely shutdown of an inoperable machine at the moment of its complete unloading in order to prevent overloading of the reverse power of the remaining primary engines in the operable state is formulated. The relevance of this problem for Autonomous electric power systems is proved. It is shown that the use of time delay when generating a signal to disable a failed unit operating with reverse power can not only contribute to the development of a primary engine defect, but also lead to voltage disappearance in the Autonomous electric power system. This circumstance leads to the possibility of an emergency situation that can lead to an accident at the diagnostic facility with the most severe consequences. In this paper, the problem of timely disconnection of the faulty machine at a time when its load is zero in order to prevent overloading the reverse power of the remaining primary engines in the working state is formulated. The analysis of the performance area constructed in the space of power values developed by generator units operating in parallel is performed. The necessity of blocking the process of diagnosing power sources in the mode of switching on parallel operation of one of the generators or in the case of failure of automation means of the Autonomous power system is justified. Based on the study results, an original diagnostic feature that allows identifying the inoperable state of the generator unit during operation is proposed. Its use for the purposes of precautionary control makes it possible to turn off the automatic switch on before the generator switches to the motor mode, prevents overload of the network of the Autonomous electric power system with reverse power and reduces the probability of further development of the failed machine defect. A mathematical description of this diagnostic feature and a method for determining the numerical value of the controlled parameters forming it are proposed. Based on the obtained research results, a new algorithm for precautionary control has been developed; it provides preventive protection of the network from the reverse power of the generator. The advantages of the proposed approach over existing methods for managing the Autonomous electric power system in emergency situations are demonstrated.*

*Keywords: Autonomous electric power system, reverse power, warning control, diagnostic sign, overload of generator sets, preventive protection.*

**For citation:**

Shirokov, Nikolaj V. "Preventive protection of autonomous electric power systems from generators reverse power." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 789–800. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800.

**УДК 621.316:658.58**

## ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ОБРАТНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ

**Н. В. Широков**

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

*Статья посвящена разработке подходов, обеспечивающих безопасную работу автономной электроэнергетической системы в нештатных режимах, связанных с отказом ее элементов в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено процессам, происходящим в сети при переходе одного из генераторов в двигательный режим работы. Обоснована актуальность рассматриваемой проблемы для автономных электроэнергетических систем. Показано, что применение выдержки времени при формировании сигнала*

на отключение вышедшего из строя агрегата, работающего с обратной мощностью, может не только способствовать развитию дефекта первичного двигателя, но и привести к исчезновению напряжения в автономной электроэнергетической системе. Данное обстоятельство обуславливает возможность возникновения аварийной ситуации, способной привести к аварии на объекте диагностирования с самыми тяжелыми последствиями. В работе сформулирована задача своевременного отключения неисправной машины в момент, когда ее нагрузка равна нулю, с целью предотвращения перегрузки обратной мощностью оставшихся в работоспособном состоянии первичных двигателей. Выполнен анализ области работоспособности системы, построенной в пространстве значений мощностей, развиваемых генераторными агрегатами, работающими параллельно. Обоснована необходимость в блокировании процесса диагностирования источников электроэнергии в режиме включения на параллельную работу одного из генераторов или в случае выхода из строя средств автоматизации автономной электроэнергетической системы. По результатам проведенного исследования предложен оригинальный диагностический признак, позволяющий идентифицировать неработоспособное состояние генераторного агрегата в процессе функционирования. Отмечается, что использование диагностического признака в целях предупредительного управления делает возможным отключение автоматического выключателя накануне перехода генератора в двигательный режим, обеспечивает предотвращение перегрузки сети автономной электростанции обратной мощностью и уменьшает вероятность дальнейшего развития дефекта отказавшей машины. Предложено математическое описание данного диагностического признака и методика определения численного значения формирующих его контролируемых параметров. На основе полученных результатов исследований разработан новый алгоритм предупредительного управления, обеспечивающий превентивную защиту сети от обратной мощности генератора. Продемонстрированы преимущества предложенного подхода перед существующими способами управления автономной электроэнергетической системой в нештатных ситуациях.

*Ключевые слова:* автономная электроэнергетическая система, обратная мощность, предупредительное управление, диагностический признак, перегрузка генераторных агрегатов, превентивная защита.

**Для цитирования:**

Широков Н. В. Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности генераторов / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 789–800. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800.

## Введение (Introduction)

Автономные электроэнергетические системы (АЭЭС) выполняют ответственные функции по обеспечению электрической энергией удаленных и труднодоступных объектов, для которых электроснабжение от Единой энергетической системы России оказывается невозможным или нецелесообразным. В этой связи ведутся активные исследования, направленные на улучшение качественных показателей электроэнергии, поставляемой АЭЭС с учетом специфики ее потребителей. К таким потребителям традиционно относятся: предприятия минерально-сырьевого сектора экономики [1]–[3]; населенные пункты и порты, расположенные в местах, где прокладка воздушных линий электропередач крайне затруднена по климатическим или политическим условиям [4], [5]; предприятия транспорта, особенно суда морского и речного флота [6]–[8].

Вместе с тем последние годы охарактеризованы бурным развитием подходов, реализующих технологию Smart Grid (интеллектуальных сетей) для повышения эффективности использования энергетических ресурсов [9], [10]. В рамках данной концепции предполагается целесообразным размещение генераторных агрегатов (ГА) и низковольтных распределительных устройств, получивших название *установок распределенной генерации* (УРГ), которые находятся в непосредственной близости от потребителей [11]–[13]. Данные установки могут работать параллельно с электроэнергетической системой более высокого уровня или самостоятельно обеспечивать электроснабжение закрепленных за ними потребителей, реализуя островной режим эксплуатации. При этом УРГ могут создавать энергетические кластеры распределенной генерации с параллельной работой ГА, которые при функционировании в островном режиме полностью идентичны АЭЭС. Указанное обстоятельство существенно расширяет ареал использования автономных систем электроснабжения и в значительной степени инициирует проведение более активных исследований в данной области электроэнергетики.

В этой связи большой интерес представляют разработки, направленные на повышение безопасной работы АЭЭС в нештатных режимах, связанных с отказом ее элементов в процессе эксплуатации. Одним из направлений данных разработок является создание средств, обеспечивающих своевременное отключение ГА при переходе его в двигательный режим ввиду отказа приводного двигателя [14]–[16]. В статьях [14], [15] авторы справедливо полагают, что формирование сигнала на отключение ГА при переходе его в двигательный режим работы, осуществляемое с выдержкой времени, может привести к серьезным повреждениям первичного двигателя. Для решения проблемы предлагаются оригинальные алгоритмы точного определения момента появления обратной мощности для оперативного отключения агрегата. Однако замена не совсем качественных реле, работающих с большой погрешностью, на современные и более точные устройства позволяет получить приемлемый результат применительно только к простейшим АЭЭС, которые не имеют в своем составе мощных потребителей, создающих нагрузку, соизмеримую с мощностью генератора и грузоподъемных механизмов, работающих с рекуперацией энергии в сеть. В большинстве случаев кратковременная работа в двигательном режиме является одним из возможных вариантов функционирования работоспособного агрегата. В этом случае применение предложенных технических решений приводит к появлению ошибки первого рода при диагностировании и ошибочному отключению исправного ГА.

Практика показывает, что принципиальная ошибка данного подхода заключается в излишней концентрации исследователей на конкретном ГА, игнорировании режимов функционирования АЭЭС и изменении параметров остальных агрегатов, работающих параллельно, исходя из предположения из предположения, что основной целью защиты от обратной мощности является предотвращение серьезных повреждений первичного двигателя, что не вполне корректно. В случае отказа одного из ГА его нагрузка перераспределяется между оставшимися работоспособными машинами. При этом если исходно работают только два агрегата, то нагрузка на работающий ГА с учетом обратной мощности увеличивается более чем в два раза. Как правило, это приводит к остановке первичного двигателя по перегрузке и перерыву в электроснабжении потребителей, что может вызвать нарушения технологических процессов и большие экономические потери, например, при добыче полезных ископаемых.

Не менее серьезные проблемы могут возникать и на транспорте. Так, время восстановления электроснабжения судовых электросетей после обесточивания колеблется в диапазоне от нескольких десятков секунд до нескольких минут [17], в течение которых судно лишено управления, а зачастую и хода. При возникновении подобной ситуации во время шторма или в узкостях, во время маневрирования в районе рифов или прибрежных скал возникает реальная опасность гибели судна и членов экипажа. В этой связи своевременное отключение неработоспособного агрегата до его перехода в двигательный режим работы является важной задачей, решение которой необходимо также для предотвращения перегрузки обратной мощностью оставшихся в работе ГА. При этом простой фиксации момента, когда началось потребление электроэнергии генератором, для идентификации его технического состояния недостаточно, необходимо учитывать также дополнительные параметры.

В работе [18] рассмотрен ряд подходов к диагностированию сложных систем с учетом информации о границах их областей работоспособности. В этой связи в статье [16] предложен метод сегментации области работоспособности с разбиением ее на усеченные области правильного функционирования, которым соответствуют установленные режимы работы АЭЭС. Выделены те из них, при которых ГА работает как электродвигатель и в соответствующие им режимы функционирования электроэнергетической системы идентификация неработоспособного состояния ГА не производится. Эти усеченные области правильного функционирования в работе [19] названы *омонимичными*. При этом представляется возможным отключать ГА, перешедший в двигательный режим работы, без выдержки времени при условии, что АЭЭС не работает в установленных режимах, как показано в работе [16], или ее параметры не принадлежат омонимичной области правильного функционирования в соответствии со статьей [19].

На рис. 1 показана область работоспособности  $H$ , построенная в пространстве внутренних параметров  $N_1$  и  $N_2$ , для плавучего крана Luft-1 [19]. При этом  $N_1$  и  $N_2$  — мощности, развиваемые, соответственно, первым и вторым генераторными агрегатами, номинальная мощность каждого из которых равна 900 кВт. Максимальная величина обратной мощности каждого агрегата составляет 140 кВт, а допустимая величина отклонения мощностей при параллельной работе (точность распределения нагрузок) — 7 % от номинальной мощности, т. е. 63 кВт.

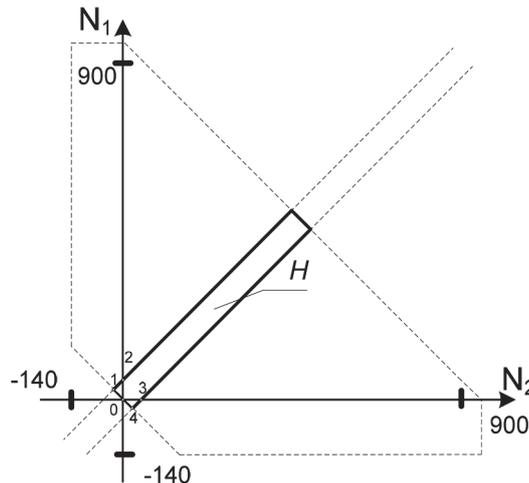


Рис. 1. Область работоспособности  $H$  плавучего крана Luft-1, построенная в пространстве внутренних параметров  $N_1, N_2$

Согласно методу исключения омонимичных областей [19], при переходе одного из ГА в двигательный режим работы проверяют  $S(N_1, N_2)$  — точку, характеризующую мощности, развиваемые агрегатами, входящими в состав АЭС, на принадлежность омонимичным областям правильного функционирования, ограниченными точками 0-1-2 и 0-3-4. Если при переходе первого ГА в двигательный режим выполняется условие

$$S \subset w_1^q, \quad (1)$$

то соответствующий агрегат признают работоспособным и не отключают по обратной мощности. В случае выполнения условия

$$S \subset w_2^q \quad (2)$$

при переходе в двигательный режим не отключают второй ГА.

В выражениях (1) и (2)  $w_1^q$  и  $w_2^q$  — омонимичные области правильного функционирования, принадлежащие области работоспособности  $H$ . Данный подход позволяет избежать ошибки первого рода при диагностировании ГА и в отличие от способов, описанных в работах [14], [15], его применение не приводит к отключению работоспособных агрегатов.

Недостатком предложенного решения является относительная сложность практической реализации, связанная с необходимостью решения задачи принадлежности точки  $S(N_1, N_2)$  треугольнику, ограниченному точками 0-1-2 или 0-3-4 при каждом появлении обратной мощности.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для определения диагностических признаков перехода неработоспособного ГА в двигательный режим работы воспользуемся логико-алгоритмическим методом. На рис. 1 область работоспособности пересекает оси абсцисс и ординат в точках 3 и 2 соответственно. По материалам, изложенным в статье [18], назовем эти точки и точку начала координат *опорными*. Рассмотрим усеченную область правильного функционирования  $w_1^q$ . Опорная точка 2 характеризует состояние

полной разгрузки второго ГА перед его переходом в двигательный режим ( $N_2 = 0$ ). Отрезок 0-2 соответствует максимально допустимому значению мощности, развиваемой первым ГА, если оба агрегата и система распределения нагрузок работоспособны ( $N_{1\text{ доп}}$ ). Эта величина  $\Delta N_{\text{ доп}}$  равна допустимому отклонению разности нагрузок АЭЭС:

$$|N_1 - N_2| \leq \Delta N_{\text{ доп}}. \quad (3)$$

Предположим, что автоматика исправна. Тогда контролируя величину нагрузки первого ГА в момент полной разгрузки и перехода второго ГА в двигательный режим работы, можно идентифицировать неработоспособное состояние агрегата, функционирующего в двигательном режиме, как показано в работе [20]. В этой связи точное определение момента появления обратной мощности посредством алгоритмов, предложенных в [14], [15], представляет существенный интерес.

