

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**

**Выпуск 5 (39)**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2016

**Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.** — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 5 (39). — 232 с.

ISSN 2309-5180

«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 средства массовой информации от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

Статьи публикуются на русском и английском языках.

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте. По содержанию статьи должны соответствовать тематике журнала, его целям и задачам.

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.

Вестнику присвоен международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2309-5180.

С 2009 г. журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

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



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ</b> .....	7
<i>Давыденко А. А.</i> Технологические решения по выгрузке контейнерных грузов на необорудованное побережье в условиях Арктики .....	7
<i>Ершов А. А., Развозов С. Ю., Петухов П. И.</i> Рекомендации по маневрированию судна в ледовых условиях .....	20
<i>Акмайкин Д. А., Ключева С. Ф., Салюк П. А.</i> Результаты исследований проблемы моделирования графа маршрута судна на основе алгоритмов кластеризации .....	29
<i>Ермаков С. В.</i> Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судовождении .....	39
<i>Зуб И. В., Ежов Ю. Е.</i> Модель оценки безопасной эксплуатации перегрузочной техники на контейнерном терминале .....	50
<i>Кирсанов М. Н.</i> Статический анализ и монтажная схема плоской фермы .....	61
<i>Надеина Е. В.</i> Проблема формирования коммуникативных умений современных судоводителей .....	68
<b>ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ</b> .....	76
<i>Колосов М. А., Смирнов А. А.</i> Разработка фрикционной системы защиты ворот шлюза от навала судна .....	76
<i>Комков И. В., Моргунов К. П., Семенников А. В.</i> Исследование свойств бетона камер шлюзов волгоградского гидроузла .....	85
<i>Чебан А. Ю.</i> Разработка русловых и обводненных месторождений песка и песчано-гравийных материалов в Приморском крае .....	97
<i>Томсон П. В., Титова А. В.</i> Разработка алгоритма преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса–Крюгера из зоны в зону .....	103
<i>Ключев В. В.</i> Количественная оценка показателя стесненности акватории Северного морского пути .....	109
<i>Коношенков А. А.</i> Исследование паводковой безопасности водохранилищ .....	118
<i>Смирнов-Туманов Я. С., Панченко Н. М.</i> Разработка лабораторной установки для исследования фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси .....	128
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА</b> .....	134
<i>Костылев И. И., Коняев Д. В.</i> Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах .....	134
<i>Вольщев А. В., Соболенко А. Н.</i> Утилизация тепловых ресурсов главного судового двигателя посредством использования теплонасосной установки .....	144
<i>Булгаков В. П., Чеботарев Ю. В., Рубан И. Н.</i> Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МгН (АЛ25) на задиорообразование в цилиндропоршневой группе .....	151
<i>Григорьев А. В., Васильев А. Ю., Малышев С. М.</i> Анализ возможности применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения .....	159

выпуск **5(39)**  
**2016**

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Главный редактор

**С. О. Барышников**,

д.т.н., профессор

rector@gumrf.ru

#### Зам. гл. редактора

**Т. А. Пантина**, д.э.н., проф.

PantinaTA@gumrf.ru

#### С. Гуцма —

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

#### Г. В. Егоров —

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

#### Ф. В. Кармазинов —

ген. директор ГУП  
«Водоканал СПб», д.т.н., проф.

#### Р. Качиньски —

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

#### А. И. Пошивай —

заместитель руководителя  
Федерального агентства  
морского и речного транспорта

#### А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., член-  
корреспондент РАН

#### Р. М. Юсупов —

директор Санкт-Петербургского  
института информатики и  
автоматизации РАН, д.т.н.,  
проф., член-корреспондент 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., проф.	
<i>В. В. Веселков,</i> д.т.н., проф.	
<i>П. А. Гарибин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Д. П. Голоскоков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д.т.н., проф.	
<i>О. Г. Каратаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. В. Кириченко,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. А. Колосов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Королева,</i> д.э.н., проф.	
<i>И. И. Костылев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Кузнецов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Лаврентьева,</i> д.э.н., проф.	
<i>А. Ю. Ластовцев,</i> к.т.н., проф.	
<i>В. А. Логиновский,</i> д.т.н., проф.	
<i>Г. В. Макаров,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Е. Марлей,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. М. Никитин,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. П. Нырков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Л. И. Погодаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. И. Решняк,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Романовский,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. А. Сикарев,</i> д.т.н., проф.	
<i>С. В. Смоленцев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Степанов,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. В. Сухотерин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. Г. Трунин,</i> к.э.н., директор РРР	
<i>В. И. Черненко,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Б. Чистов,</i> д.т.н., проф.	

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ</b>	166
<i>Кулинич А. И., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М.</i> Развитие спутниковой связи на судах в северных широтах	166
<i>Мальшев В. А., Иванов В. С., Соловей В. С.</i> Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса	172
<i>Приходько В. М., Приходько И. В., Лучкин В. Ю.</i> Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах	185
<i>Титов И. Л.</i> Использование эргономических систем в газовых и двухтопливных двигателях для распределения нагрузки	196
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ</b>	206
<i>Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В.</i> Предиктивное аperiodическое управление динамическими объектами на водном транспорте с использованием математического программирования	206
<i>Ковтун Н. Л.</i> Имитационный статистический анализ параметров технологических процессов на судах для прогнозирования надежности техники	215
<b>К 320-ЛЕТИЮ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА РОССИИ</b>	226
<i>Глебов Н. Б., Развозов С. Ю., Богословский В. А.</i> Вклад Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова в развитие военно-морского флота России	226



<b>OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION</b> .....	7
<i>Davydenko A. A.</i> Technological solutions for the unloading of containerized cargo on unequipped coast in the Arctic .....	7
<i>Ershov A. A., Razvozov S. J., Petuhov P. I.</i> Recommendation on maneuvering the vessel in ice conditions .....	20
<i>Akmaykin D. A., Klueva S. F., Salyuk P. A.</i> Results of researching the problem of forming a graph of vessel's route on the basis of algorithms of clustering .....	29
<i>Ermakov S. V.</i> Preventive regulation of the human factor in marine navigation .....	39
<i>Zub I. V., Ezhov Y. E.</i> Simulation model for safety assessment of manual handling equipment .....	50
<i>Kirsanov M. N.</i> Static analysis and mounting diagram of flat truss .....	61
<i>Nadeina E. V.</i> The problem of formation of communicative skills of modern navigators .....	68
<b>WATERWAYS AND HYDROGRAPHY</b> .....	76
<i>Kolosov M. A., Smirnov A. A.</i> Development of a friction system to protection gate navigation lock from ship impact .....	76
<i>Komkov I. V., Morgunov K. P., Semennikov A. V.</i> Investigation of concrete lock chamber Volgograd hydrounit .....	85
<i>Cheban A. Yu.</i> Development of channel sand deposits and irrigation and sand and gravel in the Primorsky Territory .....	97
<i>Thomson P. V., Titova A. V.</i> Design of algorithm transformations of plane rectangular coordinates in the Gauss–Krüger projection from zone to zone .....	103
<i>Kljuev V. V.</i> Quantitative assessment of constraint of the Northern Sea Route .....	109
<i>Konoshenkov A. A.</i> Research of flood safety of reservoirs .....	118
<i>Smirnov-Tumanov J. S., Panchenko N. M.</i> The development of laboratory installation to study the filtration properties of the combined sand-gravel mixture .....	128
<b>SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES</b> .....	134
<i>Kostylev I. I., Konjaev D. V.</i> Bunkering operations as a restraining factor in natural gas use for vessel fueling .....	134
<i>Volintsev A. V., Sobolenko A. N.</i> Utilization of main ship engine heat resources by means of heat pump installation usage .....	144
<i>Bulgakov V. P., Chebotarev Yu. V., Ruban I. N.</i> The influence of the chemical heterogeneity of the casting of the piston alloy AlSi12Cu2MgNi (AL25) the scoring in the cylinder-piston group .....	151
<i>Grigoryev A. V., Vasil'ev A. Ju., Malyshev S. M.</i> Analysis of capability of using of high-voltage electric power plants for ships with electric propulsion systems .....	159
<b>ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS</b> .....	166
<i>Kulinich A. I., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M.</i> Development satellite communication on ships in the Northern latitudes .....	166
<i>Malyshev V. A., Ivanov V. S., Solovey V. S.</i> Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker .....	172

edition **5(39)**  
**2016**

**EDITOR-IN-CHIEF**

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

**Deputy Editor-in-Chief**

**T. A. Pantina**  
doctor of economic Sciences, Prof.  
PantinaTA@gumrf.ru

**S. Gutsma** —  
Rector of the Maritime Academy  
(g.Schetsin, Poland), doctor of  
technical Sciences, Prof.

**G. V. Yegorov** —  
General Director of “Marine  
Engineering Bureau - St.  
Petersburg”, doctor of technical  
Sciences, Prof.

**F. V. Karmazinov** —  
General Director “Vodokanal  
of St. Petersburg”, doctor of  
technical Sciences, Prof.

**R. Kachin'ski** —  
Vice-Rector for Development  
and Cooperation of the Technical  
University (Bialystok, Poland),  
doctor of technical Sciences, Prof.

**A. I. Poshivay** —  
Deputy Head of the Federal  
Agency of Sea and River  
Transport

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

**R. M. Yusupov** —  
director of “St. Petersburg  
Institute for Informatics and  
Automation of RAS”, doctor  
of technical Sciences, Prof.,  
corresponding member of the  
Russian Academy of Sciences

**EDITORIAL STAFF:**  
E-mail: journal@gumrf.ru  
<http://journal.gumrf.ru>

**Editorial  
Collegium:**

*O. K. Bezyukov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*V. V. Veselkov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*P. A. Garibin*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*D. P. Goloskokov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*Y. M. Iskanderov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*O. G. Karatayev*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. V. Kirichenko*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*M. A. Kolosov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*Ye. A. Koroleva*,  
doctor of economic Sciences, Prof.  
*I. I. Kostylev*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. L. Kuznecov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*Ye. A. Lavrentyeva*,  
doctor of economic Sciences, Prof.  
*A. Yu. Lastovtsev*,  
candidate of technical Sciences, Prof.  
*V. A. Loginovskiy*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*G. V. Makarov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*V. Ye. Marley*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. M. Nikitin*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. P. Nyrkov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*L. I. Pogodayev*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*V. I. Reshnyak*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*V. V. Romanovskiy*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. A. Sikarev*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*S. V. Smolentsev*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. L. Stepanov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*M. V. Sukhoterin*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*Ye. G. Trunin*,  
candidate of economic Sciences,  
General Director  
of FSI Russian River Register  
*V. I. Chernenko*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*V. B. Chistov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.  
*A. A. Yershov*,  
doctor of technical Sciences,  
Associate Prof.  
*A. P. Gorobtsov*,  
candidate of technical Sciences,  
Associate Prof.  
*B. A. Smyslov*,  
Candidate of Law, Prof.  
*A. Yu. Sharonov*,  
candidate of Geography, Associate Prof.  
*A. Ye. Sazonov*,  
doctor of technical Sciences, Prof.