Системы распределения нагрузок современных АЭЭС достаточно надежны, однако допущение об их исправности в момент принятия решения об идентификации технического состояния ГА не совсем корректно. Рассмотрим часть области работоспособности  $H$ , расположенную во втором квадранте декартовой системы координат  $N_1, N_2$ , которая не предполагает работу ГА в двигательном режиме. В этом случае переход системы распределения нагрузок в неработоспособное состояние приводит к смещению точки  $S(N_1, N_2)$  за границы области работоспособности вследствие нарушения неравенства (3), что может привести к ошибочному отключению работоспособного ГА в момент его полной разгрузки. В то же время существенным фактором для определения параметров, характеризующих наличие дефектов в системе управления, является то, что область  $H$ , представленная на рис. 1, отображает работу АЭЭС в установившемся режиме. Данное изображение не учитывает резкое изменение нагрузок, соизмеримых с мощностью ГА. В этой связи следует отметить, что время восстановления условия (3) для работоспособной системы управления (СУ) обычно составляет 2–3 с ( $t_2$ ), но не более 5 с по Правилам Российского морского регистра судоходства ( $t_{2\text{ доп}}$ ). Тогда диагностическим признаком перехода системы распределения активных нагрузок АЭЭС в неработоспособное состояние ( $\bar{L}_2$ ) можно считать время, в течение которого условие (3) не выполняется, т. е. условие перехода СУ в неработоспособное состояние можно записать следующим образом:

$$\bar{L}_2 \rightarrow t_2 > t_{2\text{ доп}}. \quad (4)$$

Однако в случае отказа первичного двигателя ГА его нагрузка начинает уменьшаться, а нагрузка оставшегося в работоспособном состоянии агрегата — расти. При этом условие (3) также нарушается и поэтому оно не может служить диагностическим признаком для идентификации причины дефекта. С другой стороны, неисправности, возникающие в ГА, разнообразны и имеют различные признаки, контроль которых часто вызывает трудности его технической реализации и имеет высокую стоимость. В данном случае универсальным параметром, характерным для любого отказа, можно считать время, в частности интервал времени от момента невыполнения условия (3) до момента полной разгрузки неработоспособного агрегата и появления обратной мощности ( $t_1$ ). Эта величина зависит от причины возникновения дефекта и условий функционирования АЭЭС. Так, в случае прекращения подачи воздуха в дизель он глохнет и его генератор переходит в двигательный режим работы в течение 1 с, а в случае отказа топливной системы обратная мощность может появиться как через 2 с, так и через 20 с. Последнее обстоятельство определяется количеством оставшегося топлива в системе, величина которого зависит от типа и количества топливных фильтров, диаметра трубопроводов, места дефекта, а также от величины нагрузки. При этом можно выбрать такое значение времени  $t_1$ , которое будет максимальным для данной АЭЭС ( $t_{1\text{ max}}$ ), например, время, равное 20 с. В этом случае условие идентификации неработоспособного состояния СУ можно записать в виде

$$\bar{L}_2 \rightarrow t_2 > t_{1\text{ max}}. \quad (5)$$

Система управления неработоспособна, если время, в течение которого не выполняется условие (3), превышает максимальное значение от момента его невыполнения до момента полной

разгрузки неработоспособного агрегата и появления обратной мощности, принятого для данной АЭЭС. К сожалению, для любой автономной электроэнергетической системы выполняется условие  $t_{2\text{доп}} < t_{1\text{max}}$ . Поэтому утверждение, обратное условию (5), в общем случае неверно. Однако работоспособный ГА переходит в двигательный режим достаточно редко и всего на несколько секунд, поэтому вероятность наступления этого события невелика. Еще меньшая вероятность выхода из строя системы распределения нагрузок АЭЭС и ничтожно мала величина вероятности того, что это событие произойдет в течение периода времени  $t_{1\text{max}}$  или в период действия работоспособного агрегата с обратной мощностью и этой величиной на практике можно пренебречь. Тогда в рамках настоящего исследования можно считать, что СУ АЭЭС работоспособна при невыполнении неравенства (3) в течение интервала времени  $t_{1\text{max}}$ . В этой связи условие работоспособности системы управления можно записать следующим образом:

$$L_2 \rightarrow t_2 \leq t_{1\text{max}}. \quad (6)$$

Тогда идентификация неработоспособного состояния второго ГА в момент перехода его в двигательный режим, с учетом выражения (6), может быть представлена следующим образом:

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}). \quad (7)$$

Аналогично для первого ГА:

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}), \quad (8)$$

где  $N_1^{(N_2=0)}$  — величина мощности, развиваемая первым ГА в момент полной разгрузки второго ГА;  
 $N_2^{(N_1=0)}$  — величина мощности, развиваемая вторым ГА в момент полной разгрузки первого ГА.

Выражения (7) и (8) предназначены для выявления вышедшего из строя ГА в ситуации, когда агрегаты работают параллельно и процессы, связанные с синхронизацией, уже закончились. В этой связи время включения генератора в параллель с сетью необходимо исключить из процесса диагностирования. Данное требование обусловлено тем, что при подключении агрегата к сети с частотой, несколько меньшей, чем частота АЭЭС, этот ГА кратковременно переходит в двигательный режим работы. По мере втягивания в синхронизм потребляемая им энергия уменьшается и в момент, когда она станет равна нулю, согласно условиям (7) и (8), возможно ошибочное отключение синхронизируемого генератора. С другой стороны, при подключении ГА с более высокой частотой, чем частота АЭЭС, этот агрегат в условиях низкой загрузки может принять всю нагрузку и перевести работающую машину в двигательный режим работы. При таких условиях может произойти ошибочное отключение уже работающего и работоспособного агрегата. В этой связи следует обозначить событие, определяющее режим работы АЭЭС с момента замыкания автоматического выключателя синхронизируемого генератора до момента принятия им нагрузки в соответствии с неравенством (3), как  $x_1$ . Тогда условие отключения второго ГА с целью предотвращения режима его работы с обратной мощностью запишется в виде

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (9)$$

Для первого ГА условие отключения с целью предотвращения его работы с обратной мощностью можно представить в следующем виде:

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (10)$$

Таким образом, ГА идентифицируют как неработоспособный и отключают от сети, если в момент его полной разгрузки мощность, развиваемая другим агрегатом, работающим параллельно, превышает допустимое значение. При этом идентификация неработоспособного состояния ГА и его отключение блокируются, если время, в течение которого осуществляется параллельная работа генераторов с недопустимой величиной отклонения нагрузок, превышает максимальное время разгрузки ГА или происходит включение генератора на параллельную работу.

В статье [19] из процесса диагностирования исключались режим рекуперативного торможения и скачкообразного уменьшения нагрузки параллельно работающих машин. Действительно, функционирование АЭЭС в этих режимах может привести к переходу одного из ГА в двигательный режим работы. Однако современные первичные двигатели, как правило, оборудованы качественными регуляторами топлива, и снижение общей нагрузки сети приводит к пропорциональному уменьшению загрузки каждого из работающих агрегатов, поэтому для работоспособных генераторов условия (9) и (10) не выполняются. В то же время для устаревших конструкций и недорогих маломощных агрегатов, оснащенных примитивными топливными регуляторами, идентификация неработоспособного состояния ГА должна осуществляться с блокировкой и в этих режимах, но данное условие не является общим для всех типов машин. При этом стоимость такого решения может быть достаточно высокой, так как, например, на судах даже среднего размера длина кабелей, передающих сигналы от необходимых для контроля указанных режимов датчиков, может составлять несколько сотен метров. Поэтому наиболее простым решением в данном случае представляется увеличение значения  $N_{i\text{доп}}$  выше значения  $\Delta N_{\text{доп}}$ . Причем, учитывая высокую точность распределения нагрузок, обеспечиваемую современными СУ, это увеличение может быть кратным, т. е.  $N_{i\text{доп}} = k\Delta N_{\text{доп}}$ , где  $i$  — номер ГА, а  $k$  — коэффициент пропорциональности, выбираемый таким образом, чтобы нивелировать погрешность, возникающую при работе топливных регуляторов первичных двигателей в динамических режимах.

Для выбора коэффициента пропорциональности  $k$  можно предложить следующую методику. СУ современных АЭЭС обеспечивают автоматическое отключение одного из работающих генераторов, если нагрузка окажется слишком низкой. Для режима параллельной работы двух ГА эта величина обычно составляет 30 % от номинальной мощности одной из работающих машин. Тогда, в случае неисправности и полной разгрузки вышедшего из строя агрегата, работоспособный ГА будет развивать мощность, соответствующую 60 % от ее номинальной величины. Именно это значение параметра и следует взять как предельно допустимое и исходя из этого определить коэффициент  $k$ . В данном случае он будет равен 8,57. Трудно назвать регуляторами устройства, работающие с погрешностью, превышающей 85 % от заданной величины. При этом, исключив влияние возможной неточности в работе топливной аппаратуры первичного двигателя, в предлагаемом решении неизбежно появление ошибки второго рода при диагностировании в случае нагрузки в сети менее 30 % от номинальной. Учитывая этот фактор, предлагается использовать аппаратуру, реализующую данный подход, одновременно с реле обратной мощности. В данном случае достигается главная цель проведенных исследований: разработан подход, в рамках которого при переходе ГА в двигательный режим гарантированно исключается перегрузка сети обратной мощностью и осуществляется своевременное, без выдержки времени, отключение агрегата в наиболее тяжелом, нагруженном состоянии. При этом необходимость в блокировке отключения ГА, осуществляемой в процессе включения одного из генераторов на параллельную работу, сохраняется, так как дополнительный агрегат обычно запускают, когда нагрузка работающих составляет 80–90 % от номинальной нагрузки АЭЭС.

Своевременная идентификация неработоспособного состояния ГА позволяет осуществить предупредительную разгрузку сети, например, с помощью использования способа, изложенного в работе [21], согласно которому уменьшают нагрузку параллельно работающих генераторов до отключения неработоспособного агрегата. Реле обратной мощности при таком использовании обеспечивает защиту неработоспособного агрегата лишь в редких случаях, когда генераторы работают параллельно с низкой нагрузкой. Такой режим функционирования АЭЭС неэффективен и весьма непродолжителен. При этом выражения для определения неработоспособного состояния второго и первого ГА примут вид:

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > k\Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1; \quad (11)$$

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > k\Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (12)$$

### Результаты (Results)

Полученные выражения (11), (12) создают предпосылки для разработки технических средств, обеспечивающих идентификацию и отключение неработоспособного агрегата до его перехода в двигательный режим. На рис. 2 приведена блок-схема одного из возможных алгоритмов, практическая реализация которых обеспечивает предупредительное управление АЭЭС до появления обратной мощности.

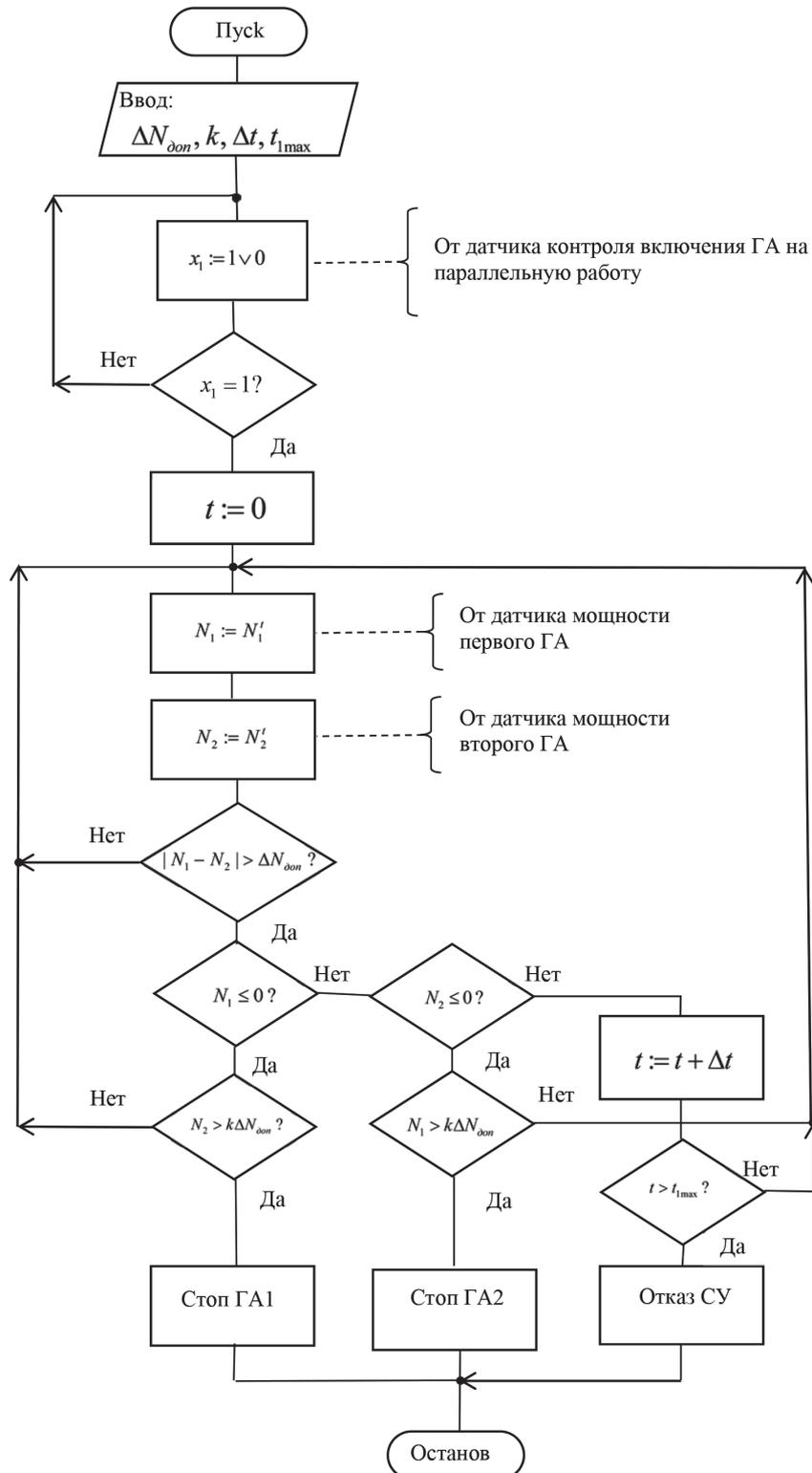


Рис. 2. Блок-схема алгоритма превентивной защиты АЭЭС от обратной мощности

Согласно предложенному варианту решения поставленной задачи, в устройство вводятся значения постоянных величин:

- разности нагрузок АЭЭС ( $\Delta N_{\text{доп}}$ );
- выбранного коэффициента пропорциональности  $k$ ;
- максимально возможного для данной АЭЭС интервала времени от момента невыполнения условия (3) до момента полной разгрузки неработоспособного агрегата ( $t_{1\text{max}}$ );
- шага измерения интервала времени ( $\Delta t$ ).

На первом этапе осуществляют проверку отсутствия процесса включения одного из ГА на параллельную работу ( $x_1$ ). Сигнал об этом в виде логической единицы поступает с выхода соответствующего датчика. Если это условие не выполняется, то процесс определения технического состояния ГА блокируется до момента его выполнения. На основании информации, поступающей с выходов датчиков мощности первого и второго ГА, производят контроль выполнения неравенства (3) и в случае его нарушения проверяют наличие режима полной разгрузки одного из ГА. Если при этом оба агрегата работают с нагрузкой, то начинают отсчет времени. В ситуации, при которой момент полной разгрузки генераторов не наступил в течение времени  $t_{1\text{max}}$ , формируют сигнал «Отказ СУ» и в случае перехода ГА в двигательный режим работы блокируют его отключение. Если разгрузка одной из машин произошла в течение допустимого периода времени и мощность, развиваемая другим первичным двигателем, оказалась больше значения  $k\Delta N_{\text{доп}}$ , то формируют команду на отключение и выполняют останов разгруженного агрегата. Разработанный алгоритм представляет собой развитие способа, описанного в [20], и обладает более высокой достоверностью диагностирования ГА.

### Обсуждение (Discussion)

Предложенное техническое решение обеспечивает идентификацию неработоспособного состояния ГА в момент полной разгрузки и отключение его от сети накануне перехода в двигательный режим. Данное обстоятельство позволяет избежать перегрузки АЭЭС обратной мощностью. В данном случае указанный подход можно классифицировать как метод предупредительного управления объектом. При этом за рамками настоящей работы остался вопрос перегрузки работоспособного агрегата общей нагрузкой сети. В этой связи следует отметить, что после возникновения отказа, вплоть до момента перехода в двигательный режим, неработоспособный агрегат продолжает снабжать сеть электроэнергией, частично смягчая процесс перевода нагрузки на исправные машины. Поэтому отключение вышедшего из строя ГА наиболее целесообразно производить в момент его полной разгрузки. Однако отключение части потребителей необходимо осуществлять ранее, — до момента перегрузки первичных двигателей. Решение этой задачи требует специального рассмотрения.

### Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение выдержки времени при формировании сигнала на отключение ГА, перешедшего в двигательный режим, может не только способствовать развитию дефекта первичного двигателя, но и привести к исчезновению напряжения в АЭЭС. В ряде случаев это чревато возникновением аварийной ситуации, способной привести к аварии с тяжелыми последствиями.
2. Предложенный оригинальный диагностический признак позволяет идентифицировать неработоспособное состояние перешедшего в двигательный режим работы генератора накануне появления обратной мощности. Применение данного параметра для отключения агрегата, вышедшего из строя, позволяет предотвратить перегрузку сети АЭЭС обратной мощностью и избежать дальнейшего развития дефекта отказавшей машины.
3. Разработанный алгоритм превентивной защиты АЭЭС от обратной мощности обеспечивает практическую реализацию разработанного подхода в рамках предупредительного управления объектом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н.* Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б. Н. Абрамович [и др.] // *Промышленная энергетика*. — 2019. — № 5. — С. 8–16.
2. *Бычков Е. В.* Обеспечение устойчивой работы автономных энергосистем в газовой промышленности / Е. В. Бычков, П. А. Захаров // *Автоматизация и IT в нефтегазовой промышленности*. — 2019. — № 3 (37). — С. 30–40.
3. *Козярук А. Е.* Анализ развития технических средств освоения нефтегазовых месторождений / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев, А. И. Ивановский // *Морской вестник*. — 2017. — № 2 (62). — С. 115–119.
4. *Архипова О. В.* Принципы оптимизации электроснабжения населенных пунктов Крайнего Севера на базе ветродизельных комплексов / О. В. Архипова // *Вестник Югорского государственного университета*. — 2015. — № S2 (37). — С. 204–206.
5. *Бончук И. А.* Обеспечение генерирующего резерва в энергосистеме и на объектах морской индустрии Калининградской области / И. А. Бончук [и др.] // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 4-4 (46). — С. 62–67.
6. *Kim S. H.* Estimation of ship operational efficiency from AIS data using big data technology / S. H. Kim, M. I. Roh, M. J. Oh, S. W. Park, I. I. Kim // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 12. — Pp. 440–454. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.007.
7. *Saushev A. V.* System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation / A. V. Saushev, S. E. Kuznetsov, A. B. Karakayev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2018. — Vol. 194. — Is. 8. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.
8. *Abbasian N.S.* Improving early OSV design robustness by applying ‘Multivariate Big Data Analytics’ on a ship’s life cycle / N. S. Abbasian [et al] // *Journal of Industrial Information Integration*. — 2018. — Vol. 10. — Pp. 29–38. DOI: 10.1016/j.jii.2018.02.002.
9. *Dileep G.* A survey on smart grid technologies and applications / G. Dileep // *Renewable Energy*. — 2020. — Vol. 146. — Pp. 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.
10. *Paul S.* A review of smart technology (Smart Grid) and features / S. Paul, M. S. Rabbany, R. K. Kundu, S. M. R. Zaman // *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*. — IEEE, 2014. — Pp. 200–203.
11. *Al Rammal Z.* Optimal PMU placement for reverse power detection / Z. Al Rammal [et al] // *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.
12. *Mishra R.* Development and implementation of control of stand-alone PMSG-based distributed energy system with variation in input and output parameters / R. Mishra [et al] // *IET Electric Power Applications*. — 2019. — Vol. 13. — Is. 10. — Pp. 1497–1506. DOI: 10.1049/jet-epa.2018.5882.
13. *Булатов Ю. Н.* Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2017. — Т. 21. — № 10 (129). — С. 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.
14. *Yaghoobi H.* Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator / H. Yaghoobi // *IET Electric Power Applications*. — 2018. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 508–517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491.
15. *Samami M.* Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators / M. Samami, M. N. Azary // *IET Electric Power Applications*. — 2019. — Vol. 13. — Is. 12. — Pp. 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.
16. *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.
17. *Портнягин Н. Н.* Исследование виртуальных моделей защиты генератора от обратной мощности в судовой электроэнергетической системе / Н. Н. Портнягин, С. Ю. Труднев // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. — 2011. — № 18. — С. 32–35.
18. *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. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

19. Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

20. Пат. 2686103 Российская Федерация, МПК H02H 3/08, H02H 7/085. Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2018125823; заявл. 12.07.2018; опубл. 24.04.2019, Бюл. № 12. — 9 с.

21. Пат. 2653361 Российская Федерация, МПК H02H 3/46, H02J 3/14. Способ автоматической разгрузки электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2017124539; заявл. 10.07.2017; опубл. 08.05.2018, Бюл. № 13. — 15 с.

## REFERENCES

1. Abramovich, B. N., Yu. A. Sychev, D. A. Ustinov, I.S. Babanova, and V.B. Prokhorova. “Effektivnost’ raspredelennoi energetiki v usloviyakh mineral’no-syr’evogo kompleksa.” *Promyshlennaya energetika* 5 (2019): 8–16.

2. Bychkov, Evgeny Viktorovich, and Petr Alekseevich Zakharov. “Sustainable work autonomous power systems in the gas industry.” *Avtomatizatsiya i IT v neftegazovoi promyshlennosti* 3(37) (2019): 30–40.

3. Kozyaruk, A. E., B. Yu. Vasil’ev, and A. I. Ivanovskii. “Analiz razvitiya tekhnicheskikh sredstv osvoeniya neftegazovykh mestorozhdenii.” *Morskoi vestnik* 2(62) (2017): 115–119.

4. Arkhipova, Olga. “Principles of electricity optimization of far north settlements the on the basis of wind-diesel systems.” *Yugra State University Bulletin* S2(37) (2015): 204–206.

5. Bonchuk, Ilya A., Valeriy F. Beley, Victor M. Minko, and Kryukov I. Nikitovich. “Provision of generating reserve in the power system and marine industry facilities of the Kaliningrad region.” *Marine Intelligent Technologies* 4-4(46) (2019): 62–67.

6. Kim, Seong-Hoon, Myung-II Roh, Min-Jae Oh, Sung-Woo Park, and In-II Kim. “Estimation of ship operational efficiency from AIS data using big data technology.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 12 (2020): 440–454. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.007.

7. Saushev, Aleksandr V., Sergey E. Kuznetsov, and Aleksandr B. Karakayev. “System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation.” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. No. 8. 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.

8. Abbasian, Niki Sadat, Afshin Salajegheh, Henrique Gaspar, and Per Olaf Brett. “Improving early OSV design robustness by applying ‘Multivariate Big Data Analytics’ on a ship’s life cycle.” *Journal of Industrial Information Integration* 10 (2018): 29–38. DOI: 10.1016/j.jii.2018.02.002.

9. Dileep, G. “A survey on smart grid technologies and applications.” *Renewable Energy* 146 (2020): 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.

10. Paul, Shuva, Md Sajed Rabbani, Ripon Kumar Kundu, and Sikdar Mohammad Raihan Zaman. “A review of smart technology (Smart Grid) and its features.” *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*. IEEE, 2014. 200–203.

11. Al Rammal, Zeina, Nivine Abou Daher, Hadi Kanaan, Imad Mougharbel, and Maarouf Saad. “Optimal PMU placement for reverse power flow detection.” *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. IEEE, 2018. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.

12. Mishra, Rupa, Udayan Banerjee, Thotakura N.S.C. Sekhar, and Tapas Kumar Saha. “Development and implementation of control of stand-alone PMSG-based distributed energy system with variation in input and output parameters.” *IET Electric Power Applications* 13.10 (2019): 1497–1506. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5882.

13. Bulatov, Yuri N. “Intelligent control systems for distributed generation plants.” *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.10(129) (2017): 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.

14. Yaghibi, Hamid. “Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator.” *IET Electric Power Applications* 12.4 (2018): 508–517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491.

15. Samami, Mehdi, and Milad Niaz Azari. “Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators.” *IET Electric Power Applications* 13.12 (2019): 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.

16. 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.

17. Portnyagin, Nikolaj N., and Sergej U. Trudnev. "Research of virtual models of protection of the generator from return capacity in a ship electropower system." *Vestnik Kamchatskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* 18 (2011): 32–35.

18. 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 admirala S.O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

19. Shirokov, Nikolaj V. "Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

20. Shirokov, N. V. RU 2 686 103 C1, IPC H02H 3/08, H02H 7/085. Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata. Russian Federation, assignee. Publ. 24 Apr. 2019.

21. Shirokov, N. V. RU 2 653 361 C1, IPC H02H 3/46, H02J 3/14. Sposob avtomaticheskoi razgruzki elektroenergeticheskoi sistemy s parallel'no rabotayushchimi generatornymi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Aug. 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](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto: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](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 4 августа 2020 г.  
Received: August 4, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811

## SCHEMATIC SOLUTIONS FOR SHIP UNIFIED ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON VALVE GENERATORS AND STATIC ELECTRIC POWER SOURCES

**A. V. Grigoryev<sup>1,2</sup>, R. R. Zaynullin<sup>3</sup>, S. M. Malyshev<sup>2,3</sup>**

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

<sup>2</sup> — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

*The generator sets based on electric machines that are usually used as the main power sources on sea-going ships, operating at a constant rotation speed: diesel generators, gas turbine generators, steam turbine generators, are discussed in the paper. It is noted that in the past ten years there has been a need to develop and create new highly efficient sources of electricity that can be used on ships as part of unified electric power systems. These sources include static electric power sources of a new generation: accumulator batteries on a new element base; supercapacitors; fuel cells; solar batteries. It is emphasized that the introduction of new types of power sources leads to necessity to switch to new principles of building unified ship power systems. For this, it is necessary to develop standard circuit solutions taking into account the peculiarities of physical processes in static sources and the requirements for coordinating the parameters of electric power with the ship network. There is a need to formulate and introduce the relevant terms and definitions into the ship regulatory and technical documents. The structural and functional diagrams of the ship power sources types: traditional generator sets, valve generator sets, valve static electric power sources, are shown in the paper. Their principles of operation, features of physical processes, advantages and disadvantages are considered. General typical schematic solutions for unified electric power systems based on valve static electric power sources and valve generator sets are shown. Valve static sources can be used in unified electric power systems with AC and DC distribution both as the main and as a backup power source. It is concluded that the greatest technical and operational effects from the use of valve static sources can be achieved in unified electric power systems with DC power distribution. New terms and definitions have been proposed for inclusion in ship regulatory and technical documents.*

*Keywords: valve generator, valve generator set, valve static electric power source, accumulator battery, charge, supercapacitor, solar battery, fuel cell, ship electric power system, electric propulsion plant.*

**For citation:**

Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.4 (2020): 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

**УДК 629.123:621.31**

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СУДОВЫХ ЕДИНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**А. В. Григорьев<sup>1,2</sup>, Р. Р. Зайнуллин<sup>3</sup>, С. М. Малышев<sup>2,3</sup>**

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

<sup>2</sup> — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье рассмотрены традиционно используемые в качестве основных источников электроэнергии на морских судах генераторные агрегаты на базе электрических машин, работающие с постоянной частотой вращения: дизель-генераторы, газотурбогенераторы, паротурбогенераторы. Отмечается,*

что в последние десять лет возросла потребность разработки и создания новых высокоэкономичных источников электроэнергии, которые можно использовать на судах в составе единых электроэнергетических систем. К таким источникам можно отнести статические источники электроэнергии нового поколения: аккумуляторные батареи на новой элементной базе, суперконденсаторы, топливные элементы, солнечные батареи. Подчеркивается, что в связи с внедрением новых типов источников электроэнергии нужен переход на новые принципы построения судовых единых электроэнергетических систем. Для этого необходимо разработать типовые схемотехнические решения с учетом особенностей физических процессов в статических источниках и требований по согласованию параметров электроэнергии с судовой сетью. Возникает необходимость формулирования и введения в судовые нормативно-технические документы соответствующих терминов и определений. Проанализированы структурные и функциональные схемы различных типов судовых источников электроэнергии: традиционных генераторных агрегатов, вентильных генераторных агрегатов, вентильных статических источников. Рассмотрены их принципы действия, особенности физических процессов, преимущества и недостатки. Показаны типовые схемотехнические решения построения единых электроэнергетических систем на базе вентильных статических источников электроэнергии и вентильных генераторных агрегатов. Вентильные статические источники могут применяться в единых электроэнергетических системах с распределением на переменном и постоянном токе как в качестве основного, так и в качестве резервного источника электроэнергии. Сделан вывод о том, что наибольший технико-эксплуатационный эффект от применения вентильных статических источников может быть достигнут в единых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе. Предложены новые термины и определения для включения их в судовые нормативно-технические документы.