<i>Prikhodko V. M., Prikhodko I. V., Lucchino V. Yu.</i> Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system .....	185
<i>Titov I. L.</i> Ergonomic use systems in gas and dual fuel engines for load balancing .....	196
<b>INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT .....</b>	<b>206</b>
<i>Saharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V.</i> Predictive aperiodic control of dynamic objects on water transport using mathematical programming .....	206
<i>Kovtun N. L.</i> Simulation statistical analysis of parameters of engineering processes on vessels for prediction of reliability of equipment .....	215
<b>IN HONOUR OF THE 320 ANNIVERSARY OF RUSSIAN NAVY .....</b>	<b>226</b>
<i>Glebov N. B., Razvozov S. J., Bogoslovskij V. A.</i> Contribution of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping in the development of Russian navy .....	226

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-7-19  
УДК 656.614.3

А. А. Давыденко

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ВЫГРУЗКЕ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ НА НЕОБОРУДОВАННОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

*Рассмотрены вопросы организации внепортовой выгрузки контейнеров в условиях Арктики. Проанализированы известные технологические решения по выгрузке грузов на необорудованное побережье, применяющиеся как в России, так и за рубежом, полезные модели, направленные на организацию временных выгрузочных мест. Особое внимание уделено опыту вооруженных сил по выгрузке воинских грузов. Отмечено отсутствие апробированных технологий перегрузки массовых контейнерных грузов. Выделена проблема отсутствия отечественных береговых мобильных перегрузочных средств. Определён функциональный профиль лихтерной системы с учетом интересов всех возможных участников транспортной деятельности в регионе. Предложена новая транспортно-технологическая система, опирающаяся на специализированные модули стандарта ЛЭШ, перевозимые на имеющемся ледокольном атомном лихтеровозном судне «Севморпуть». В основу системы положены разнофункциональные плавсредства единого формата, конструктивно предназначенные для перевозки как контейнеров, так и иных грузов укрупненных номенклатур, в том числе колесной и гусеничной техники. Береговая часть системы состоит из таких же модулей, имеющих специализацию понтонно-причальных. Указанный состав системы предполагает проведение выгрузочных работ в три этапа. На первом этапе выгрузочными средствами судна на воду выставляются понтонно-причальные модули и транспортно-буксирные аппаратные баржи. Баржами на берег свозятся полевые контейнероподъемники и формируются плавпричалы. На втором этапе грузовыми средствами судна на воду спускаются специализированные плавсредства, на которые устанавливаются грузы. Буксируемые баржами плавсредства доставляются к плавпричалам, где производится выгрузка своим ходом, либо с использованием полевых ричстакеров. На третьем этапе аппаратные баржи забирают ричстакеры и понтонно-причальные модули с побережья и доставляют их к борту судна. Грузовыми средствами лихтеровоза ричстакеры из трюмов барж, сами баржи и специализированные модули грузятся на судно. Определен перечень вопросов для дальнейшего решения проблемы внедрения контейнерных технологий для необорудованного побережья.*

*Ключевые слова: контейнер, внепортовая выгрузка, транспортно-технологическая система, специализированный модуль стандарта ЛЭШ.*

### Проблема выгрузки генеральных грузов на необорудованный берег

В современных условиях Российская Федерация развивает разностороннее присутствие в Арктике и в дальневосточных регионах. Разносторонность определяется как широкой ведомственной принадлежностью реконструируемых (возрождаемых) и вновь создаваемых объектов, так и их масштабом — от вновь строящихся заводов и портов с сопутствующей инфраструктурой до отдельных военных городков и точечных объектов. Во всех случаях любая деятельность начинается с первичной доставки материальных средств на возрождаемый (создаваемый) объект. Объемы грузов первичной доставки целесообразно разделить на три укрупненные группы:

- грузы для размещения, первичного обустройства и жизнеобеспечения личного состава (строителей, военнослужащих и других категорий лиц);
- строительные материалы и оборудование для дальнейшего собственного обустройства;
- строительные материалы и оборудование для возводимого объекта.

Грузы первичной доставки, независимо от характера объекта, являются генеральными, однако развитых береговых средств для их выгрузки ещё нет, поэтому, для крупных объектов необходимо формирование опережающей портовой инфраструктуры для последующего приёма крупных партий строительных грузов; для точечных объектов подобная инфраструктура может быть вовсе не предусмотрена. Следовательно, в любом случае предполагается внепортовая выгрузка судов (в том

числе судов-снабженцев) на необорудованное побережье, достаточно часто — на ледовый припай, на галечные пляжи при мелководье и т. д. Объемы отдельных партий снабженческих грузов в адрес одного получателя при экспедиционном северном завозе составляют от трех-пяти до 500 т.

Для внепортовой выгрузки небольших партий разнородных генеральных грузов многолетний опыт экспедиционного завоза выработал два основных подхода:

- выгрузка с использованием рейдовых плавсредств (РПС — различной конструкции) [1], [2];
- выгрузка с использованием рейдовых воздушных средств (РВС — вертолетов) [1], [3].

Проблема заключается в том, что в иных от арктических условиях продолжается общемировое явление контейнеризации генеральных грузов. Это привело как к изменению облика самой массы коммерческих грузов, так и к изменению облика транспортных судов — к неуклонному снижению абсолютного и относительного числа универсальных сухогрузных судов, обладающих собственными грузовыми средствами, способными сгружать на плаву и поднимать обратно возимые РПС и производить их загрузку. С другой стороны, отсутствие необходимых технологических средств на берегу делает невозможным выгрузку контейнеров из РПС (в ряде случаев предусматривалась ручная выгрузка генеральных грузов из РПС (рис. 1), что было обусловлено соответствующими весами отдельных грузовых мест).

а)



б)



Рис. 1. Северный экспедиционный завоз 1960 – 1980-е гг.: ручная выгрузка рейдовых плавсредств (а, б)

Таким образом, выявляется противоречие между формирующимся современным обликом контейнеризованного груза и мультимодальными технологиями его доставки на специализированных транспортных средствах — с одной стороны, и отсутствием технологических возможностей выгрузки контейнеризованного груза в конечных пунктах, находящихся во внепортовых условиях российской Арктики и Дальнего Востока.



Рис. 2. Съезд бортового автомобиля с аппарельной баржи «Восток»

### Анализ современных технологических решений по выгрузке грузов на необорудованное побережье

Произведённый анализ показал наличие нескольких направлений развития технологий внепортовой выгрузки генеральных грузов.

1. Погрузка грузов с судов в кузовы автомобилей (иных наземных транспортных средств, включая волокуши), предварительно размещенных в РПС аппарельного типа. Таким образом, достигается возможность самостоятельного съезда груженого автомобиля с РПС (рис. 2), его следование к месту окончательной



доставки груза с последующей выгрузкой в стационарных условиях. Затем порожний или груженный обратным грузом автомобиль отвозится РПС обратно к борту судна, где цикл повторяется. Разумеется, указанный способ не рассчитан на выгрузку крупнотоннажных контейнеров.

2. Применение в качестве элементов РПС и временных причалов табельных средств инженерных, дорожных войск и морской инженерной службы ВМФ — ряд технических и технологических решений разработан и применен в Вооружённых силах Российской Федерации [4] – [9]. В частности, элементы системы понтонно-мостового парка (ПМП) позволяют, выступая в роли своеобразного «конструктора», формировать варианты временных плавпричалов сообразно их предназначению (для судов небольшого водоизмещения, для рейдовых плавсредств) и условиям конкретного берега, как показано на рис. 3 – 5. Аналогично можно использовать элементы наплавного автодорожного разборного моста (НАРМ).

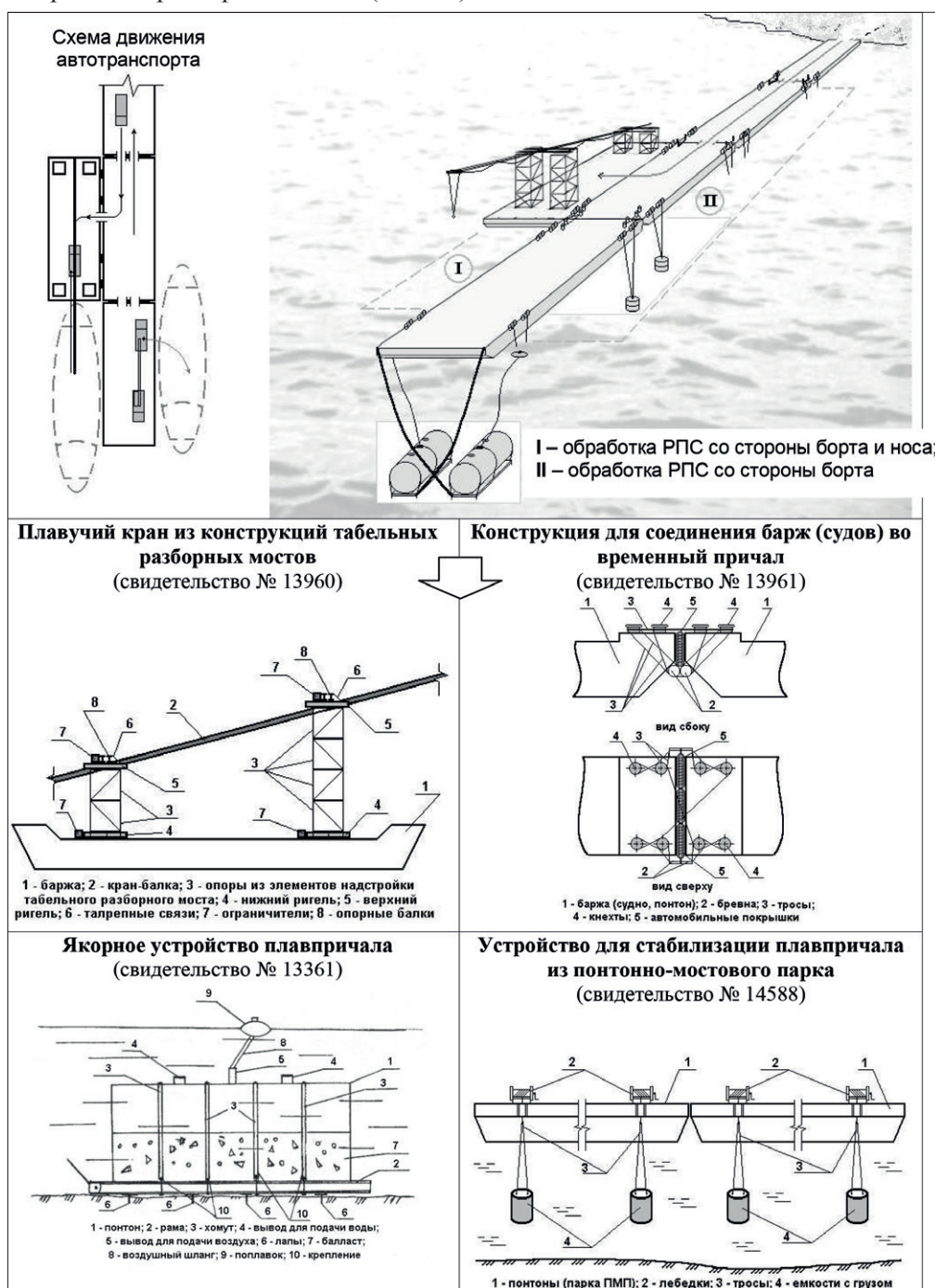


Рис. 3. Комплекс технических решений в технологическом звене «рейдовое перегрузочное средство – берег» (состоит из отдельных технологических элементов, показанных на рисунке)