*Ключевые слова:* вентильный генератор, вентильный генераторный агрегат, вентильный статический источник электроэнергии, аккумуляторная батарея, заряд, суперконденсатор, солнечная батарея, топливный элемент, судовая электроэнергетическая система, система электродвижения.

**Для цитирования:**

Григорьев А. В. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

## Введение (Introduction)

Традиционно в качестве основных источников электроэнергии на морских судах используются генераторные агрегаты, работающие с постоянной частотой вращения. Наибольшее распространение получили дизель-генераторы (ДГ), на определенных типах транспортных и специальных судов находят применение газотурбогенераторы (ГТГ) и паротурбогенераторы (ПТГ) [1].

На современных судах получают применение вентильные генераторы, работающие с переменной частотой вращения и использующие для стабилизации параметров электроэнергии в судовой сети полупроводниковые преобразователи (ПП). Следует отметить, что статические источники электроэнергии (СИЭ), такие как щелочные и кислотные аккумуляторные батареи (АБ), находят ограниченное применение ввиду их относительно низких технико-эксплуатационных характеристик: малой удельной емкости, низких токов заряда и разряда, относительно малого числа циклов заряда-разряда, ограничивающих область их применения электростартерным запуском тепловых двигателей и аварийным электроснабжением судовых приемников. Повышение экологических требований и рост цен на топливо обуславливают необходимость и целесообразность поиска для судов и морских объектов других видов источников электроэнергии, которые можно использовать в качестве основных, в том числе для питания систем электродвижения (СЭД).

Современные достижения силовой электроники и появление новых электротехнических материалов с высокими удельными характеристиками в последнее десятилетие делают перспективным применение на современных судах СИЭ нового поколения:

- АБ на новой элементной базе [2];
- суперконденсаторов (СК) [3];
- топливных элементов (ТЭ) [4];
- солнечных батарей (СБ) [5].

Технико-эксплуатационные показатели СИЭ нового поколения [6] позволяют использовать их на судах с едиными электроэнергетическими системами (ЕЭЭС) и системами электродвижения (СЭД) [7] в качестве основных и резервных источников.

Для определения принципов построения ЕЭЭС на базе СИЭ необходимо:

- разработать типовые схемотехнические решения с учетом особенностей физических процессов и требований по согласованию параметров электроэнергии с судовой сетью;
- дополнить судовые нормативно-технические документы

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Традиционные судовые генераторные агрегаты строятся на базе тепловых двигателей и вращающихся с постоянной частотой электрических машин. Структурная схема традиционного дизель-генератора приведена на рис. 1. Приводной двигатель преобразует тепловую энергию в механическую и с постоянной частотой вращения приводит в движение генератор, в качестве которого в большинстве случаев применяют синхронный генератор с электромагнитным возбуждением, вырабатывающий электроэнергию с постоянными значениями напряжения и частоты.

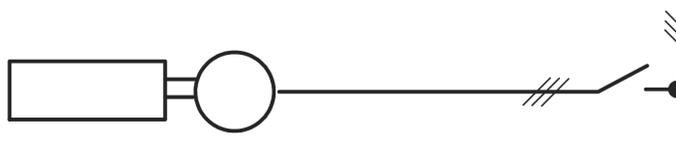


Рис. 1. Структурная схема традиционного дизель-генератора

В традиционном генераторном агрегате тепловой двигатель преобразует химическую энергию органического топлива в тепловую и затем в механическую. Электрическая машина преобразует механическую энергию в электрическую. Стабилизацию выходных параметров электроэнергии выполняют следующие системы: система автоматического регулирования частоты (в тепловом двигателе) и система автоматического регулирования напряжения (в электрической машине). Функциональная схема традиционного генераторного агрегата представлена на рис. 2. Основным недостатком традиционных генераторных агрегатов является существенное снижение КПД приводного двигателя при работе на долевой нагрузке.



Рис. 2. Функциональная схема традиционного генераторного агрегата

К новому поколению источников относятся вентильные генераторные агрегаты (ВГА), которые изменяют частоту вращения при изменении нагрузки, благодаря чему существенно снижается удельный расход горюче-смазочных материалов. Структурная схема вентильного дизель-генератора приведена на рис. 3.

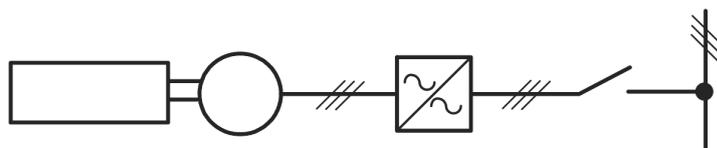


Рис. 3. Структурная схема вентильного дизель-генератора

Приводной двигатель работает с переменной частотой вращения и приводит в движение генератор, в качестве которого может применяться синхронный генератор с электромагнитным

возбуждением или с возбуждением на постоянных магнитах, асинхронный или индукторный генератор. Генератор вырабатывает электроэнергию с переменными значениями напряжения и частоты, которая подводится к ПП, преобразующему электроэнергию с переменными значениями в электроэнергию со стабилизированными (номинальными) параметрами.

В вентильном генераторном агрегате задачу стабилизации выходных параметров электроэнергии выполняет ПП. Поэтому тепловой двигатель может работать с переменной частотой вращения, а электрическая машина может не иметь системы регулирования напряжения (возбуждение от постоянных магнитов). Функциональная схема вентильного генераторного агрегата приведена на рис. 4.

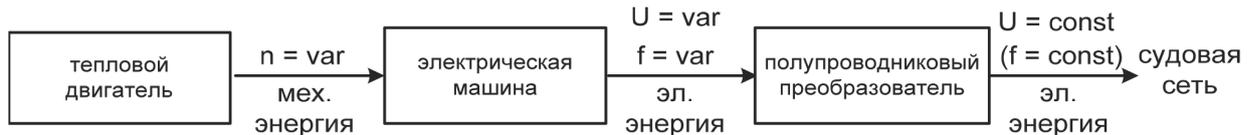


Рис. 4. Функциональная схема вентильного генераторного агрегата

Недостатком как традиционных, так и вентильных генераторных агрегатов является наличие теплового приводного двигателя и невозможность накопления электрической энергии. Решение проблемы ее накопления связано с применением статических источников электроэнергии, в которых отсутствует тепловой приводной двигатель. Структурная схема вентильного статического источника электроэнергии (ВСИЭ) приведена на рис. 5.

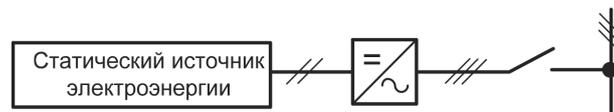


Рис. 5. Структурная схема вентильного статического источника электроэнергии

Особенностью СИЭ является то, что он вырабатывает электроэнергию непосредственно из химической или световой. Для стабилизации выходных параметров электроэнергии применяется полупроводниковый преобразователь (инвертор, преобразователь постоянного тока). Инвертор преобразует из электроэнергии постоянного тока электроэнергию переменного или постоянного тока с номинальными параметрами. Функциональная схема ВСИЭ приведена на рис. 6.



Рис. 6. Функциональная схема вентильного статического источника электроэнергии

В случае применения СИЭ, способного запасать электрическую энергию, в качестве ПП используется обратимый преобразователь, осуществляющий заряд АБ или конденсатора. Обобщенная структурная схема ВСИЭ приведена на рис. 7.

В состав ВСИЭ входят:

1. Статический источник электроэнергии (СИЭ).
2. Полупроводниковый преобразователь (зарядно-разрядное устройство).
3. Согласующие устройства (фильтры).
4. Система автоматического управления, защиты, контроля и сигнализации.
5. Распределительный щит.

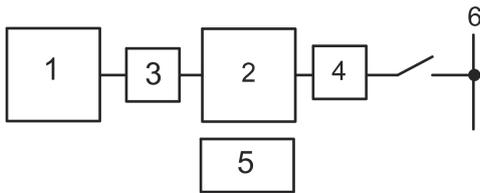


Рис. 7. Обобщенная структурная схема вентильного статического источника электроэнергии

- 1 — статический источник электроэнергии;  
 2 — полупроводниковый преобразователь (зарядно-разрядное устройство);  
 3 — согласующее устройство (фильтр);  
 4 — согласующее устройство (фильтр);  
 5 — система автоматического управления, защиты, контроля и сигнализации;  
 6 — распределительный щит

СИЭ генерирующего типа преобразует химическую или световую энергию в электрическую, СИЭ накопительного типа запасает и вырабатывает электрическую энергию. Полупроводниковый преобразователь (зарядно-разрядное устройство) содержит силовые элементы, реализующие функции стабилизации и регулирования выходных параметров электрической энергии и режимов разряда / заряда (для СИЭ накопительного типа). Согласующие устройства (*LC*, *LCL*-фильтры) обеспечивают повышение качества электроэнергии и реализацию режимов разряда / заряда (для СИЭ накопительного типа).

Система автоматического управления, защиты, контроля и сигнализации выполняет следующие функции:

- регулирование (стабилизация) выходных параметров электроэнергии;
- измерение электрических (напряжение, ток, частота, мощность и др.) и неэлектрических (температура, давление, расход и др.) величин;

– защита силового оборудования от перегрузок, коротких замыканий, перегрева, от превышения давления и т. д.;

– нормальный и ускоренный заряд с учетом особенностей физических процессов, характеристик и свойств статического источника электроэнергии (для СИЭ накопительного типа);

– контроль и аварийно-предупредительная сигнализация при достижении контролируемые параметрами установленных предельных значений и об изменении нормальных режимов работы устройств.

В настоящее время в судовых нормативно-технических документах используются следующие термины и определения, касающиеся источников электроэнергии:

*Основной источник электрической энергии* — источник электрической энергии, предназначенный для питания всех электрических устройств и систем, необходимых для поддержания нормального эксплуатационного состояния судна и нормальных условий обитаемости на нем, не прибегая при этом к использованию аварийного источника электрической энергии.

*Аварийный источник электрической энергии* — источник электрической энергии, предназначенный для питания необходимых судовых потребителей при исчезновении напряжения на главном распределительном щите.

*Аварийный переходный источник электрической энергии* — источник электрической энергии, предназначенный для питания необходимых потребителей с момента исчезновения напряжения на шинах ГРЩ до момента включения на шины АРЩ аварийного генератора.

*Источник бесперебойного питания (ИБП)* — комбинация преобразователей (выпрямитель-инвертор), переключателей (байпас) и источника накопленной энергии в виде аккумуляторной батареи для поддержания напряжения на нагрузке в случае неисправности в сети питания.

*Вентильный генератор* — комплекс оборудования, состоящий из вращающейся электрической машины, полупроводникового преобразователя и системы управления, предназначенный для производства электроэнергии в составе судовой электроэнергетической системы.

*Вентильный генераторный агрегат (ВГА)* — агрегат, состоящий из вентильного генератора и первичного (приводного) теплового двигателя.

Поскольку в судовых нормативно-технических документах отсутствуют термины и определения, касающиеся статических источников электроэнергии, возникает необходимость их введения.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Особенности ВСИЭ обуславливают необходимость разработки новых принципов построения судовых электроэнергетических систем. С этой целью рассмотрим типовые схмотехнические решения построения ЕЭЭС на базе ВСИЭ и вентильных генераторных агрегатов. ВСИЭ является основой для построения судовых единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) с распределением электроэнергии на постоянном токе (РПТ). Типовая структурная схема ЕЭЭС с РПТ и СИЭ в качестве основного источника электроэнергии приведена на рис. 8.

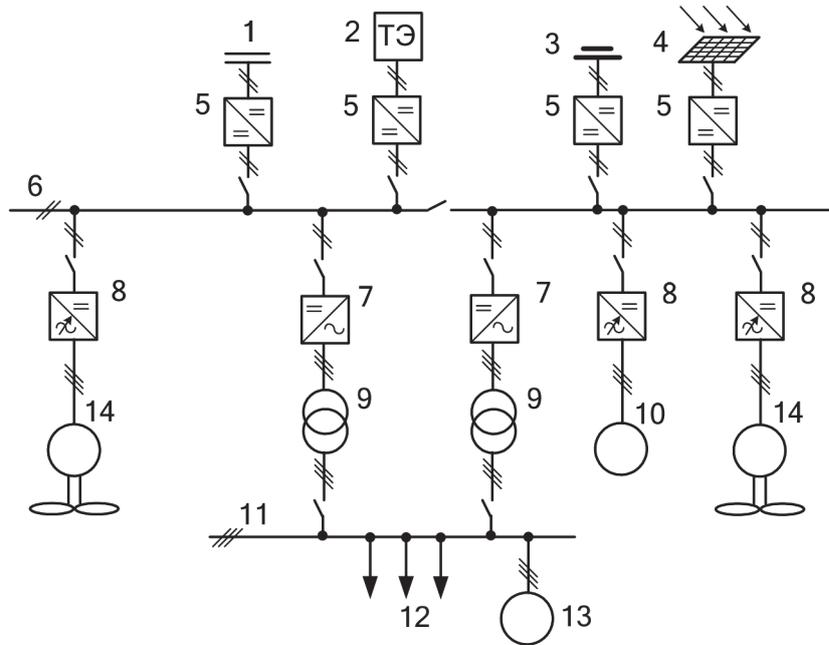


Рис. 8. Структурная схема ЕЭЭС с распределением электроэнергии

на постоянном токе с СИЭ в качестве основного источника электроэнергии:

- 1 — суперконденсатор; 2 — топливный элемент; 3 — аккумуляторная батарея;  
4 — солнечная батарея; 5 — преобразователь постоянного напряжения; 6 — ГРЩ постоянного тока;  
7 — автономный инвертор со стабилизированными параметрами;  
8 — автономный инвертор с регулируемыми параметрами; 9 — трансформатор;  
10 — частотно-регулируемый электродвигатель; 11 — ГРЩ переменного тока;  
12 — общесудовые потребители; 13 — нерегулируемый электродвигатель; 14 — ГЭД

СИЭ подключены к ГРЩ с помощью полупроводниковых преобразователей постоянного тока (*DC/DC* типа). Часть общесудовых потребителей, включая мощный электропривод переменного тока, получают питание от ГРЩ переменного тока через инверторы или *DC/DC* преобразователи. От ГРЩ постоянного тока посредством полупроводниковых инверторов напряжения и трансформаторов напряжения получает питание ГРЩ переменного тока, к которому подключены общесудовые приемники переменного тока. Движение судна обеспечивают ГЭД. АБ, ТЭ и СБ имеют ограничения по величине тока разряда. Для обеспечения пусковых токов электродвигателей, запускаемых прямым пуском, могут применяться СК. Среди достоинств рассматриваемого варианта необходимо отметить следующие:

- отсутствие вредных выбросов в атмосферу;
- минимальный шум;
- минимальные эксплуатационные затраты;
- минимальные массогабаритные характеристики;
- сокращение количества оборудования, необходимого для работы СИЭ (в том числе отсутствие синусных фильтров на выходе СИЭ);
- отсутствие необходимости согласования частоты напряжения.