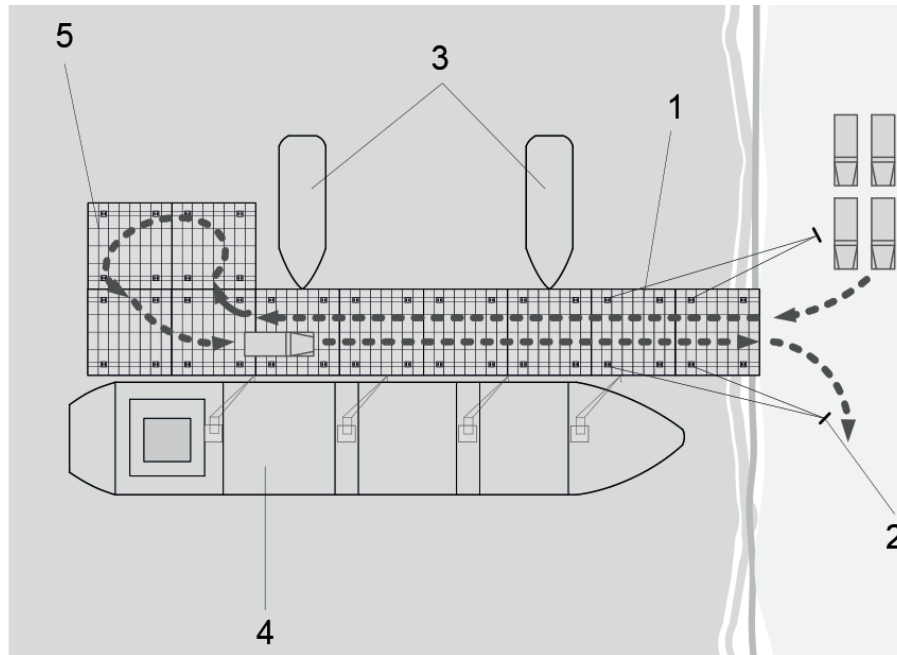


Рис. 4. Схема погрузки (выгрузки) грузов и техники с использованием плавучего причала из звеньев ПМП (НАРМ) (не в масштабе):

- 1 — понтонное звено ПМП (НАРМ);
- 2 — береговой натяжной упор для создания устойчивости конструкции;
- 3 — буйсы; 4 — судно, подлежащее погрузке (выгрузке);
- 5 — понтонные звенья ПМП (НАРМ) для разворота автомобильной техники

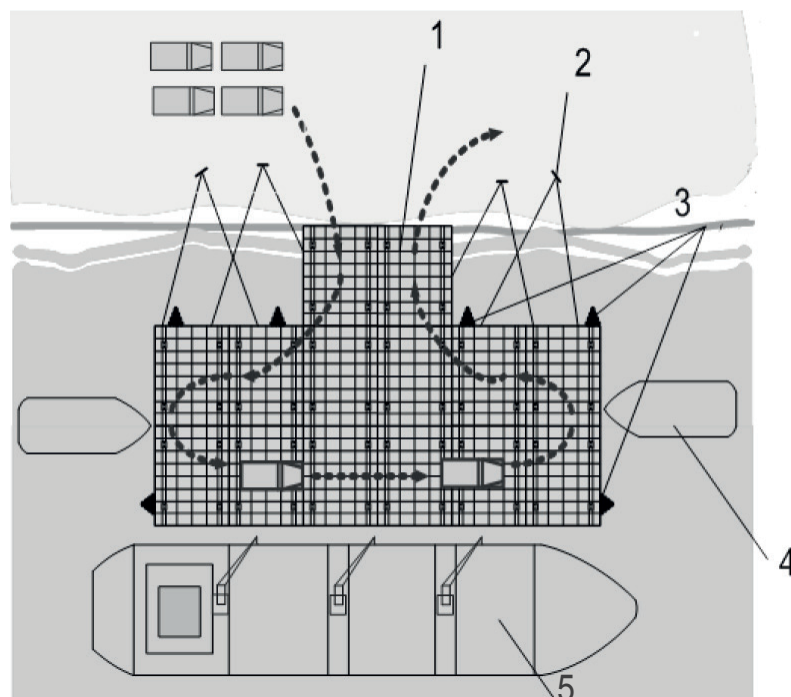


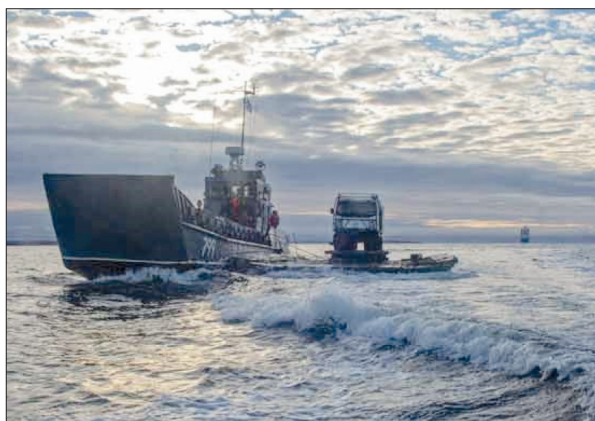
Рис. 5. Схема погрузки (выгрузки) грузов и техники с использованием плавучего причала из звеньев ПМП (НАРМ) (не в масштабе):

- 1 — понтонное звено ПМП (НАРМ);
- 2 — береговой натяжной упор для создания устойчивости конструкции;
- 3 — конструкция закрепления причала; 4 — буйсы, обеспечивающие устойчивость конструкции;
- 5 — судно, подлежащее погрузке (выгрузке)

Временный причал из звеньев ПМП (НАРМ) грузоподъемностью 60 т и более допускает движение тяжелой техники со скоростью до 30 км/ч, а также движение грузовых автомобилей в два ряда, по своей массе не превышающих половины грузоподъемности временного причала.

Кроме того, звенья ПМП могут быть использованы в качестве буксируемого РПС. Таким способом была осуществлена выгрузка материальных средств на о. Котельный, которая началась 12 сентября 2014 г. В качестве РПС использовались разгружаемые автокраном звенья ПМП (рис. 6); контейнеры и бытовые блоки выгружались вертолетами Ми-26 (рис. 7). Общая продолжительность разгрузки судов составила 99 ч. Всего на о. Котельный было доставлено 46 ед. техники, более 300 т имущества, четыре 20-футовых контейнера с продовольствием и 17 социально-бытовых блоков, около 130 четырехтонных резервуаров с арктическим дизельным топливом и около 800 двухсотлитровых стальных бочек с различными горючесмазочными материалами [10]. Разумеется, рассмотренная технология не является эффективной ни по временным и ресурсным затратам, ни по «грузоприменности».

а)



б)



Рис. 6. Использование звеньев ПМП в качестве рейдовых плавсредств:

а – буксировка груженого звена ПМП;

б — разгрузка звена ПМП автокраном



Рис. 7. Выгрузка социально-бытового блока вертолётом Ми-26



3. *Формирование комплексной контейнерной транспортно-технологической системы внепортовой обработки судов* — в существенной степени реализовано в вооружённых силах США и ряда стран НАТО [11]. Для того, чтобы справляться с задачами плановых и чрезвычайных перевозок, Минобороны США (DoD) стало одним из самых крупных провайдеров и является самым крупным потребителем транспортных услуг в мире [12]. Для этого оно полагается как на собственные ресурсы, так и на ресурсы всего коммерческого сектора. Эти ресурсы включают в себя всю инфраструктуру, на основе которой осуществляются услуги по транспортировке материалов, персонала, личного имущества и которая в своем большинстве ориентирована на контейнеры. Общая стоимость всех военных транспортных услуг США в год составляет около 10 млрд долл. США, из которых 3,5 млрд долл. США идут на оплату вспомогательных услуг частного бизнеса. Морским и наземными видами транспорта Транспортное командование ВС США (USTRANSCOM) перевозит около 11 млн т воинских грузов в год, большая часть которых транспортируется в 180 тыс. контейнерах. Кроме того, в год осуществляется около 600 тыс. индивидуальных отправок домашних вещей военнослужащих и членов их семей. Как и большинство перевозчиков, USTRANSCOM работает по принципу грузового центра типа «единого окна» для вооруженных сил.

В остальных странах – участницах блока НАТО морской составляющей интермодальных схем по очевидным причинам уделяется меньше внимания. Тем не менее, поскольку контейнеризация и стандартизация технологий грузообработки являются системообразующим элементом объединенной логистической доктрины НАТО [13], интермодальное контейнерное оборудование для смежного транспорта в ВС этих стран представлено весьма широко [14] – [16]. Подтверждением тому служат трудности, испытываемые транспортно-логистическими службами новых членов НАТО при включении в объединенную логистическую систему [17].

Сегодня более 90 % всего груза на поддонах (исключая боеприпасы) и около 30 % оборудования (малые транспортные средства и трейлеры) могут перевозиться в контейнерах. Около 95 % колесной техники (внедорожники, грузовики) могут перевозиться на платформах-контейнерах (флетраках). Большинство используемых в странах НАТО контейнеров являются 20- или 40-футовыми, стандартными (высотой 8½ фута) или «высокими» (высотой 9½ фута). Это объясняется тем, что около 75 % судов, связанных с перевозками для тех или иных видов вооруженных сил, имеют структуру трюмов с ячейками под 40-футовые контейнеры. Контейнеры с нестандартным по размерам грузом помещаются в верхних ярусах палубного штабеля. В конечном итоге выбор основывается на том, насколько эффективна его перевозка и обработка по планируемому маршруту.

В воинских перевозках широко используются также контейнеры с открытой стенкой, открытым верхом, рефрижераторные контейнеры, танк-контейнеры, флетраки, контейнеры половинной высоты и модульные. Большинство этих контейнеров согласуются со стандартами ISO. Хотя все контейнеры либо принадлежат ведомствам различных видов вооруженных сил, либо арендуются ими, во время транспортировки все они находятся под контролем вооруженных сил.

В качестве технологической основы выполнения погрузочно-разгрузочных работ с контейнерными воинскими грузами во внепортовых условиях используются:

– береговые мобильные перегрузочные средства специальной конструкции; в качестве примера на рис. 8 показаны контейнерные автопогрузчики, разработанные для армии США гражданскими производителями — компаниями «Kalmar» и «Caterpillar»;

– рейдовые выгрузочные комплексы специальной конструкции, включающие буксируемые плавпричалы. В ряде случаев универсальным решением, содержащим несколько вариантов выгрузки, может служить полупогружное судно специальной конструкции (рис. 9).





Рис. 8. Контейнерные автопогрузчики для пересеченной местности (Rough Terrain Container Handler, RTCH) армии США

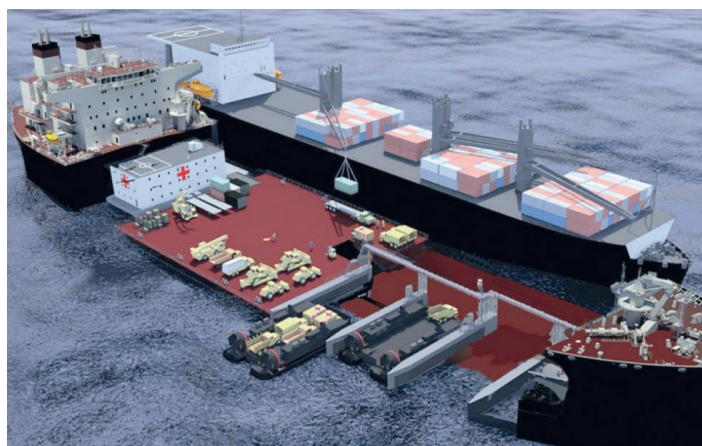


Рис. 9. Выгрузка контейнеров на амфибийные рейдовые средства с использованием полупогружного судна (ист. — [https://en.wikipedia.org/wiki/USNS\\_Montford\\_Point\\_%28T-ESD-1%29](https://en.wikipedia.org/wiki/USNS_Montford_Point_%28T-ESD-1%29))

Столь длительный и затратный путь развития инфраструктурной составляющей системы воинских перевозок США и стран НАТО должен быть если не заимствован, то, по крайней мере, скрупулезно изучен.

### Перспективные технологические решения

Контейнеризация перевозок магистральными видами транспорта в отдалённые районы, где предусматривается внепортовая выгрузка, обуславливает возможность решения ряда взаимосвязанных задач, таких как:

– унификация грузовых мест, позволяющая консолидировать партии грузов несовместимых либо трудносовместимых в одном грузовом помещении номенклатур, что дает возможность более эффективно использовать наличную грузоместимость транспортных средств;

– отказ от использования отсутствующего в настоящее время в достаточном количестве универсального железнодорожного подвижного состава (крытых вагонов, полувагонов, отчасти — настильных платформ);

– использование для снабженческих перевозок (так как в настоящее время отсутствуют в достаточных количествах универсальные сухогрузные суда) специализированных фидерных контейнеровозов, судов смешанного «река – море» плавания, судов-площадок.

Однако применение в качестве базовых модулей, а также средств укрупнения грузовых мест крупнотоннажных контейнеров предполагает ряд проблемных вопросов, основным из которых является невозможность эффективного производства погрузочно-разгрузочных работ во внестанционных и внепортовых условиях при отсутствии на вооружении отечественного специализированного перегрузочного оборудования.

В частности, возможности, предлагаемые имеющимися сегодня средствами внепортовой обработки для контейнеризованного груза, в общем виде представлены на рис. 10 [18]. На рисунке тыловая компонента (доставка грузов между морским фронтом и берегом) условно показана в самом сокращенном варианте, обычно характерном для этих специальных видов транспортных систем.

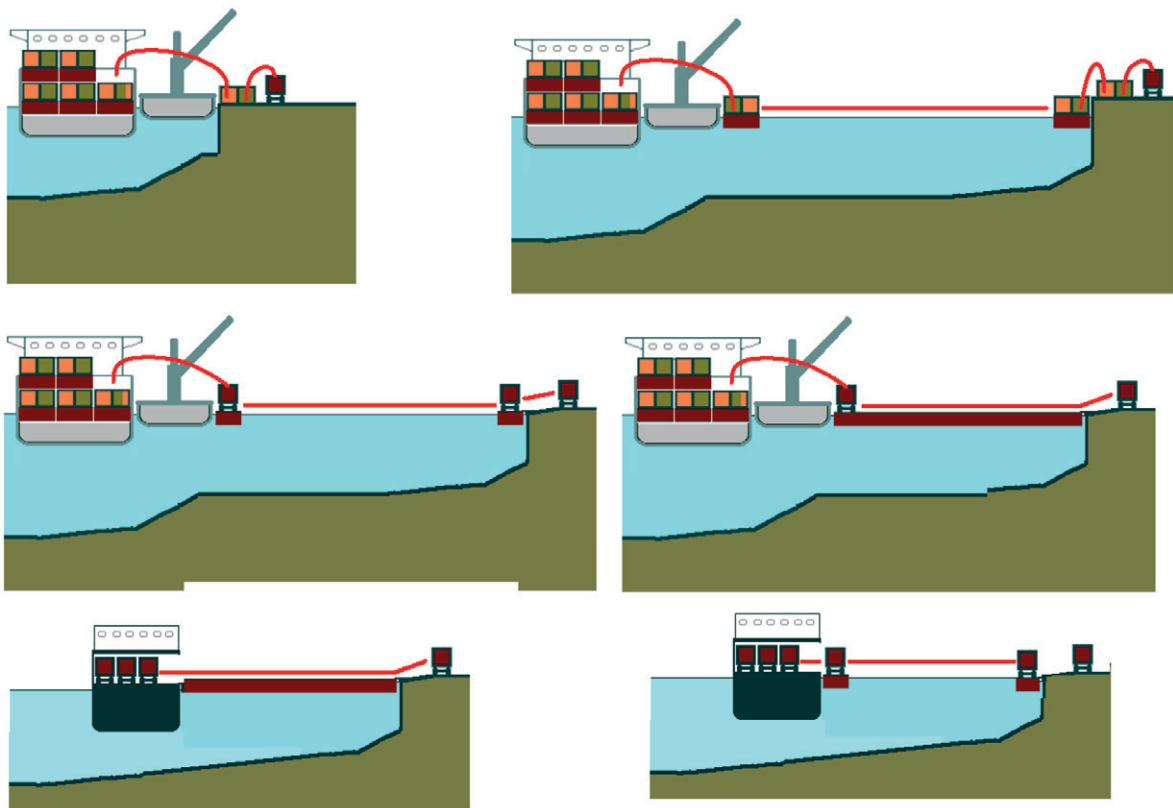


Рис. 10. Общие схемы внепортовой обработки контейнеризованного груза

В то время как спектр специализированного перегрузочного оборудования для контейнерных перевозок уже сформировался и достаточно изучен, формирование парка средств внепортовой обработки контейнеров требует тщательного анализа соответствия каждого класса и вида традиционных технических средств специальным требованиям, а в ряде случаев — и разработки новых, таких как упоминавшиеся мобильные контейнероподъемники для пересеченной местности (см. рис. 9) или, например, амфибийные средства, подобные существующим ныне, но с достаточной грузоподъемностью для транспортировки контейнеров (рис. 11).

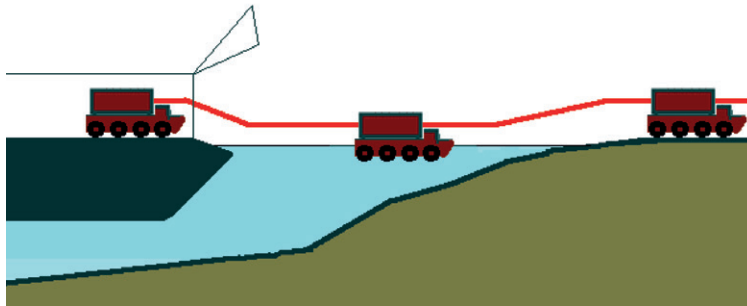


Рис. 11. Использование амфибий для передачи груза между судном и берегом

При необходимости обработки контейнерных или иных укрупненных грузовых единиц на необорудованном берегу от борта судна могут формироваться пирсовые плавпричалы из лихтеров или понтонов, последний из которых может заканчиваться аппарелью. В ином варианте оборудованный аппарелью лихтер с подъемно-транспортным средством (например, ричстакером для пересеченной местности) может быть вплавь доставлен к берегу для обслуживания прибывающих после этого к прибрежному плавучему или причалу обычных лихтеров с контейнерными грузами. Количество разнообразных вариантов построения соответствующей схемы может быть весьма велико. В то же время все преимущества перечисленных вариантов могут быть интегрированы в единое транспортно-технологическое решение с помощью использования судна для перевозки барж или лихтеровоза.

Лихтеровозные системы доказали свою эффективность, в США они составляют одну из главных компонент. В Российской Федерации, в отличие от бывшего СССР, лихтеровозные системы отсутствуют. Исключение составляет уникальная сверхмощная система на ледокольном атомном лихтеровозном судне «Севморпуть» (рис. 12), реконструированном в 2016 г. Судно предназначено для транспортировки грузов в лихтерах и контейнерах в отдаленные северные районы и способно самостоятельно следовать во льдах толщиной до 1 м.



Рис. 12. Ледокольно-транспортное судно (лихтеровоз-контейнеровоз) с атомной силовой установкой «Севморпуть»

Наличие судна-лихтеровоза с уникальными характеристиками обеспечивает масштабное логистическое преимущество для обслуживания всех арктических грузопотоков.

Для наиболее полной реализации потенциального преимущества необходимо развитие сбалансированной по функциональным возможностям системы лихтеров. Функциональный профиль системы должен быть определен с учетом интересов всех возможных участников транспортной деятельности в регионе.

Предлагается транспортно-технологическая система, состоящая из следующих компонентов:

- ледокольно-транспортное судно (лихтеровоз) с ядерной силовой установкой, оборудованное дополнительными кранами;
- специализированные модули стандарта ЛЭШ — понтонно-причалные, трюмные, площадки аппарельные трюмные, аппарельные площадки (рис. 13);
- транспортно-буксирные аппарельные баржи (ТБАП), например, типа «Танкист»;
- полевые контейнерные погрузчики (ричстакеры).



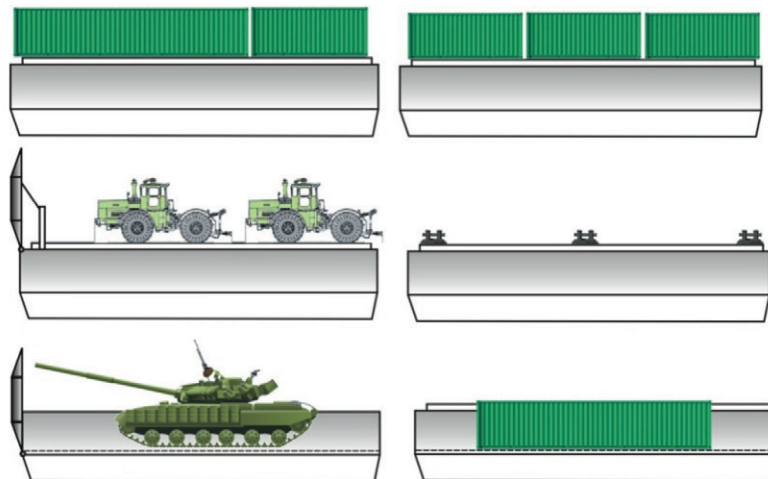


Рис. 13. Варианты специализации модулей стандарта ЛЭШ

Порядок работы у необорудованного побережья (рис. 14):

- 1) выгрузка ричстакеров в ТБАП-ах;
- 2) выгрузка понтонно-причальных модулей (ППМ);
- 3) наведение ТБАП-ами плавпричала;
- 4) выгрузка гружёных специализированных модулей (рейдовая выгрузка контейнеров на специализированные модули), их буксировка к плавпричалу и берегу ТБАП-ами, разгрузка ричстакерами и своим ходом;
- 5) отвоз ричстакеров ТБАП-ами на ледокольно-транспортное судно;
- 6) отвоз понтонно-причальных модулей и их обратная погрузка на судно.

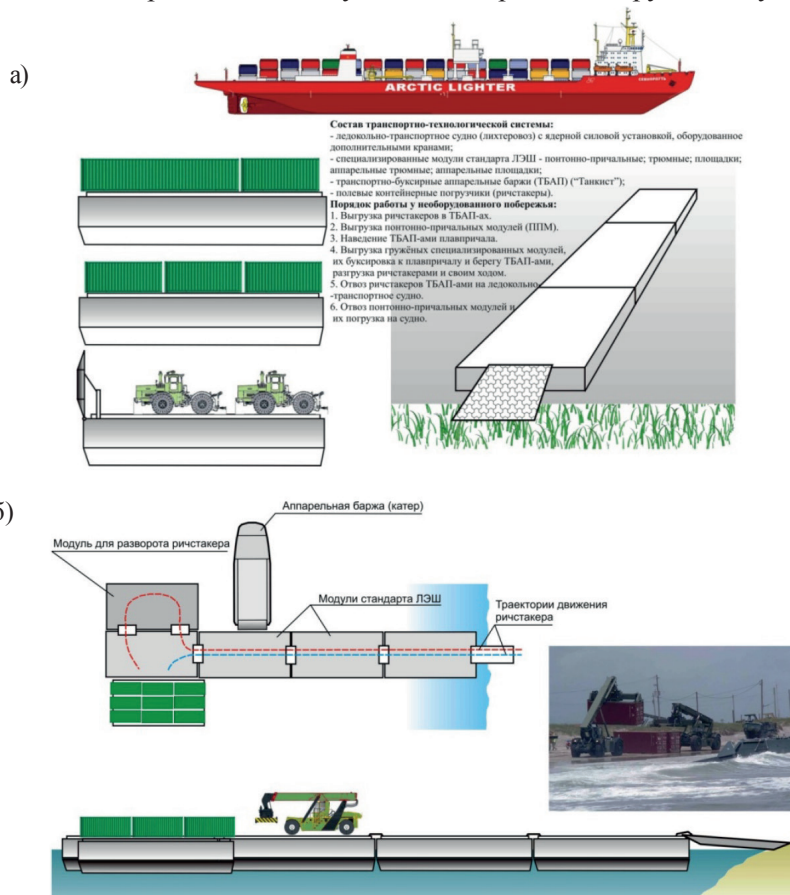


Рис. 14. Основные элементы и компоновка лихтерной транспортно-технологической системы для работы на необорудованном побережье (а, б)

## Выводы

Проведенное исследование показало, что двумя основными направлениями формирования технологических решений в береговом звене при внепортовой обработке судов с контейнерными грузами являются:

– разовое нетиповое использование технических приспособлений (средств) инженерного имущества при минимально необходимом применении специализированных рейдовых плавсредств обеспечивает минимальную производительность при минимальных затратах на содержание; применяется при эпизодических перевозках;

– формирование специализированного парка для систематического производства погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) обеспечивает высокую производительность при существенных затратах на комплектацию и содержание; применяется при постоянных (массовых) перевозках.