Кроме того, данному схмотехническому решению присущи все достоинства СЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе:

- возможность более рационального размещения оборудования на судне за счет конструктивного разделения ПЧ на полупроводниковые модули (выпрямитель – инвертор);
- отсутствие необходимости применения пропульсивных трансформаторов для питания СЭД;
- снижение негативного воздействия на электрическую сеть от полупроводниковых выпрямителей и инверторов;
- отсутствие необходимости распределения реактивной мощности;
- снижение массы и габаритов оборудования ЕЭЭС с СЭД.

Среди недостатков можно отметить высокую стоимость оборудования ЕЭЭС с СЭД.

Типовая структурная схема ЕЭЭС с распределением электроэнергии на переменном токе с СИЭ в качестве основного источника электроэнергии приведена на рис. 9. В отличие от предыдущего схмотехнического решения ЕЭЭС распределение электроэнергии производится на переменном токе.

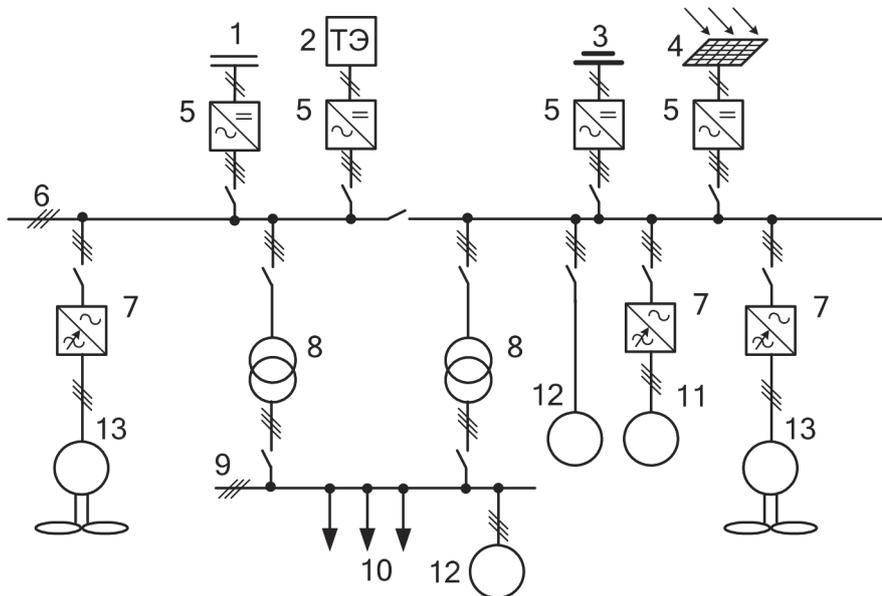


Рис. 9. Структурная схема ЕЭЭС с распределением электроэнергии на переменном токе с СИЭ в качестве основного источника электроэнергии:  
 1 — суперконденсатор; 2 — топливный элемент; 3 — аккумуляторная батарея;  
 4 — солнечная батарея; 5 — инвертор; 6 — ГРЩ переменного тока;  
 7 — ППЧ; 8 — трансформатор; 9 — ГРЩ переменного тока; 10 — общесудовые потребители;  
 11 — частотно-регулируемый электродвигатель; 12 — нерегулируемый электродвигатель; 13 — ГЭД

Представленная структурная схема ЕЭЭС с распределением электроэнергии на переменном токе с СИЭ в качестве основного источника электроэнергии может быть реализована при модернизации находящихся в эксплуатации судов путем замены дизель-генераторов и турбогенераторов на СИЭ, которые являются основными источниками электроэнергии и подключаются к ГРЩ переменного тока с помощью инверторов. От ГРЩ переменного тока получают питание общесудовые приемники переменного тока. ГРЩ 220 В и потребители 220 В получают питание через понижающие трансформаторы. Среди недостатков данного схмотехнического решения следует отметить:

- необходимость преобразования постоянного тока СИЭ в переменный;
- необходимость применения синусных фильтров на выходе инверторов для получения электроэнергии переменного требуемого качества;
- необходимость наличия гальванической развязки;
- увеличенные массогабаритные характеристики ЕЭЭС.

На рис. 10 приведена типовая структурная схема ЕЭЭС с СЭД с распределением электроэнергии на постоянном токе с СИЭ в качестве резервного источника электроэнергии.

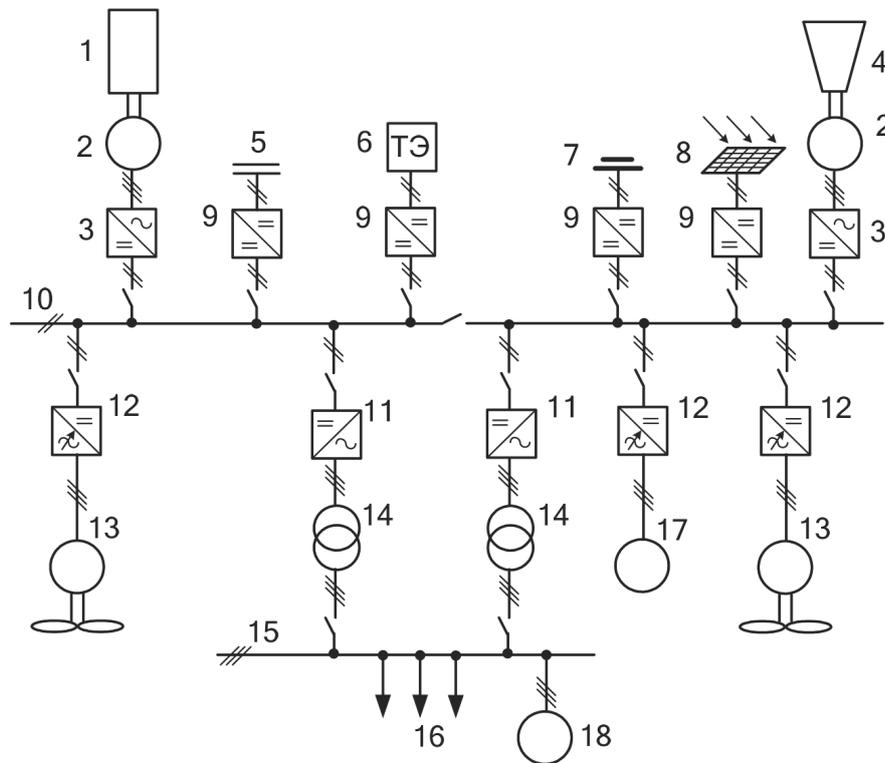


Рис. 10. Структурная схема ЕЭЭС с ГЭУ с распределением электроэнергии на постоянном токе с СИЭ в качестве резервных источников электроэнергии:

- 1 — дизель; 2 — генератор; 3 — выпрямитель; 4 — турбина;  
5 — суперконденсатор; 6 — топливный элемент; 7 — аккумуляторная батарея;  
8 — солнечная батарея; 9 — преобразователь постоянного напряжения;  
10 — ГРЩ постоянного тока; 11 — автономный инвертор со стабилизированными параметрами;  
12 — автономный инвертор с регулируемыми параметрами;  
13 — ГЭД; 14 — трансформатор; 15 — РЩ переменного тока;  
16 — общесудовые потребители; 17 — частотно-регулируемый электродвигатель;  
18 — нерегулируемый электродвигатель

Представленное схмотехническое решение аналогично схеме, представленной на рис. 8. В отличие от схемы, представленной на рис. 8, СИЭ выступает в качестве резервного источника электроэнергии. В качестве основных применяются ВГА, которые подключены к ГРЩ постоянного тока с помощью выпрямителей. На ГРЩ постоянного тока отсутствуют электродвигатели, запускаемые прямым пуском. Инверторы, установленные перед ГРЩ переменного тока, должны быть рассчитаны на прямой пуск электродвигателей на ГРЩ переменного тока. На рис. 11 приведена типовая структурная схема ЕЭЭС с СЭД с распределением электроэнергии на переменном токе с СИЭ в качестве резервного источника электроэнергии.

Схмотехническое решение, представленное на рис. 11, является аналогичным схеме, приведенной на рис. 9, но в отличие состоит в том, что здесь СИЭ выступают в качестве резервного источника электроэнергии. С учетом рассмотренных схмотехнических решений предлагается дополнительно ввести в судовые нормативно-технические документы соответствующие термины и определения, касающиеся статических источников электроэнергии:

*Дополнительный (резервный) источник электроэнергии* — судовой источник электроэнергии, предназначенный для обеспечения резерва мощности судовой электроэнергетической системы.

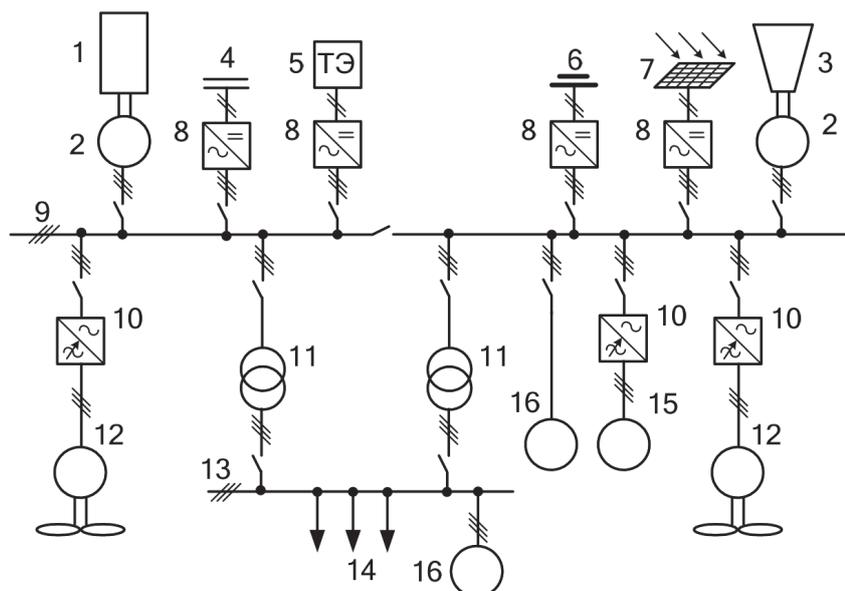


Рис. 11. Структурная схема ЕЭЭС с СЭД с распределением электроэнергии на переменном токе с СИЭ в качестве резервного источника электроэнергии  
 1 — дизель; 2 — генератор; 3 — турбина; 4 — суперконденсатор; 5 — топливный элемент;  
 6 — аккумуляторная батарея; 7 — солнечная батарея; 8 — инвертор; 9 — ГРЩ переменного тока;  
 10 — ППЧ; 11 — трансформатор; 12 — ГЭД; 13 — РЩ переменного тока;  
 14 — общесудовые потребители; 15 — частотно-регулируемый электродвигатель;  
 16 — нерегулируемый электродвигатель

*Статический источник электроэнергии* — это источник электроэнергии, не имеющий подвижных частей, предназначенный для производства или накопления электроэнергии в составе судовой электроэнергетической системы и используемый в качестве основного, аварийного, аварийного переходного или резервного источника.

*Вентильный статический источник электроэнергии* — это статический источник электроэнергии, имеющий в своем составе полупроводниковый преобразователь для реализации своих функций и регулирования (поддержания) выходных параметров электроэнергии.

### Выводы (Summary)

1. Выполнен сравнительный анализ различных типов судовых источников электроэнергии. Показано, что недостатком как традиционных, так и вентильных генераторных агрегатов является наличие теплового приводного двигателя и невозможность накопления электрической энергии. Статические источники электроэнергии лишены указанных недостатков.

2. С учетом особенностей физических процессов СИЭ могут являться источниками электроэнергии только постоянного рода тока. Для обеспечения работы в составе ЕЭЭС и согласования уровня напряжения и рода тока с судовой сетью СИЭ должны дополняться комплектом электрооборудования, в том числе полупроводниковым преобразователем (зарядно-разрядное устройство), согласующими устройствами (фильтрами), системой автоматического управления, защиты, контроля и сигнализации, а также электрораспределительными устройствами.

3. Предложены термины и определения «дополнительного (резервного) источника электроэнергии», «статического источника электроэнергии», «вентильного статического источника электроэнергии».

4. Разработаны структурные схемы ЕЭЭС на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии. Анализ показал, что ВСИЭ могут применяться в ЕЭЭС с распределением на переменном и постоянном токе как в качестве основного, так и в качестве резервного источника электроэнергии [8]–[10].

5. Наибольший технико-эксплуатационный [11] эффект от применения ВСИЭ может быть достигнут в ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе, так как в этом случае отсутствует необходимость согласования уровня частоты тока и сдвига фаз, упрощается процесс синхронизации при параллельной работе с другими источниками и сокращается количество оборудования, необходимого для работы СИЭ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устинова З. С. Перспективы создания гражданских судов с атомными энергетическими установками / З. С. Устинова, С. А. Устинов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 2 (392). — С. 89–96. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-89-96.

2. Фатыхов Р. Р. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях / Р. Р. Фатыхов, С. М. Хантимеров, Н. М. Сулейманов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2017. — № 4 (36). — С. 45–53.

3. Деньщиков К. К. Суперконденсаторы в современной энергетике / К. К. Деньщиков, А. З. Жук, А. Ф. Герасимов, М. В. Голиков // Известия российской академии наук. Энергетика. — 2011. — № 5. — С. 125–131.

4. Chen Y. Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties / Y. Chen, M. Melaina // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2019. — Vol. 74. — Pp. 234–244. DOI: 10.1016/j.trd.2019.08.002.

5. Meskani A. Modeling and simulation of an intelligent hybrid energy source based on solar energy and battery / A. Meskani, A. Haddi // Energy Procedia. — 2019. — Vol. 162. — Pp. 97–106. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.011.

6. Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

7. 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.

8. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 337–340.

9. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // Energy Procedia. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.

10. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.

11. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации / С. Е. Кузнецов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 584 с.