Разработан «компромиссный» вариант технологической системы, обеспечивающий высокую производительность ПРР при сезонных перевозках (экспедиционном завозе). Перечень вопросов, требующих дальнейшего изучения в связи с реализацией предложенного варианта, определяется следующим образом.

1. Формирование требований к структуре и показателям работы контейнерной транспортно-технологической схемы и арктическому логистическому комплексу, включающему последнюю в качестве компоненты.

2. Оценка требуемых ресурсов и разработка программы создания транспортно-технологической схемы и арктического логистического комплекса Российской Федерации.

3. Обоснование облика, типов и численности парка специализированного перегрузочного оборудования в соответствии со сформулированной доктриной использования.

4. Разработка технологий производства перегрузочных работ в необорудованных пунктах.

5. Формирование централизованной и распределенных систем управления логистическими цепями различных уровней.

6. Разработка имитационных моделей, критериев и алгоритмов оптимизации по этим критериям интегрированных систем материально-технического и транспортного обеспечения, основанной на контейнеризации.

7. Составление перечня необходимых мероприятий и оценка финансовых затрат на их реализацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степанец А. В.* Организация и технология обработки судов в рейдовых условиях / А. В. Степанец. — Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1984. — 156 с.

2. *Gorshkov S. G.* The Oceans and the Sea Power of the State / S. G. Gorshkov // The Sea Power of the State. — Elsevier Ltd., 1979. — Pp. 1–58. DOI:10.1016/B978-0-08-021944-8.50005-6.

3. *Изотов О. А.* Технология и безопасность транспортных операций. Обработка судов в необорудованных пунктах российской Арктики / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, С. В. Латухов, В. А. Никитин / отв. ред. А. В. Кириченко, В. М. Ушаков. — СПб.: Островитянин, 2013. — 303 с.

4. Пат. 13961 Российская Федерация, МПК Е 01 D 19/00. Конструкция для соединения барж (судов) в наплавной мост (временный причал) / В. Н. Мячин, И. А. Иващенко, В. А. Забенин, А. М. Морозов, А. В. Кириченко, С. В. Ситников; заявитель Военная академия тыла и транспорта. — № 2000103557/20; заявл. 11.02.2000; опубл. 20.06.2000; Бюл. № 17.

5. Пат. 13960 Российская Федерация, МПК Е 01 D 15/12. Плавающий кран из конструкций табельных разборных мостов / В. Н. Мячин, И. А. Иващенко, А. А. Хорошилов, А. В. Кириченко, В. А. Забенин, С. В. Ситников; заявитель Военная академия тыла и транспорта. — № 2000103782/20; заявл. 15.02.2000; опубл. 20.06.2000; Бюл. № 17.

6. Пат. 13361 Российская Федерация, В 63 В 22/04. Якорное устройство наплавного моста (временного причала) / Ю. А. Найденов, М. А. Самсаков, А. В. Кириченко, А. М. Морозов, Ю. В. Танасюк, А. А. Заец, С. В. Ярошенко; заявитель Военная академия тыла и транспорта. — № 99123754/20; заявл. 12.11.1999; опубл. 10.04.2000; Бюл. № 10.

7. Пат. 14588 Российская Федерация, МПК Е 01 D 15/14. Устройство для стабилизации наплавного моста из понтонно-мостового парка / В. Н. Мячин, И. А. Ивашенко, В. А. Забенин, А. В. Кириченко, И. В. Колесников, А. А. Хорошилов; заявитель Военная академия тыла и транспорта. — № 2000106174/20; заявл. 15.03.2000; опубл. 10.08.2000; Бюл. № 22.

8. Пат. 68006 Российская Федерация, МПК Е 01 D 15/14, В 63 В 35/28. Конструкция соединения барж-площадок во временный причал / Д. А. Климов, Ю. Д. Кравец, А. А. Мостовой, В. А. Сыровченко, Е. В. Лётин, А. В. Ничай; патентообладатель Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии А. В. Хрулева. — № 2007119008/22; заявл. 21.05.2007; опубл. 10.11.2007; Бюл. № 31.

9. Пат. 83235 Российская Федерация, МПК В 63 С 1/02. Временный причал для погрузки (выгрузки) войск, воинских грузов и техники / Ю. Д. Кравец, Д. А. Климов, А. А. Мостовой, В. А. Сыровченко, А. В. Ничай; патентообладатель Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии А. В. Хрулева. — № 2008111354/22; заявл. 24.03.2008; опубл. 27.05.2009; Бюл. № 15.

10. Курс на Арктику // Ориентир. — 2014. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://orientir.milportal.ru/kurs-na-arktiku/> (дата обращения: 15.07.2016).

11. *Muller G.* Intermodal freight transportation / G. Muller. — 4-th edition. — Washington (DC), USA: Eno Transportation Foundation, 2003. — 437 p.

12. NATO Logistics Handbook, NATO HQ. — Brussels, Belgium, 2007. — 226 p.

13. АТР 4-12 (FM 55-80) Army Techniques Publication, No. 4-12. Department of the Army. Washington, DC. — 2013. — 54 p.

14. Allied Joint Logistical Doctrine, ALP-4(A). — NATO Standardization Agency, 2003. — 78 p.

15. Контейнероподъемники для пересеченной местности. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://topwar.ru/27117-konteyneropodemniki-dlya-peresechennoy-mestnosti.html> (дата обращения: 16.07.2016).

16. Military Pallets, Boxes and Containers – Part 3 Containers and Flat Racks [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.thinkdefence.co.uk/2014/11/military-pallets-boxes-containers-part-3-containers/> (дата обращения – 17.07.2016).

17. *Zmieszalski W.* The integration problems of the military logistics systems of Poland and NATO. Research project / W. Zmieszalski. — Warsaw: Military university of technology, 1998. — 53 p.

18. *Кузнецов А. Л.* Схемы обработки морских торговых судов с контейнеризованным грузом / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко // Морской и речной транспорт. — 2014. — № 1 (8). — С. 45–47.

## TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE UNLOADING OF CONTAINERIZED CARGO ON UNEQUIPPED COAST IN THE ARCTIC

*The article deals with the organization of coastal pilotage unloading of containers in the Arctic. The known technical solutions for cargo unloading on unequipped coast, used both in Russia and abroad, utility models, aimed at organizing temporary unloading areas. Special attention is paid to the experience of the armed forces for the unloading of military cargo. The lack of proven technologies mass overload of container cargoes. Highlighted the problem of lack of domestic coastal mobile handling devices. Certain functional profile lightering systems, taking into account the interests of all potential participants in transport in the region. A new transport and technological system based on application-specific modules LASH standard carried the atomic icebreaker available LASH vessel "Northern Sea Route" has been proposed. The basis of the system is based on various craft a common format, structurally designed for the transport of containers and other cargo consolidated nomenclatures, including wheeled and tracked vehicles. The coastal part of the system consists of the same modules, specialized as pontoon-berthing. This part of the system involves a loading operation in three stages. At the first stage discharge port means of the vessel exhibited a pontoon-berthing modules and apparel barges. Work barges are brought ashore field reachstackers and floating piers are formed. In the second stage by cargo means of ship from it to water down specialized vessels, which have installed loads. Towed barge boat delivered to the floating dock, which made unloading of wheeled and tracked vehicles under its own power, or containers with reachstackers. In the third stage of the barge take reachstackers and pontoon berthing modules from the coast and deliver them to the ship's side. Reachstackers from the holds of barges, the barges themselves, and specialized modules are loaded on a ship by cargo facilities of lighter carrier. The list of questions for the further decision of problems of introduction of container technologies for unequipped coast.*

*Keywords: container, coastal pilotage unloading, transport and technological system, a specialized module LASH standard.*

## REFERENCES

1. Stepanec, A. V. *Organizacija i tehnologija obrabotki sudov v rejdovyh uslovijah*. Vladivostok: Izd-vo Dalnevostochnogo universiteta, 1984.
2. Gorshkov, S. G. "The Oceans and the Sea Power of the State." *The Sea Power of the State*, Elsevier Ltd., 1979, pp. 1–58. DOI:10.1016/B978-0-08-021944-8.50005-6.
3. Izotov, O. A., A. V. Kirichenko, S. V. Latuhov, and V. A. Nikitin. *Tehnologija i bezopasnost transportnyh operacij. Obrabotka sudov v neoborudovannyh punktah rossijskoj Arktiki*. Edited by A. V. Kirichenko, V. M. Ushakov. SPb.: Ostrovitjanin, 2013.
4. Mjachin, V. N., I. A. Ivashhenko, V. A. Zabenin, A. M. Morozov, A. V. Kirichenko, and S. V. Sitnikov. Konstrukcija dlja soedinenija barzh (sudov) v naplavnoj most (vremennyj prichal). Russian Federation assignee. Patent 13961. 20 June 2000.
5. Mjachin, V. N., I. A. Ivashhenko, A. A. Horoshilov, A. V. Kirichenko, V. A. Zabenin, and S. V. Sitnikov. Plavuchij kran iz konstrukcij tabelnyh razbornyh mostov. Russian Federation assignee. Patent 13960. 20 June 2000.
6. Najdenov, Ju. A., M. A. Samsakov, A. V. Kirichenko, A. M. Morozov, Ju. V. Tanasjuk, A. A. Zaec, and S. V. Jaroshenko. Jakornoe ustrojstvo naplavnogo mosta (vremennogo prichala). Russian Federation assignee. Patent 13361. 10 April 2000.
7. Mjachin, V. N., I. A. Ivashhenko, V. A. Zabenin, A. V. Kirichenko, I. V. Kolesnikov, and A. A. Horoshilov. Ustrojstvo dlja stabilizacii naplavnogo mosta iz pontonno-mostovogo parka. Russian Federation assignee. Patent 14588. 10 Aug. 2000.
8. Klimov, D. A., Ju. D. Kravec, A. A. Mostovoj, V. A. Syrovchenko, E. V. Ljotin, and A. V. Nichaj. Konstrukcija soedinenija barzh-ploshhadok vo vremennyj prichal. Russian Federation assignee. Patent 68006. 10 Nov. 2007.
9. Kravec, Ju. D., D. A. Klimov, A. A. Mostovoj, V. A. Syrovchenko, and A. V. Nichaj. Vremennyj prichal dlja pogruzki (vygruzki) vojsk, voinskih gruzov i tehniki. Russian Federation assignee. Patent 83235. 27 May 2009.
10. "Kurs na Arktiku." *Orientir* 2014. Web. 15 July 2016 <<http://orientir.milportal.ru/kurs-na-arktiku/>>.
11. Muller, G. *Intermodal freight transportation*. 4-th edition. Washington (DC), USA: Eno Transportation Foundation, 2003.
12. *NATO Logistics Handbook*. NATO HQ. Brussels, Belgium, 2007.
13. ATP 4-12 (FM 55-80) Army Techniques Publication, No. 4-12. Department of the Army. Washington, DC. 2013.
14. *Allied Joint Logistical Doctrine, ALP-4(A)*. NATO Standardization Agency, 2003.
15. Kontejneropodjemniki dlja peresechennoj mestnosti. Web. 16 July 2016 <<http://topwar.ru/27117-konteyneropodemniki-dlya-peresechennoj-mestnosti.html>>.
16. Military Pallets, Boxes and Containers – Part 3 Containers and Flat Racks. Web. 17 July 2016 <<http://www.thinkdefence.co.uk/2014/11/military-pallets-boxes-containers-part-3-containers/>>.
17. Zmiszalski, W. *The integration problems of the military logistics systems of Poland and NATO. Research project*. Warsaw: Military university of technology, 1998.
18. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Shemy obrabotki morskikh torgovyh sudov s kontejnerizirovannym gruzom." *Morskoy i rechnoj transport* 1(8) (2014): 45–47.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Давыденко Александр Александрович —  
 кандидат экономических наук.  
 Председатель.  
 Координационное транспортное совещание  
 государств-участников  
 Содружества Независимых Государств  
[kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Davydenko Aleksandr Aleksandrovich* — PhD.  
 Chairman.  
 Executive committee  
 of the Coordination Transport Meeting  
 of States-members of the Commonwealth  
 of Independent States  
[kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 17 августа 2016 г



## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МАНЕВРИРОВАНИЮ СУДНА В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ**

*В статье рассматриваются способы реализации требований Международного полярного кодекса, который вступает в силу с 1 января 2017 г. Ключевым требованием для выполнения требований этого документа является получение Свидетельства судна полярного плавания, для получения которого для каждого судна должны быть разработаны Наставления по эксплуатации судов в полярных водах. При создании данного документа необходимо разработать рекомендации по маневрированию конкретного судна в различных условиях ледового плавания. В настоящей статье для разработки данных рекомендаций предлагается использовать методы математического моделирования. Предложенные в настоящей статье подходы позволяют проанализировать и выработать рекомендации для каждого конкретного судна применительно к конкретным условиям ледового плавания. На основании результатов систематических расчетов с использованием математических моделей, предложенных в настоящей работе, сделан вывод об эффективности маневра «Курс от льдины» при расхождении с отдельными льдинами, а также подтверждены существующие рекомендации по ледовому плаванию судов. Показано, что применение методов математического моделирования маневрирования судна в различных условиях ледового плавания позволит не только выполнить требования Международного полярного кодекса, но и обеспечить безопасное плавание судов в ледовых условиях. В статье показано, что методы математического моделирования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов и конструкций по плаванию в различных ледовых условиях. Они могут быть предложены мировому морскому сообществу как основной метод для исследования вопросов безопасности ледового плавания, разработки рекомендаций для движения во льдах судов различных типов и конструкций, по подготовке судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.*

*Ключевые слова:* Международный полярный кодекс, ледовое плавание судов, математическое моделирование в различных условиях ледового плавания.

### **Введение**

В настоящее время безопасность плавания в полярных водах регулируется основными конвенциями ИМО в этой области: СОЛАС-74, ПДНВ-78, о Грузовой марке, а аспекты предотвращения загрязнения — конвенциями МАРПОЛ 73/78 и о контроле за вредными противобродами системами на судах. Ожидается вступление в силу Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими.

С 1 января 2017 г. международное судоходство, в дополнение к указанным документам, должно отвечать требованиям «Международного кодекса для судов, эксплуатируемых в полярных водах» (далее — МПК) [1], являющегося обязательным в соответствии с конвенциями СОЛАС-74 и МАРПОЛ 73/78 [2] – [4]. Требования МПК к безопасности не распространяются на суда, совершающие рейсы между портами только Российской Федерации, и такие суда являются предметом Кодекса торгового мореплавания (далее — КТМ) РФ и иных применимых отечественных нормативно-правовых документов.

Плавание судов в акватории Северного морского пути (СМП) регулируется «Правилами плавания», введенными Приказом Минтранса России от 17.01.2013 г. № 7 [5]. Видом регулируемого этими Правилами режима является разрешительный режим, предусматривающий предоставление разрешения на плавание в акватории СМП на основании заявок, указывающих техническую подготовку судна к плаванию, готовность экипажа и характер перевозимого груза.

С вводом в действие МПК в состав документов, включаемых в заявку, в общем случае необходимо включить Свидетельство судна полярного плавания (ССПП) и Наставления по эксплу-



атации судов в полярных водах (НЭПВ), на основании которых Администрация СМП будет выносить решения о выдаче или отклонении разрешений на плавание в акватории СМП. Кроме того, МПК предусматривается отнесение судов к одному из семи так называемых полярных классов Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), указываемых в ССПП. Таким образом, согласно МПК, в число рассматриваемых Администрацией СМП параметров войдет и полярный класс судна.

Реализация требований МПК, включая разработку НЭПВ и их надлежащее качество, гарантирует переход к новым процедурам обеспечения безопасности и предотвращения загрязнения, предписываемым МПК.

### Основная часть

В тексте МПК имеется инструкция по разработке НЭПВ, включающая подробное изложение содержания входящих в него разделов. Однако этот документ [1, разд. 1.1.3 «Маневрирование во льдах», гл. 1 «Эксплуатационные возможности и ограничения»] не содержит каких-либо рекомендаций, оставляя данный вопрос исключительно в сфере ответственности судовладельца и / или разработчика НЭПВ. Тем не менее, поскольку на основании этого документа судну выдается ССПП, а от характера маневрирования каждого конкретного судна в конкретных ледовых условиях зависит его безопасность, этот раздел является ключевым в различных условиях ледового плавания. Он должен содержать рекомендации, индивидуальные для каждого судна с учетом его конструктивных особенностей, маневренных возможностей, состояния обшивки корпуса, характера загрузки и т. п. Кроме того, эти рекомендации должны учитывать конкретные ледовые условия, в которых приходится маневрировать судну. Это может включать в себя расхождение с отдельно плавающими льдинами различных размеров, прохождение частично разреженного льда, плавание в мелкобитом льду и т. п.

В настоящее время существуют рекомендации, разработанные опытными ледовыми капитанами по плаванию в ледовых условиях, однако они носят общий характер, не зависящий от конструктивных особенностей, маневренных возможностей, характера загрузки конкретного судна, т. е. не соответствуют тем принципам МПК, которые заложены в НЭПВ и на основании которых должно выдаваться ССПП конкретному судну. Таким образом, возникает противоречие между требованиями МПК, которые должны применяться к каждому конкретному судну и на основании выполнения которых судну должно выдаваться ССПП, и рекомендациями по маневрированию судна в условиях, которые либо отсутствуют вообще [1], либо носят достаточно общий характер, применение которого для каждого конкретного судна невозможно.

Для разработки конкретных рекомендаций, которые соответствуют требованиям МПК и могут быть включены в НЭПВ, а также использоваться судами в конкретных условиях плавания, рассмотрим ситуацию столкновения судна с отдельной плавающей льдиной (рис. 1). Эта задача приобретает особую актуальность в связи с тем, что основной побудительной причиной для ИМО в принятии МПК явилась гибель лайнера «Эксплорер», получившего ледовые повреждения в условиях аналогичного столкновения и впоследствии затонувшего у берегов Антарктиды в ноябре 2007 г. [6]. Рассмотрим данную задачу с точки зрения математического моделирования движения судна до столкновения и в момент столкновения со свободно плавающей льдиной. Этот подход был впервые использован в работе [7], где было показано, что применение перед столкновением с другим судном или иным препятствием маневра «Курс от судна» способствует возникновению гидродинамического отталкивания перед столкновением и соответственно «разведению» судна с препятствием, с которым предстоит столкновение. Этим препятствием может быть и свободно плавающая льдина. Тем самым снижается опасность повреждения корпуса судна при столкновении.

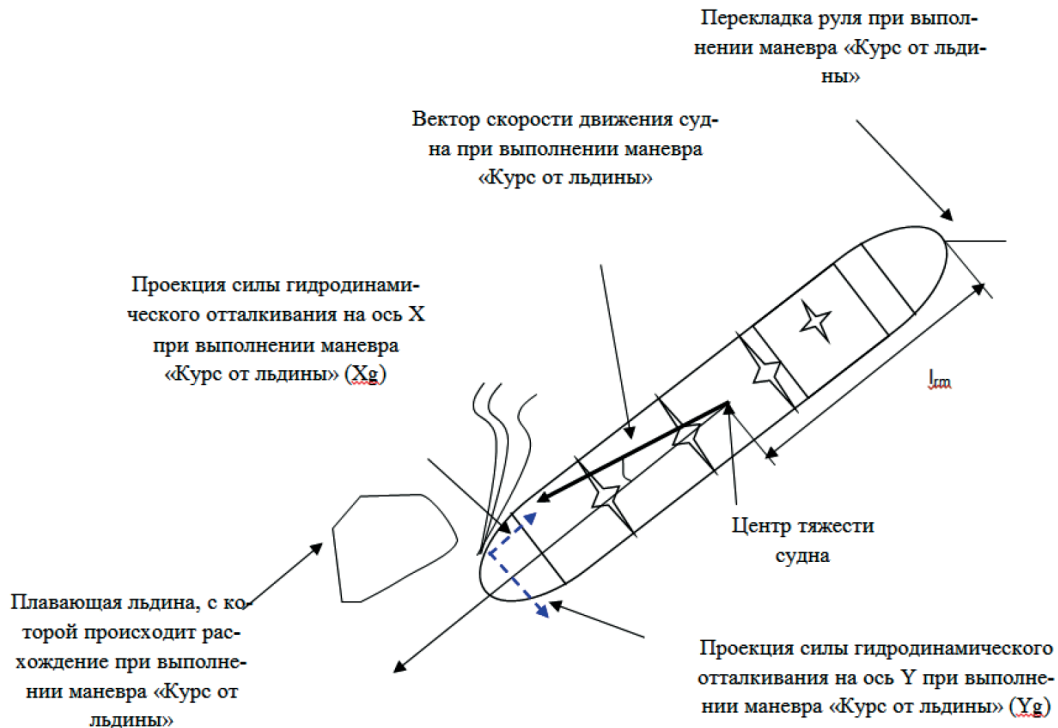


Рис. 1. Возникновение силы гидродинамического отталкивания при выполнении маневра «Курс от льдины» при сближении с плавающей льдиной

В данном случае аналогичный маневр может быть назван «Курс от льдины». Уравнения движения при выполнении маневра «Курс от льдины» с максимальным углом перекадки могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} -(m + \lambda_{11})(dv/dt) \cos \beta + (m + \lambda_{11})v_1(d\beta/dt) \sin \beta - m v \omega \sin \beta - X_g - X_a + P_e - X_r &= 0; \\ -(m + \lambda_{22})(dv/dt) \sin \beta + (m + \lambda_{22})v(d\beta/dt) \cos \beta - m v \omega \cos \beta - \lambda_{26} d\omega/dt - Y_g + Y_a + Y_r &= 0; \\ -(J_z + \lambda_{26})(d\omega/dt) - \lambda_{26}((dv/dt) \sin \beta + (d\beta/dt)v \cos \beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} &= 0; \\ \delta_R &= \delta_{R_{\max}} \end{aligned} \quad (1)$$