## REFERENCES

1. Ustinova, Zabava S., and Sergei A. Ustinov. “Prospects for creation of civil nuclear powered ships.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 2(392) (2020): 89–96. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-89-96.

2. Fatykhov, Ranis, Sergey Khantimerov, and Nail Suleimanov. “Prospects for the use of lithium-ion batteries as standby power sources in electric power stations.” *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 4(36) (2017): 45–53.

3. Denshchikov, K. K., A. Z. Zhuk, A. F. Gerasimov, and M. V. Golikov. “Superkondensatory v sovremennoi energetike.” *Izvestiya rossiiskoi akademii nauk. Energetika* 5 (2011): 125–131.

4. Chen, Yuche, and Marc Melaina. “Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 74 (2019): 234–244. DOI: 10.1016/j.trd.2019.08.002.

5. Meskani, Asma, and Ali Haddi. “Modeling and Simulation of an Intelligent Hybrid Energy Source based on Solar Energy and Battery.” *Energy Procedia* 162 (2019): 97–106. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.011.

6. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. "Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

7. 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.

8. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. "Ship propulsion hybrid installation." *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 337–340.

9. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. "Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats." *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.

10. Geertsma, R. D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J.J. Hopman. "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments." *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.

11. Kuznetsov, S. E. *Osnovy tekhnicheskoi ehkspluatatsii sudovogo ehlektrooborudovaniya i sredstv avtomatizatsii*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Григорьев Андрей Владимирович** —  
 кандидат технических наук, доцент  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
 197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Профессора Попова, 5  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)  
**Зайнуллин Руслан Ринатович** —  
 начальник отдела  
 АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
 e-mail: [zaynullin@eds-marine.ru](mailto:zaynullin@eds-marine.ru)  
**Мальшев Сергей Михайлович** —  
 ассистент, начальник отдела  
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
 197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Профессора Попова, 5  
 АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
 e-mail: [malyshevsergey@list.ru](mailto:malyshevsergey@list.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Grigoryev, Andrey V.** —  
 PhD, Associate Professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 Saint Petersburg Electrotechnical University  
 5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,  
 Russian Federation  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)  
**Zaynullin, Ruslan R.** —  
 Head of Department  
 JSC "RPC "Ship electric propulsion"  
 12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,  
 St. Petersburg, 197341, Russian Federation  
 e-mail: [zaynullin@eds-marine.ru](mailto:zaynullin@eds-marine.ru)  
**Malyshev, Sergei M.** —  
 Assistant, Head of Department  
 Saint Petersburg Electrotechnical University  
 5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,  
 Russian Federation  
 JSC "RPC "Ship electric propulsion"  
 12 Fermское shosse Str., let. E, office 178,  
 St. Petersburg, 197341, Russian Federation  
 e-mail: [malyshevsergey@list.ru](mailto:malyshevsergey@list.ru)

Статья поступила в редакцию 3 августа 2020 г.  
 Received: August 3, 2020.

## BIDIRECTIONAL POWER CONVERTER SYSTEM IMPLEMENTATION IN LIMITED POWER GRID

**K. A. Vorobev<sup>1</sup>, N. A. Poliakov<sup>1</sup>, R. Strzelecki<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland

*Simulation analysis of bidirectional power converters system for charging station of electric vehicle in condition of limited power source in city infrastructure is considered in the paper. Electric vehicles can be automobiles, trucks or vessels with electric propulsion system. Power limitations may be caused by obsolescence of the electrical infrastructure, as well as the historical, architectural, or economic features of city or its districts infrastructure. To use charging stations matching the latest standards without global upgrade of infrastructure, these limitations need to be overcome, which is possible with external energy storage units delivered to the charging station. In general case, the energy from energy storage units can be used both to maximize load capacity and to transfer power to the AC power grid. The function of balancing power consumption between the grid and external energy storage units is connected to the system of bidirectional power converters, which consists of a three-phase dual active bridge converter on the side of energy storage units and an active front-end on the side of AC grid; both converters are working on the common DC link. To implement such a system, galvanic insulation between the converter terminals and the external energy storage units is required, which is provided by the presence of a high-frequency power transformer in a three-phase dual active bridge converter. The three-phase dual active bridge converter is controlled by a phase modulation algorithm with a single-phase shift (single-phase switching). The active front-end is controlled by a space vector modulation algorithm. System modes involve transferring energy from the AC grid to the DC link through the active front-end, transferring energy from the external energy storage units to the DC link through a three-phase dual active bridge converter, joint transmission of energy from the grid and external storage units to the common DC link and transfer energy from the energy storage units to the grid. The simulation study and analysis have confirmed the workability of the proposed bidirectional power converter system and revealed the specifics of working in the joint transmission of energy by converters to a common DC link, requiring the introduction of additional cross-feedback between converters.*

*Keywords: bidirectional power converter, power grid, phase modulation, single-phase switch, power converters system, dual active bridge, active front-end.*

**For citation:**

Vorobev, Konstantin A., Nikolai A. Poliakov, and Ryszard Strzelecki. "Bidirectional power converter system implementation in limited power grid." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): xx–xx. DOI:

**УДК 621.314.58**

## СИСТЕМА ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

**К. А. Воробьев<sup>1</sup>, Н. А. Поляков<sup>1</sup>, Р. Стжелецки<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — Гданьский политехнический университет, Гданьск, Польша

*Статья посвящена модельному исследованию системы двунаправленных полупроводниковых преобразователей электрической энергии для зарядных станций электротранспорта, функционирующих в условиях ограниченной мощности городских электрических сетей переменного тока. Отмечается, что ограничение мощности может возникать в связи с устареванием электроинфраструктуры, а также с историческими, архитектурными или экономическими особенностями инфраструктуры города или его районов. Для применения в такой инфраструктуре зарядных устройств, выполненных в соответствии с последними стандартами и обеспечивающих высокие скорости заряда батарей электротранспорта, такого как электромобили или суда на электротяге, требуется преодолеть эти ограничения, что пред-*

ставляется возможным с помощью использования внешних по отношению к сети накопителей энергии, доставляемых на зарядную станцию. Обращается внимание на то, что в общем случае энергия из накопителей может использоваться как для обеспечения максимальной мощности нагрузки, так и для передачи мощности в сеть. Функция балансирования потребления между сетью и внешними накопителями возлагается на рассматриваемую систему двунаправленных преобразователей, состоящую из трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя со стороны накопителя и активного выпрямителя напряжения со стороны сети переменного тока, работающих на общее звено постоянного тока. Для реализации такой системы необходима гальваническая изоляция между терминалами преобразователя и внешним накопителем, которая обеспечивается за счет наличия высокочастотного силового трансформатора в трехфазном активном двунаправленном мостовом преобразователе, согласующего напряжения между терминалами. Отмечается, что трехфазный активный двунаправленный мостовой преобразователь управляется алгоритмом фазовой модуляции с коммутацией фазным сдвигом. Активный выпрямитель напряжения управляется алгоритмом пространственной векторной модуляции. Исследованы режимы работы системы, предполагающие передачу энергии из сети в звено постоянного тока через активный выпрямитель напряжения, передачу энергии из внешнего накопителя в звено постоянного тока через трехфазный активный двунаправленный мостовой преобразователь, совместную передачу энергии из сети и внешнего накопителя в общее звено постоянного тока и передачу энергии из накопителя в сеть. Проведенное модельное исследование показало работоспособность предложенной системы двунаправленных преобразователей и позволило выявить особенности работы при совместной передаче преобразователями энергии в общее звено постоянного тока, потребовавшие внедрения дополнительной перекрестной обратной связи между преобразователями.

*Ключевые слова:* двунаправленный полупроводниковый преобразователь, энергосистема, фазово-импульсная модуляция, коммутация фазным сдвигом, двунаправленный мостовой преобразователь, активный выпрямитель напряжения.

**Для цитирования:**

Воробьев К. А. Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности / К. А. Воробьев, Н. А. Поляков, Р. Стжелецки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 812–823. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-812-823.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время в связи с быстрым развитием электротранспорта растет потребность в быстрой передаче больших объемов электрической энергии на короткие расстояния. С учетом прогресса, достигнутого в течение последнего десятилетия в полупроводниковой технике, увеличивается спрос на импульсные силовые преобразователи, способные эффективно управлять перетоком мощности. Применение импульсных силовых преобразователей с высокой частотой коммутации позволяет обеспечить такие их преимущества, как малый удельный объем устройства на киловатт мощности, высокий КПД и быстродействие.

Внедрение и популяризация электротягового транспорта на сегодняшний день являются характерными тенденциями, полнота реализации которых напрямую связана с непрерывным обеспечением необходимой электрической мощностью зарядных станций, что требует от городов наличия развитой энергетической инфраструктуры. Тем не менее соблюдение норм энергетической инфраструктуры города не всегда возможно в полной мере выполнить по ряду причин, к которым относятся высокая степень урбанизации и наличие исторической застройки, препятствующие прокладке новых линий электропередач или модернизации старых. Эта проблема существует и в других странах. Например, когда лондонское подразделение логистической компании UPS решило увеличить флот грузового электротранспорта с 65 до 170 грузовых электромобилей, оказалось, что невозможно обеспечить достаточную электрическую мощность для заряда электромобилей в пределах центральной части города. Для решения этой задачи был создан проект Smart Electric Urban Logistics (SEUL) [1], заключающийся в разработке «умной» энергосистемы (Smart Grid), которая сможет решить проблемы за счет более рационального использования энергии, а также за счет привлечения к работе возобновляемых источников энергии. Тем не менее на данный момент предел загрузки электротранспортом определяется сетью города, мощность которой

в некоторых районах ограничена, что, в свою очередь, не позволяет в полной мере использовать возможности современных стандартов быстрой зарядки аккумуляторов электромобилей.

За последние 10 лет некоторые паромные и корабельные переправы местного судоходства Норвегии были модернизированы (MF Amrege — паром, выполненный исключительно на электроприводе, запущен в эксплуатацию в 2014 г., MF Tucho Brahe — паром модернизированный в гибридный установкой дополнительно электропривода в 2013 г.) или запланированы к модернизации для работы от аккумуляторных накопителей. Такие паромы совершают рейсы в соответствии со строгим расписанием с ограниченным временем на зарядку аккумуляторов в течение посадки/высадки пассажиров или погрузки/разгрузки, что соответствует примерно 5–15 мин. Проблема, которая возникла при работе зарядных портовых станций, удаленных от центра города, связана с ограниченной мощностью местных энергосетей вблизи порта, т. е. невозможностью обеспечения требуемых зарядных токов для быстрой зарядки, и, соответственно, увеличением времени пребывания судна в порту. Для решения данной проблемы решено было использовать стационарные накопители на аккумуляторах в электростанции порта, которые заряжаются в течение времени простоя, что уравнивает нагрузку на городскую сеть в течение суток [2].

Для того, чтобы решить задачу увеличения энергоемкости станций без изменения допустимой мощности нагрузки сети, можно использовать мобильные внешние накопители энергии, доставляемые непосредственно к станции. Однако реализация такого решения потребует использования системы активных преобразователей, обеспечивающих двухсторонний обмен энергией с сетью через общее звено постоянного тока (ЗПТ) [3], [4].

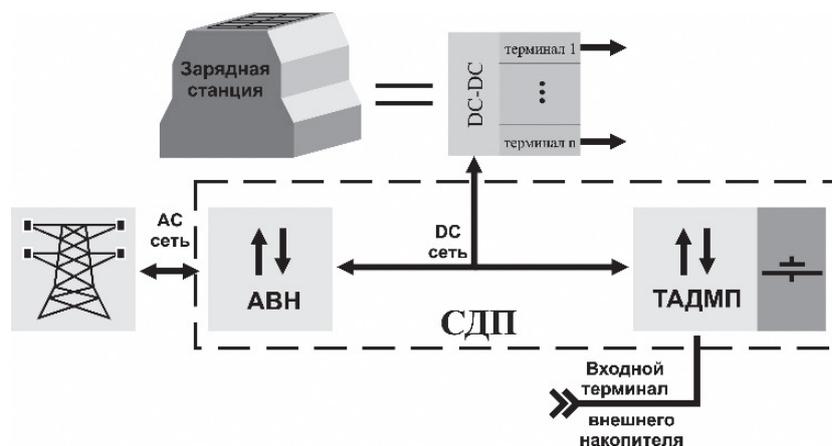


Рис. 1. Упрощенная структура энергосистемы

В данной работе выполнено модельное исследование системы двунаправленных преобразователей (СДП) электрической энергии, состоящей из трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя (ТАДМП, англ. — TPDAV (Three-Phase Dual Active Bridge)) [5]–[8] и активного выпрямителя напряжения (АВН) [9]–[11], работающих на общее звено постоянного тока. Использование активного двунаправленного мостового преобразователя (АДМП) обусловлено гальванической изоляцией терминалов с помощью высокочастотного трансформатора. По сравнению с сетевыми низкочастотными трансформаторами АДМП имеет существенное преимущество в массогабаритных показателях. Использование трехфазной топологии ТАДМП также обусловлено аналогичным преимуществом, а кроме того, способностью работать в режиме «мягкой» коммутации при нагрузке, равной или близкой к номинальной. Сравнительный анализ топологий приводится в источниках [12]–[17]. Результирующая структура энергосистемы показана на рис. 1.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

ТАДМП является ключевым преобразователем в СДПУ, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.

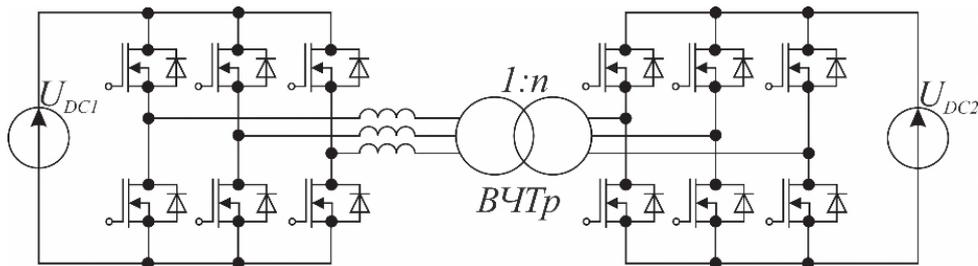


Рис. 2. Упрощенная схема трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя

В состав ТАДМП входят два трехфазных инвертора, трехфазный высокочастотный трансформатор (ВЧТр) и накопительная индуктивность, в качестве которой может выступать как отдельное устройство, так и индуктивность рассеивания вторичной обмотки трансформатора. Для обеспечения симметричных процессов коммутации индуктивность  $L$  должна иметь равное значение для всех фаз. В качестве источника  $U_{DC1}$  выступает накопитель электрической энергии.

Математическое описание ТАДМП дано в источниках [6], [8], [13]. Диаграмма коммутаций в течение одного периода приведена на рис. 3. Вентили обоих инверторов коммутируются с одинаковым коэффициентом заполнения 0,5, со сдвигом между фазами на  $\frac{\pi}{3}$  (рис. 3, а). В качестве алгоритма коммутации используется фазово-импульсная модуляция (ФИМ) ([18], [19]). Сдвиг между управляющими сигналами двух инверторов  $\theta = 2\pi \frac{t}{T_s}$ , где  $T_s$  — период коммутации (рис. 3, б).

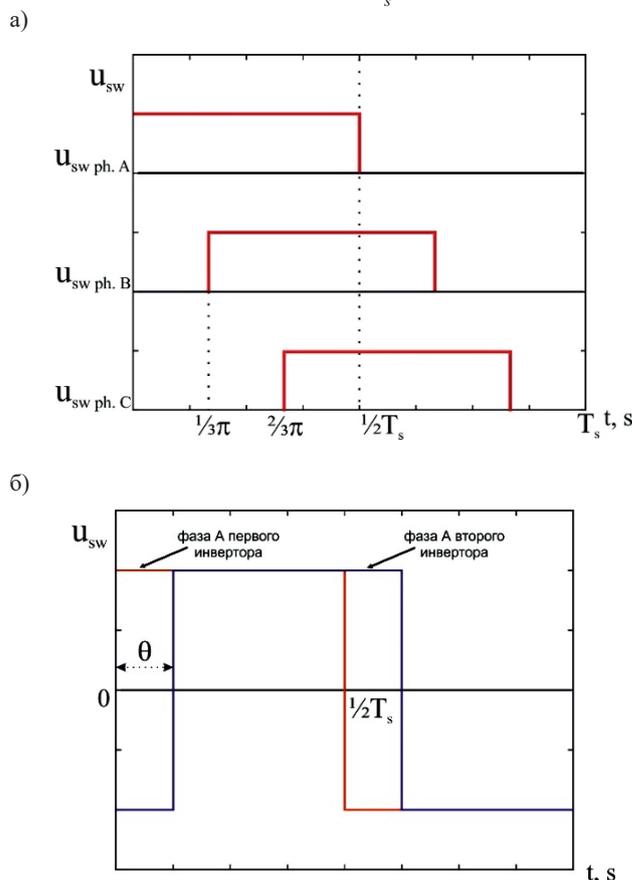


Рис. 3. Период коммутации трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя

Выходная мощностная характеристика ТАДМП в зависимости от  $\theta$  [6], [20], представленная на рис. 4, описывается следующими выражениями:

$$P(\theta) = \frac{U_{DC1}^2}{\omega L} d \theta \left( \frac{2}{3} - \frac{\theta}{2\pi} \right) \quad \text{для } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}; \quad (1)$$

$$P(\theta) = \frac{U_{DC1}^2}{\omega L} d \left( \theta - \frac{\theta^2}{\pi} - \frac{\pi}{18} \right) \quad \text{для } \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f_s$ ,  $f_s = \frac{1}{T_s}$  — частота коммутации,  $d = \frac{U_{DC2}}{nU_{DC1}}$  — отношение напряжений между терминалами ТАДМП,  $n$  — коэффициент трансформации.

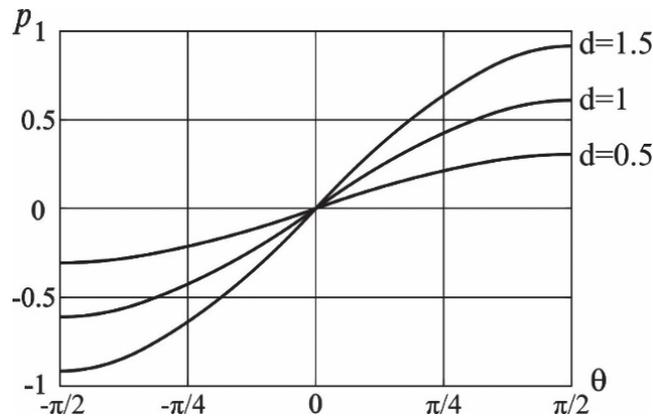


Рис. 4. Выходная мощностная характеристика ТАДМП, нормированная к  $\frac{U_{DC}^2}{\omega L}$

В качестве алгоритма коммутации АВН выбрана двухмерная пространственно-векторная модуляция (ПВМ), описание которой дано в источниках [9], [10], [21], [22]. Рассматриваемая система преобразователей должна обеспечивать работу в следующих режимах: передача энергии из сети в ЗПТ через АВН (рис. 5, а), передача энергии из внешнего накопителя в ЗПТ через ТАДМП (рис. 5, б), совместная передача энергии из сети и внешнего накопителя через АВН и ТАДМП в общее ЗПТ (рис. 5, в), утилизация недоиспользованной энергии внешнего накопителя (передача энергии из накопителя в сеть) — рис. 5, в. На основе необходимости обеспечения ранее указанных режимов была предложена СДП, структурная схема которой представлена на рис. 5, д.

Параметры СДП, а также базовые величины, по которым в дальнейшем будет произведено нормирование, представлены в таблице. Исходя из условия максимально мощности, равной 35 кВт, в соответствии с выражениями (1) и (2), накопительная индуктивность ТАДМП должна быть  $L \approx 6,2 \mu\text{H}$ .

#### Параметры СДП

Параметр	Значение	Единица измерения
$U_{DC1}$	320	В
$U_{DC2}$	700	В
$U_{AC}$	220	В

$I_n$	50	А
$P_{out}$	35	кВт
$f_{sw\ TPDAB}$	60	кГц
$f_{sw\ AFE}$	20	кГц
Коэффициент трансформации $n$	2	–
$I_{AFEbase} = \frac{P_{out}}{\sqrt{2}U_{AC}}$	113	А
$U_{DCbase} = U_{DC2}$	700	В
$U_{ACbase} = U_{AC}$	220	В

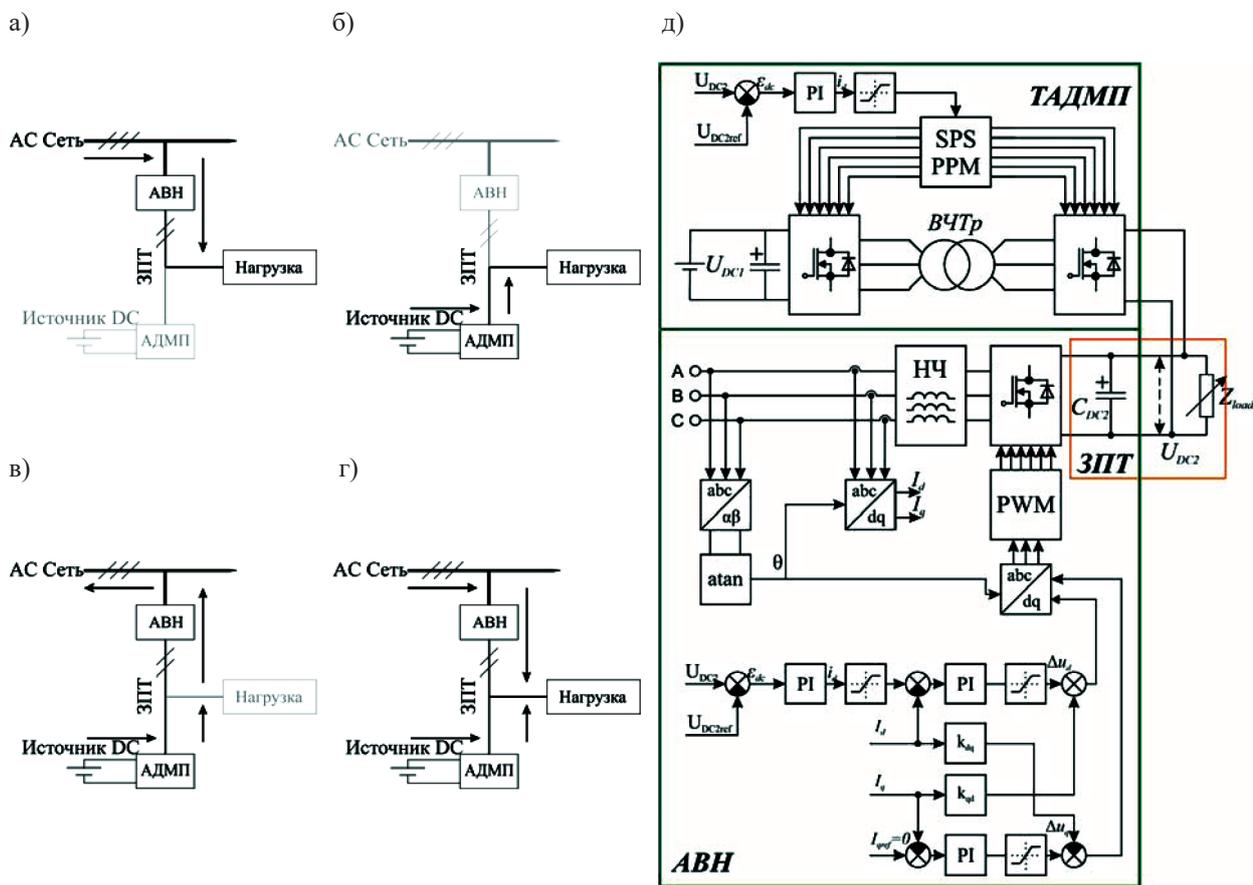


Рис. 5. Режимы работы СДП (а)–(с) и структурная схема двунаправленных преобразователей (д)

**Результаты (Results)**

Моделирование системы производилось для режимов работы СДП, представленных на рис. 5, а–г. Режим работы с питанием от внешнего источника представлен на рис. 6. Система выходит на установленный уровень напряжения в течение 2 мс с перерегулированием менее чем 2,5 %. АВН в данном эксперименте отключен. Работа в остальных режимах представлена

на рис. 7. Величина  $i_{AC\ mag}$  нормирована относительно  $I_{AFE\ base}$ , а величина  $u_{DC2}$  — относительно величины  $U_{DC2}$  согласно данным таблицы, и на рис. 6 и 7 они представлены в относительных единицах (о. е.).

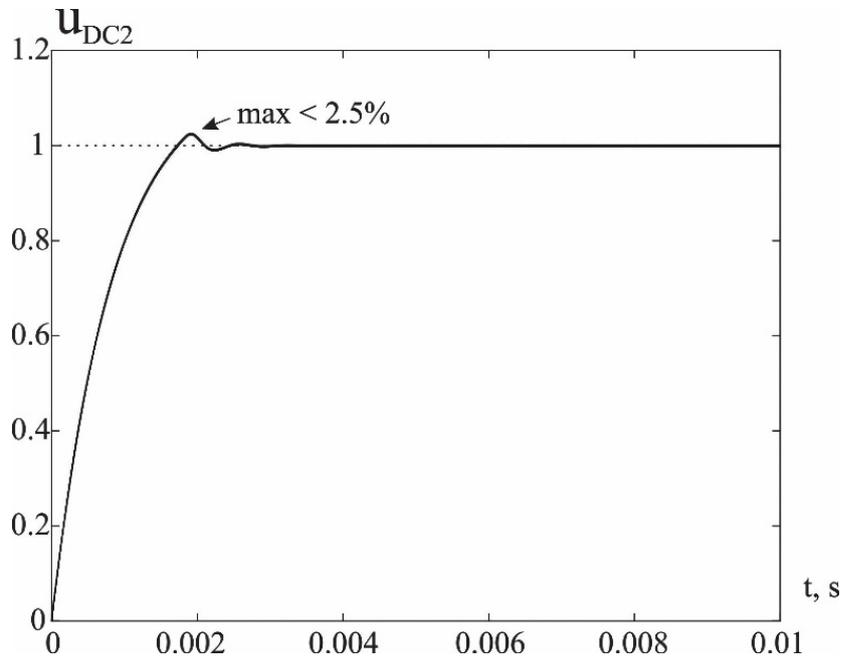


Рис. 6. Режим работы от внешнего источника, нормировано к  $U_{DC2}$

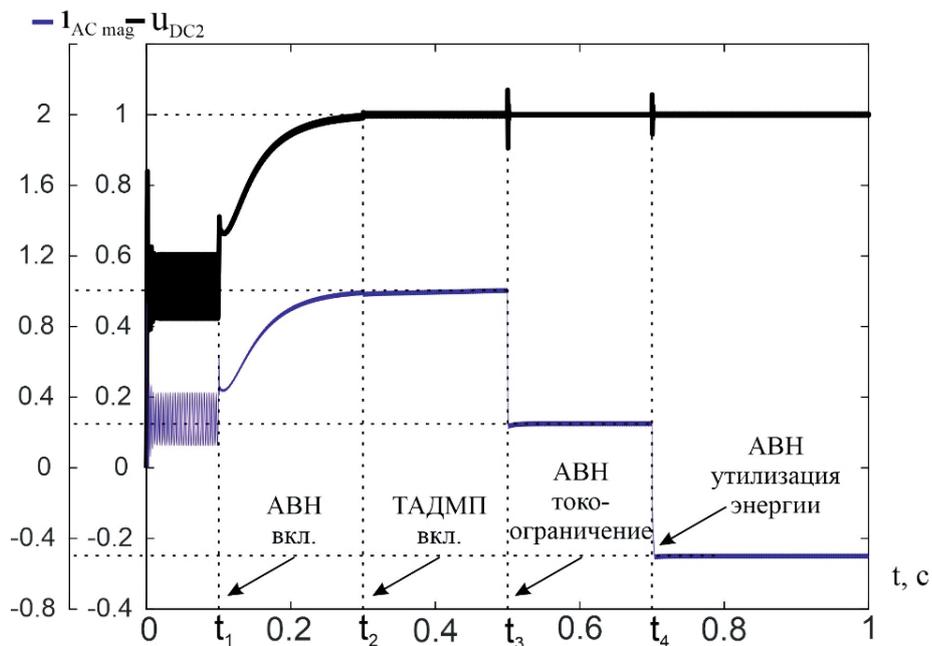


Рис. 7. Результат моделирования системы:

$i_{AC\ mag}$  — амплитудное значение переменного тока, о. е.,  
 $u_{DC2}$  — напряжение в ЗПТ, о. е.