или

$$\begin{aligned} (dv/dt) &= \left( -(m + \lambda_{11})v(d\beta/dt) \sin \beta + m v \omega \sin \beta + X_g + X_a - P_e + X_r \right) / \left( -(m + \lambda_{11}) \cdot \cos \beta \right); \\ (d\omega/dt) &= \left( -\lambda_{26}((dv/dt) \sin \beta + (d\beta/dt)v \cos \beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} \right) / (J_z + \lambda_{26}); \\ (d\beta/dt) &= \left( (m + \lambda_{22})(dv/dt) \sin \beta + m v \omega \cos \beta + \lambda_{26}(d\omega/dt) + Y_g - Y_a - Y_r \right) / \left( (m + \lambda_{22})v \cos \beta \right); \\ \delta_R &= \delta_{R_{\max}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v$  — скорость судна, м/с;  $\omega$  — угловая скорость, 1/с;  $\beta$  — угол дрейфа, град;  $Y_r$  — боковая сила на руле судна, кН;  $Y_g, X_g$  — проекции гидродинамической силы на оси  $Y$  и  $X$  (проекции силы гидродинамического отталкивания, отводящие корпус судна от льдины до столкновения), кН;  $Y_a$  — проекция аэродинамической силы на ось  $Y$ , кН;  $l_{rm}$  — расстояние баллера руля от центра тяжести (ЦТ) судна, кН;  $M_g$  и  $M_a$  — соответственно моменты гидро- и аэродинамических сил, кН·м,  $m$  — масса (массовое водоизмещение) судна, т;  $\lambda_{11}, \lambda_{22}$  — присоединенные массы судна, т;  $J_z + \lambda_{26}$  — соответственно момент инерции и присоединенный момент инерции относительно вертикальной оси  $z$ , т·м<sup>2</sup>;  $\delta_R$  — угол перекадки руля при выполнении маневра «Курс от льдины», град;  $\delta_{R_{\max}}$  — максимальный угол перекадки руля при выполнении маневра «Курс от льдины», град;  $P_e$  — тяга гребного винта, кН;  $t$  — время, с.

Основные параметры движения судна (скорость движения судна —  $v$ , угловая скорость —  $\omega$ , угол дрейфа —  $\beta$ ) до начала столкновения с льдиной могут быть рассчитаны путем интегрирования выражений (2), полученных из выражения (1), по времени ( $t$ ) до момента столкновения судна и льдины. Как следует из анализа результатов расчета, выполненных по уравнениям (2), при применении маневра «Курс от льдины» гидродинамическое отталкивание, возникающее в носовой оконечности судна, способствует отводу свободно плавающей льдины от корпуса судна и корпуса судна льдины. Это снижает вероятность столкновения и, следовательно, повреждения корпуса при столкновении судна с льдиной, что является положительным фактором. Расчеты по уравнениям (2) показывают, что если маневр выполнен своевременно, то для свободно плавающей льдины ограниченных размеров силы гидродинамического отталкивания может быть достаточно для полного предотвращения столкновения судна с льдиной. Таким образом, маневр, выполняемый по принципу «Курс от льдины», может быть эффективным для предотвращения непосредственного столкновения с ней и снижения опасности повреждения корпуса судна при столкновении со свободно плавающей льдиной.

В том случае, если до столкновения льдина была обнаружена на судне и был предпринят маневр «Курс от льдины» на уклонение от нее, но столкновения избежать не удалось, то уравнения движения судна при столкновении со свободно плавающей льдиной будут иметь следующий вид (рис. 2):

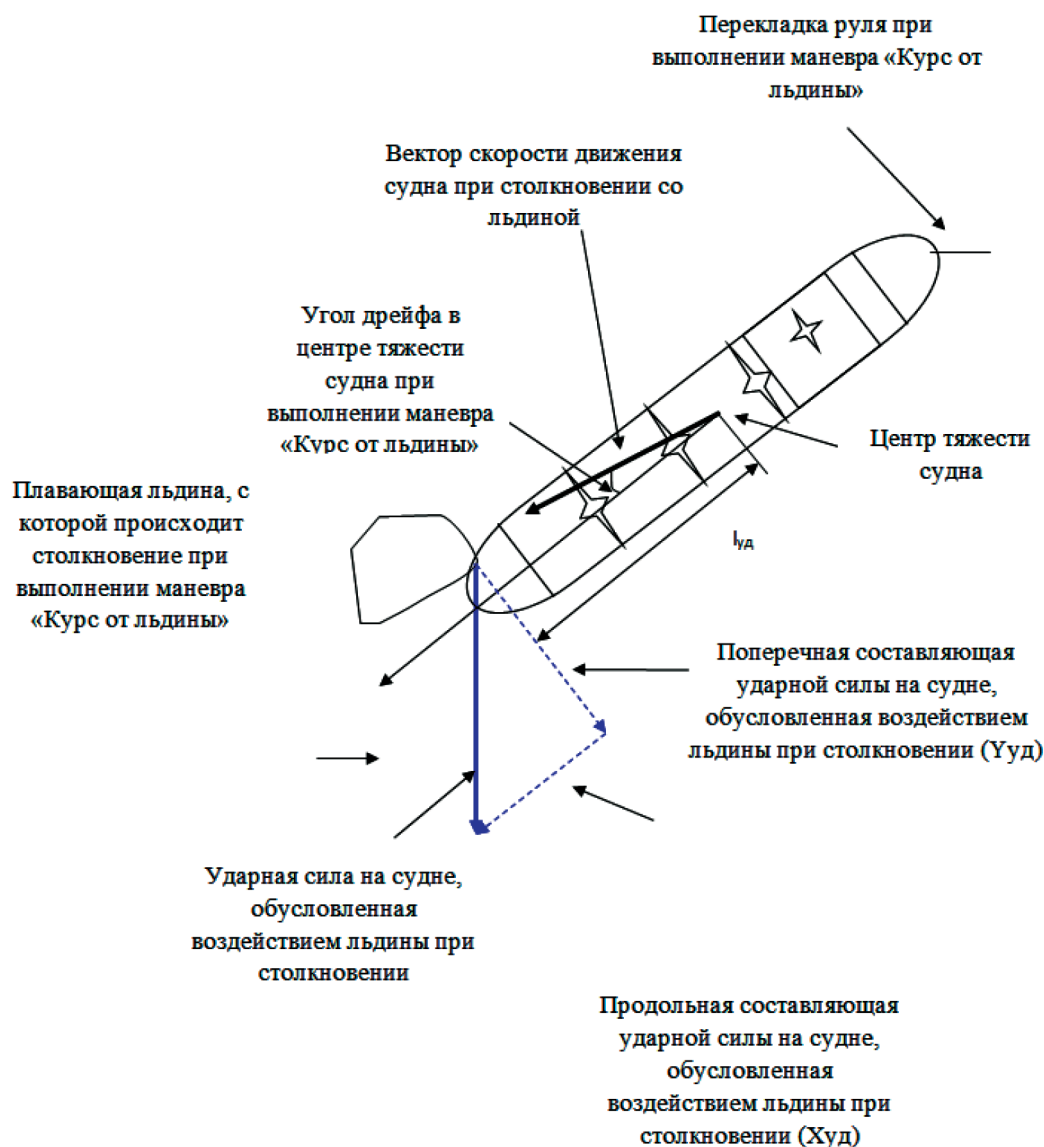


Рис. 2. Построение проекций ударных сил на оси, связанные с движением судна при столкновении с плавающей льдиной

$$\begin{aligned} -(m + \lambda_{11})(dv/dt)\cos\beta + (m + \lambda_{11})v(d\beta/dt)\sin\beta - mv\omega\sin\beta - X_g - X_a + P_e - X_r + X_{уд} &= 0; \\ -(m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + (m + \lambda_{22})v(d\beta/dt)\cos\beta - mv\omega\cos\beta - \lambda_{26}d\omega/dt - Y_g + Y_a + Y_r - Y_{уд} &= 0; \\ -(J_z + \lambda_{26})(d\omega/dt) - \lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} - M_{уд} &= 0; \\ \delta_R &= \delta_{R\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} (dv/dt) &= \left( -(m + \lambda_{11})v(d\beta/dt)\sin\beta + mv\omega\sin\beta + X_g + X_a - P_e + X_r - X_{уд} \right) / \left( -(m + \lambda_{11}) \cdot \cos\beta \right); \\ (d\omega/dt) &= \left( -\lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g - M_{уд} + M_a - Y_r l_{rm} \right) / \left( -J_z + \lambda_{26} \right); \\ (d\beta/dt) &= \left( (m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + mv\omega\cos\beta + \lambda_{26}(d\omega/dt) + Y_g + Y_{уд} - Y_a - Y_r \right) / \left( (m + \lambda_{22})v\cos\beta \right); \\ \delta_R &= \delta_{R\max}. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4)  $X_{уд}$ ,  $Y_{уд}$ ,  $M_{уд}$  могут быть получены по выражениям, которые аналогичны используемым в работе [7]:

$$\begin{aligned} X_{уд} &= m_{л} dv/dt \cos Y; \\ Y_{уд} &= m_{л} (dv/dt) \sin Y; \\ M_{уд} &= Y_{уд} l_{уд}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_{л}$  — масса льдины, с которой происходит столкновение, т;  $Y$  — угол столкновения со льдиной, град;  $l_{уд}$  — отстояние от места столкновения со льдиной до центра тяжести судна, м.

Основные параметры движения судна ( $v$ ,  $\omega$ ,  $\beta$ ) после начала столкновения со льдиной могут быть получены путем интегрирования выражений (4), полученных из выражения (3) по времени ( $t$ ) до момента окончания столкновения судов. Начальные параметры ( $v$ ,  $\omega$ ,  $\beta$ ) при интегрировании должны быть получены по результатам расчета уравнений (2).

Как следует из схем, приведенных на рис. 3 и 4, сила, направленная непосредственно на разрушение обшивки корпуса судна, перпендикулярно обшивке корпуса —  $Y_{уд}$ , зависит от угла дрейфа судна  $\beta$  и от угла заострения ватерлинии корпуса по отношению к диаметральной плоскости судна в месте контакта с льдиной при ударе ( $Y_{дп}$ ) и может быть определена в виде

$$Y_{уд} = m_{л} (dv/dt) \sin(Y_{дп} + \beta). \quad (6)$$

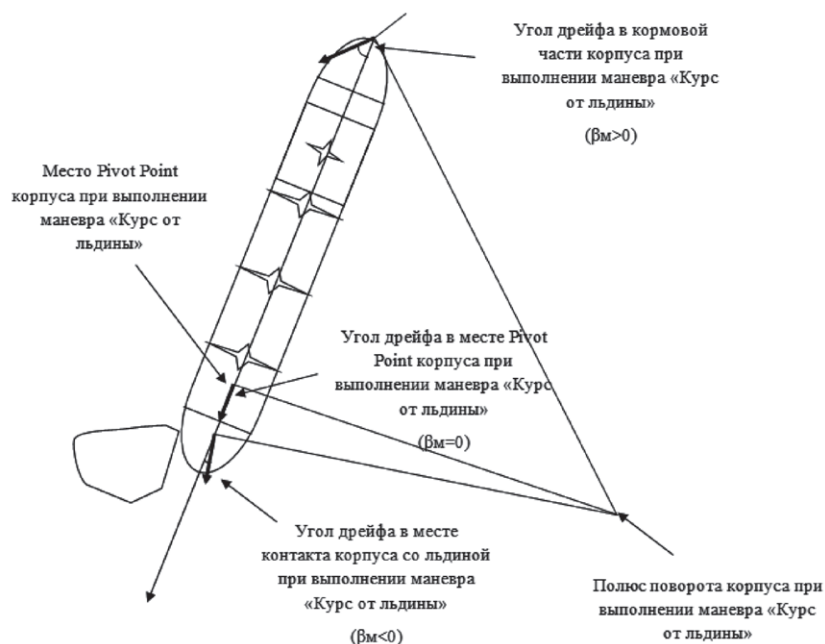


Рис. 3. Углы дрейфа в различных частях корпуса судна при выполнении маневра «Курс от льдины»

Если контакт происходит непосредственно с форштевнем корпуса судна без изменения курса судна перед столкновением, при условии отсутствия угла дрейфа  $\beta = 0^\circ$ , то  $Y_{\text{дп}} = 90^\circ$  (рис. 4, а) и  $Y_{\text{уд}}$  в соответствии с выражением (6), достигают максимального значения.