На интервале  $t \in [0; 0,1)$  происходит включение системы, системы управления обоих преобразователей отключены, АВН работает как неуправляемый выпрямитель напряжения. В момент

$t = 0,1$  с происходит включение системы управления АВН. Напряжение в ЗПТ, согласно закону управления, приходит к установившемуся значению  $U_{DC2}$ , нагрузка в ЗПТ потребляет мощность  $P_{out}$  только от сети переменного тока. Включение ТАДМП происходит в момент  $t = 0,3$  с. При этом потребление мощности от внешнего накопителя не происходит. Незначительное уменьшение тока, потребляемого АВН из сети, происходит из-за переходных процессов в ТАДМП. В момент  $t = 0,5$  с для снижения нагрузки на сеть уменьшается уровень токоограничения АВН. Ток в фазах АВН, уменьшаясь до нового уровня токоограничения, составляет 27 А. Поскольку мощность нагрузки остается на номинальном уровне, недостаток мощности из сети сбалансирован передачей в ЗПТ мощности из накопителя посредством ТАДМП. Начиная с  $t = 0,7$  с происходит отключение нагрузки от ЗПТ и передача энергии со стороны внешнего накопителя в сеть, при этом уровень токоограничения для тока рекуперации АВН равен половине номинального тока и составляет 56 А.

### Обсуждение (Discussion)

Моделирование показало возможность реализации всех режимов работы СДП, заявленных ранее. Однако при совместной передаче энергии из сети и внешнего накопителя через АВН и ТАДМП в общее ЗПТ была выявлена особенность согласованной работы преобразователей в данном режиме: в случае отдельных и независимых контуров управления АВН и ТАДМП преобразователь, имеющий меньшее время установки напряжения, будет определять мощность потребления, и, таким образом, после окончания переходного процесса вся требуемая мощность, передаваемая в ЗПТ, будет обеспечиваться тем преобразователем, который быстрее достигнет установившегося значения напряжения. При модельном исследовании это произошло с ТАДМП, который в результате быстрого парирования изменения напряжения обеспечил большую часть мощности, при этом токи в фазах АВН имели значения меньше уровня токоограничения.

Полученный результат может быть несущественным для краткосрочных режимов работы, однако длительный режим требует оптимального распределения нагрузки между преобразователями, что подразумевает необходимость обеспечения из накопителя только той части мощности для зарядки электротранспорта, которую невозможно получить от сети, потребляя электрический ток в пределах допустимого токоограничения.

Решением данной проблемы служит введение перекрестной связи между преобразователями, которая уменьшает задание по напряжению ТАДМП ниже уровня его пульсаций при условии работы АВН в области допустимых токов. Задание ТАДМП устанавливается на уровне номинального значения при достижении током АВН уровня токоограничения. Таким образом, при увеличении нагрузки дополнительная обратная связь не позволит ТАДМП передавать требуемую мощность в ЗПТ, если ее может обеспечить АВН.

### Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведено модельное исследование работы СДП в основных режимах передачи энергии между преобразователями и источниками.
2. Продемонстрированы возможности балансирования мощности между внешним источником и сетью переменного тока с учетом допустимых ограничений максимального тока в случае перегрузки сети.
3. Данное модельное исследование, являясь частью СДП, требует последующей отработки алгоритмов управления на прототипе СДП и разработки стратегии переключения между режимами в зависимости от условий потребления электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SMART ELECTRIC URBAN LOGISTICS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://crossriverpartnership.org/projects/smart-electric-urban-logistics/> (дата обращения: 01.07.2020).
2. *Karimi S.* Evaluation of Energy Transfer Efficiency for Shore-to-Ship Fast Charging Systems / S. Karimi, M. Zadeh, J. A. Suul // 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). — IEEE, 2020. — Pp. 1271–1277. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152219.
3. *Poliakov N.* Three Phase Dual Active Bridge Power Converter Implementation in Power Supply System of Telescope Rotary Support Device / N. Poliakov, K. Vorobev // 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). — IEEE, 2019. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982360.
4. *Zhao Z.* Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery / Z. Zhao, J. Hu, H. Chen // 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). — IEEE, 2017. — Pp. 349–354. DOI: 10.1109/ICEI.2017.68.
5. *Baek S.* Isolation Transformer for 3-Port 3-Phase Dual-Active Bridge Converters in Medium Voltage Level / S. Baek, S. Bhattacharya // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — Pp. 19678–19687. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895818.
6. *De Doncker R. W. A. A.* A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications / R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, M. H. Kheraluwala // IEEE transactions on industry applications. — 1991. — Vol. 27. — Is. 1. — Pp. 63–73. DOI: 10.1109/28.67533.
7. *Walter J.* High-power galvanically isolated DC/DC converter topology for future automobiles / J. Walter, R.W. De Doncker // IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist. — IEEE, 2003. — Vol. 1. — Pp. 27–32. DOI: 10.1109/PESC.2003.1218269.
8. *Yazdani F.* Analysis of a three-phase dual active bridge converter during the deadband / F. Yazdani, S. Haghbin, T. Thiringer, M. Zolghadri // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). — IEEE, 2017. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977811.
9. *Albatran S.* Hybrid 2D-3D Space Vector Modulation Voltage Control Algorithm for Three Phase Inverters / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna, R. Schrader, M. Mazzola // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2013. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 734–744. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2245689.
10. *Albatran S.* A hybrid 2D-3D SVM control algorithm for three phase voltage source inverters / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. — IEEE, 2012. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316357.
11. *Neacsu D.O.* Switching Power Converters: Medium and High Power / D. O. Neacsu. — Second Edition. — New York: CRC Press, 2014. — 592 p.
12. *Jimichi T.* Comparison of single-phase and three-phase dual-active bridge DC-DC converters with various semiconductor devices for offshore wind turbines / T. Jimichi, M. Kaymak, R. W. De Doncker // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 – ECCE Asia). — IEEE, 2017. — Pp. 591–596. DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992105.
13. *Segaran D.* Comparative analysis of single-and Three-Phase Dual Active Bridge Bidirectional DC-DC Converters / D. Segaran, D. G. Holmes, B. P. McGrath // Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering. — 2009. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 329–337. DOI: 10.1080/1448837X.2009.11464251.
14. *Van Hoek H.* Comparison of a single-phase and a three-phase dual active bridge with low-voltage, high-current output / H. van Hoek, M. Neubert, A. Kroeber, and R. W. De Doncker // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). — IEEE, 2012. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477466.
15. *Inoue S.* A Bidirectional Isolated DC–DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions on Power Electronics. — IEEE, 2007. — Vol. 22. — Is. 2. — Pp. 535–542. DOI: 10.1109/TPEL.2006.889939.
16. *Inoue S.* A Bidirectional DC–DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions Power Electron. — 2007. — Vol. 22. — Is. 6. — Pp. 2299–2306. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248.

17. Núñez R. O. A comparative study of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for renewable energy applications / R. O. Núñez, G. G. Oggier, F. Botterón, G. O. García // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. — 2017. — Vol. 23. — Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.seta.2017.07.004.
18. Zhao B. Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System / B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun // *IEEE Transactions on power electronics*. — 2013. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 4091–4106. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
19. Choi H. A Novel Switching Algorithm to improve Efficiency at light load conditions for Three-Phase DAB Converter in LVDC Application / H. Choi, S. Jung, J. Jung // *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*. — IEEE, 2018. — Pp. 383–387. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507840.
20. Prasad A. R. A three-phase resonant PWM DC-DC converter / A.R. Prasad, P.D. Ziogas, S. Manias // *PESC '91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. — IEEE, 1991. — Pp. 463–473. DOI: 10.1109/PESC.1991.162716.
21. Albatran S. Comparative harmonic analysis of hybrid 2D-3D SVM and conventional 2D SVM / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. — IEEE, 2013. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626441.
22. Albatran S. Switching function notation for hybrid 2D-3D space vector modulation / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. — IEEE, 2013. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785636.

## REFERENCES

1. Smart electric urban logistics. Web. 1 July 2020 <<https://crossriverpartnership.org/projects/smart-electric-urban-logistics/3/>>.
2. Karimi, Siamak, Mehdi Zadeh, and Jon Are Suul. “Evaluation of Energy Transfer Efficiency for Shore-to-Ship Fast Charging Systems.” *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, 2020. 1271–1277. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152219.
3. Poliakov, Nikolai, and Konstantin Vorobev. “Three Phase Dual Active Bridge Power Converter Implementation in Power Supply System of Telescope Rotary Support Device.” *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. IEEE, 2019. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982360.
4. Zhao, Zhongtian, Jian Hu, and Hongtao Chen. “Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid based on AC power grid and battery.” *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. IEEE, 2017. 349–354. DOI: 10.1109/ICEI.2017.68.
5. Baek, Seunghun, and Subhashish Bhattacharya. “Isolation Transformer for 3-Port 3-Phase Dual-Active Bridge Converters in Medium Voltage Level.” *IEEE Access* 7 (2019): 19678–19687. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895818.
6. De Doncker, Rik WAA, Deepakraj M. Divan, and Mustansir H. Kheraluwala. “A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications.” *IEEE transactions on industry applications* 27.1 (1991): 63–73. DOI:10.1109/28.67533.
7. Walter, Joerg, and Rik W. De Doncker. “High-power galvanically isolated DC/DC converter topology for future automobiles.” *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC'03*. Vol. 1. IEEE, 2003. 27–32. DOI:10.1109/PESC.2003.1218269.
8. Yazdani, Farzad, Saeid Haghbin, Torbjorn Thiringer, and Mohammadreza Zolghadri. “Analysis of a Three-Phase Dual Active Bridge Converter during the Deadband.” *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2017. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977811.
9. Albatran, Saher, Yong Fu, Ahmad Albanna, Robin Schrader, and Michael Mazzola. “Hybrid 2D-3D Space Vector Modulation Voltage Control Algorithm for Three Phase Inverters.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 4.3 (2013): 734–744. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2245689.
10. Albatran, Saher, Yong Fu, and Ahmad Albanna. “A hybrid 2D-3D SVM control algorithm for three phase voltage source inverters.” *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*. IEEE, 2012. 1–6. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316357.

11. Neacsu, Dorin O. *Switching Power Converters: Medium and High Power*. Second Edition. New York: CRC Press, 2014.
12. Jimichi, Takushi, Murat Kaymak, and Rik W. De Doncker. "Comparison of single-phase and three-phase dual-active bridge DC-DC converters with various semiconductor devices for offshore wind turbines." *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)*. IEEE, 2017. 591–596. DOI:10.1109/IFEEC.2017.7992105.
13. Segaran, D., Donald Grahame Holmes, and Brendan Peter Mcgrath. "Comparative analysis of single-and three-phase dual active bridge bidirectional dc-dc converters." *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering* 6.3 (2009): 329–337. DOI: 10.1080/1448837X.2009.11464251.
14. van Hoek, Hauke, Markus Neubert, Albert Kroeber, and Rik W. De Doncker. "Comparison of a Single-Phase and a Three-Phase Dual Active Bridge with Low-Voltage, High-Current Output." *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2012. 1–6. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477466.
15. Inoue, Shigenori, and Hirofumi Akagi. "A Bidirectional Isolated DC-DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System." *IEEE Transactions on Power Electronics* 22.2 (2007): 535–542. DOI: 10.1109/TPEL.2006.889939.
16. Inoue, Shigenori, and Hirofumi Akagi. "A Bidirectional DC-DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation." *IEEE Transactions on Power Electronics* 22.6 (2007): 2299–2306. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248.
17. Núñez, R. O., G. G. Oggier, F. Botterón, and G. O. García. "A Comparative Study of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for Renewable Energy Applications." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23 (2017): 1–10. DOI: 10.1016/j.seta.2017.07.004.
18. Zhao, Biao, Qiang Song, Wenhua Liu, and Yandong Sun. "Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System." *IEEE Transactions on Power Electronics* 29.8 (2013): 4091–4106. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
19. Choi, Hyun-jun, Si-hoon Jung, and Jee-hoon Jung. "A Novel Switching Algorithm to improve Efficiency at light load conditions for Three-Phase DAB Converter in LVDC Application." *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*. IEEE, 2018. 383–387. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507840.
20. Prasad, A. R., P. D. Ziogas, and S. Manias. "A three-phase resonant PWM DC-DC converter." *PESC'91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 1991. 463–473. DOI: 10.1109/PESC.1991.162716.
21. Albatran, Saher, Yong Fu, and Ahmad Albanna. "Comparative harmonic analysis of hybrid 2D-3D SVM and conventional 2D SVM." *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. IEEE, 2013. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626441.
22. Albatran, Saher, Yang Fu, and Ahmad Albanna. "Switching function notation for hybrid 2D-3D space vector modulation." *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2013. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785636.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Воробьев Константин Александрович** — аспирант  
*Научный руководитель:*  
 Томасов Валентин Сергеевич — кандидат технических наук, профессор  
 Университет ИТМО  
 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литер А  
 e-mail: [mail@niuitmo.ru](mailto:mail@niuitmo.ru)  
**Поляков Николай Александрович** — кандидат технических наук, доцент  
 Университет ИТМО  
 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литер А  
 e-mail: [polyakov.ets.itmo@gmail.com](mailto:polyakov.ets.itmo@gmail.com)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vorobev, Konstantin A.** — Postgraduate  
*Supervisor:*  
 Tomasov, Valentin S. — PhD, professor  
 ITMO University  
 49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101, Russian Federation  
 e-mail: [mail@niuifmo.ru](mailto:mail@niuifmo.ru)  
**Poliakov, Nikolai A.** — PhD, associate professor  
 ITMO University  
 49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101, Russian Federation  
 e-mail: [polyakov.ets.itmo@gmail.com](mailto:polyakov.ets.itmo@gmail.com)

**Стжелецки Рышард** —  
доктор технических наук, профессор  
Гданьский политехнический университет  
80-233, Польша, Гданьск  
e-mail: [ryszard.strzelecki@pg.edu.pl](mailto:ryszard.strzelecki@pg.edu.pl)

**Strzelecki, Ryszard** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Gdańsk University of Technology  
Gdańsk, 80-233, Poland  
e-mail: [ryszard.strzelecki@pg.edu.pl](mailto:ryszard.strzelecki@pg.edu.pl)

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2020 г.  
Received: August 17, 2020.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского  
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Том 12. № 4**

**2020 год**

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.08.20. Формат 60×90/8  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 500 экз. Заказ № 317/20

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7