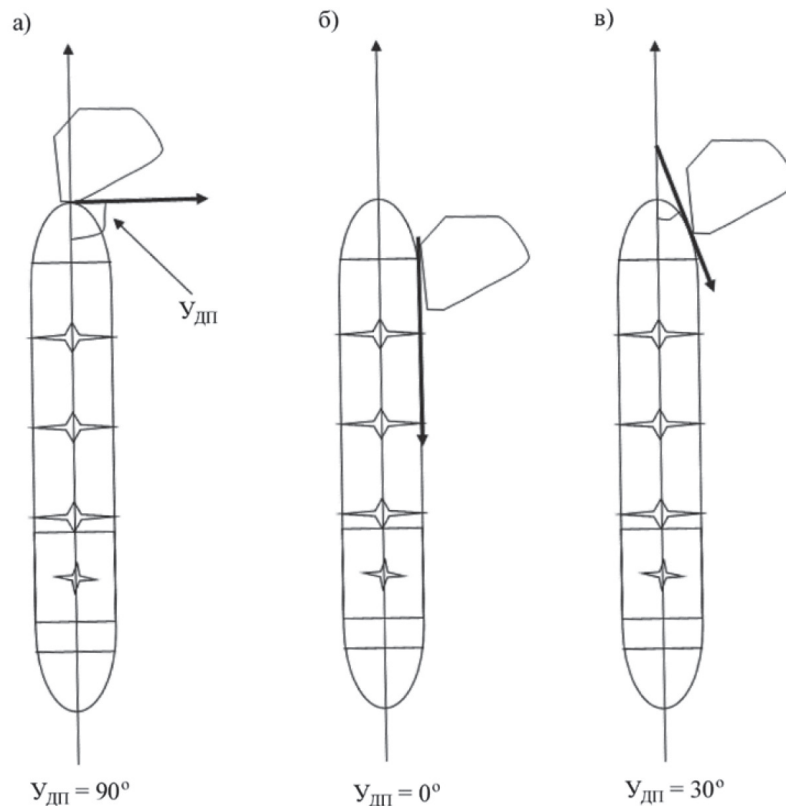


Рис. 4. Определение  $Y_{\text{дп}}$  судна в зависимости от места столкновения со льдиной

Если контакт с корпусом судна происходит в районе борта (см. рис. 4, б), то  $Y_{\text{дп}} = 0^\circ$  и при нулевом угле дрейфа судна ( $\beta = 0^\circ$ ), в соответствии с выражением (6),  $Y_{\text{уд}} = 0$ . Таким образом, разрушения корпуса судна не происходит, так как судно получает «скользящий» удар от льдины. В случае, если контакт происходит с корпусом судна в скулы судна (см. рис. 4, в), то в данном случае  $Y_{\text{дп}} = 30^\circ$ , при нулевом угле дрейфа судна ( $\beta = 0^\circ$ ), в соответствии с выражением (6), сила, направленная на разрушение обшивки корпуса, снижается в два раза по сравнению с той силой, которая возникала бы при контакте форштевня судна со льдиной. Таким образом, опасность разрушения корпуса при столкновении судна со льдиной может зависеть от маневра, предпринимаемого судном перед столкновением, конструктивных особенностей и прочности отдельных частей корпуса. С точки зрения содержания НЭПВ применительно к МПК особый интерес представляет маневрирование судна при плавании во льдах, которое может быть исследовано с использованием выражений (1) – (6).

Как показывают результаты систематических расчетов, особый интерес представляет собой исследование положения так называемой *Pivot Point*, т. е. той точки на корпусе, в которой местный угол дрейфа  $\beta_m = 0^\circ$  при различных вариантах маневрирования судна. Как следует из рис. 3, при выполнении маневра «Курс от льдины» местные углы дрейфа на корпусе, расположенные в корму от *Pivot Point*, положительны ( $\beta_m > 0^\circ$ ), а в нос от *Pivot Point* — отрицательны ( $\beta_m < 0^\circ$ ). Таким образом, выполнение маневра «Курс от льдины» до столкновения дополнительно снижает опасность разрушения корпуса, так как уменьшается значение  $Y_{\text{уд}}$ , определяемое по выражению (6), что снижает опасность повреждения корпуса.

В результате выполнения маневра «Курс от льдины» снижается опасность повреждения корпуса судна, независимо от того, какой у него угол заострения ватерлинии  $Y_{\text{дп}}$  (независимо



от типа и конструктивных особенностей судна). Таким образом, всем судам при расхождении со свободно плавающей льдиной может быть рекомендован маневр «Курс от льдины» как универсальный маневр, направленный на снижение опасности повреждения корпуса судна в том случае, если предполагаемое столкновение со льдиной произойдет ближе к носу судна, чем располагается его Pivot Point.

Использование расчетов с использованием методов математического моделирования по выражениям (1) – (6) показывает, что для судов с различным углом  $U_{дп}$  маневр «Курс от льдины» в условиях ледового плавания может иметь различную эффективность в зависимости от конструктивных особенностей судна и расстояния обнаружения льдины от форштевня судна. Еще одним преимуществом использования методов математического моделирования является возможность определения максимального угла отворота судна при выполнении маневра «Курс от льдины» во избежание повреждений судна при столкновении со льдиной.

Как следует из результатов систематических расчетов, выполненных в соответствии с выражениями (1) – (6), для того, чтобы изменение курса было эффективным и приводило к снижению опасности повреждения корпуса при столкновении, угол отворота от льдины при выполнении маневра «Курс от льдины» может быть определен из рис. 5.



Рис. 5. Изменение курса судна при выполнении маневра «Курс от льдины» для снижения опасности повреждения корпуса

Таким образом, на основании использования математического моделирования движения судов в условиях ледового плавания могут быть разработаны как общие, так и конкретные рекомендации для каждого судна в условиях ледового плавания, как это требуется в соответствии с НЭПВ.

Результаты систематических расчетов, выполненных по математическим моделям (1) – (6), позволили разработать общие рекомендации для различных ситуаций ледовых условий, которые подтверждаются существующей практикой и опытом ледового плавания и ледовых аварий [6] – [11]. К этим рекомендациям относятся следующие:

1. Для судов ледового плавания с большим углом заострения ватерлинии, имеющих усиленный ледовый пояс в носовой оконечности с максимальным усилением в районе форштевня при плавании в разреженном льду с отдельно плавающими льдинами, необходимо «*брать льдины на форштевень*» без изменения курса и выполнения маневра «*Курс от льдины*». При наличии сплошного льда с перемычками их также надо пересекать форштевнем без изменения курса судна.

2. Для судов ледового плавания с большим и малым углом заострения ватерлинии при плавании в сплошном льду при наличии промоин и трещин во льду следует двигаться вдоль промоины и трещины, максимально расширяя их своим корпусом.

3. При расхождении судов с отдельно плавающими льдинами при своевременном обнаружении льдины маневр «*Курс от льдины*» может быть рекомендован для всех судов.

### Выводы

1. Использование методов математического моделирования позволяет выработать конкретные рекомендации по обеспечению безопасности ледового плавания для каждого судна и конкретных ледовых условий плавания, как это требуется НЭПВ.

2. С использованием предложенных в настоящей работе расчетов с использованием методов математического моделирования показано, что маневр «*Курс от льдины*» при расхождении с отдельными льдинами может быть рекомендован для всех судов.

3. Анализ результатов расчетов маневрирования судов с использованием математического моделирования показывает совпадение полученных рекомендаций с существующим опытом ледового плавания.

4. Результаты математического моделирования дают возможность выработать как общие рекомендации, которые могут быть использованы для всех судов ледового плавания, так и конкретные маневры для каждого судна в условиях ледового плавания.

5. Методы математического моделирования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов и конструкций по плаванию в различных ледовых условиях. Они могут быть предложены мировому морскому сообществу и ИМО как основной метод для исследования вопросов безопасности ледового плавания, разработки рекомендаций для движения во льдах судов различных типов и конструкций, а также подготовки судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах. Резолюция ИМО MSC.385(94). — 2014.

2. Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года. Резолюция ИМО MSC.386(94). — 2014.

3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС-74).

4. Международная конвенция о предотвращении загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 г. к ней с поправками (МАРПОЛ 73/78).

5. Правила плавания в акватории Северного морского пути / Утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013 г. № 7.

6. Шурпак В. К. Полярный кодекс ИМО: предварительный анализ первой части (требования по безопасности) / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38–39. — С. 8–17.

7. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: (05.22.19); защищена (19.11.2012); утв. (20.05.2013) / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

8. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.

9. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
10. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.
11. Kheisin D. E. Ice navigation qualities of ships / D. E. Kheisin, Y. N. Popov. — 1973. — №. CRREL- TL417.

## RECOMMENDATION ON MANEUVERING THE VESSEL IN ICE CONDITIONS

*The article discusses ways of implementing the requirements of the International Polar code, which comes into force on 1 January 2017. A key requirement to meet the requirements of the international polar code is to obtain evidence of the ship's Arctic voyage, for which for each vessel should be developed guidelines for operation of vessels in polar waters. When creating this document should develop recommendations for maneuvering the concrete of the vessel in various conditions of ice navigation. In this article for developing these recommendations, it is proposed to use methods of mathematical modeling. Proposed in the present article ing approaches to analyze and develop recommendations for each specific ship for specific conditions of ice navigation. Based on the results of systemic calculations on the mathematical models proposed in the present work, the conclusion about the effectiveness of the maneuver "Course from the ice" with a separate ice floes, and confirmed existing recommendations for ice navigation. It is shown that application of methods of mathematical simulation of the maneuvering of the vessel in various conditions of ice navigation will not only meet the requirements of the International polar code, but also to ensure the safe navigation of ships in ice conditions. The paper shows that mathematical modeling techniques can be used to develop practical recommendations for ships of various types and designs of swimming in different ice conditions. They may be offered the global maritime community as the main method for researching the issues of safety of ice navigation, to develop recommendations for traffic in ice vessels of various types and designs, for the training of skippers to sail in specific ice conditions.*

*Keywords: International Polar code, ice conditions, mathematical modeling in various conditions of ice navigation.*

## REFERENCES

1. Mezhdunarodnyj kodeks dlja sudov, jekspluatirujushhihsja v poljarnyh vodah. Rezoljucija IMO MSC.385(94). 2014.
2. Popravki k Mezhdunarodnoj konvencii po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda. Rezoljucija IMO MSC.386(94). 2014.
3. Mezhdunarodnaja Konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74) s popravkami.
4. Mezhdunarodnaja konvencija o predotvrashhenii zagriznenija s sudov 1973 goda, izmenennaja protokolom 1978 g. k nej s popravkami (MARPOL 73/78).
5. Russian Federation. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 17.01.2013 № 7. Pravila plavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.
6. Shurpyak, V. K. "IMO Polar Code: preliminary review of first part (safety requirements)." *Russian Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 38–39 (2015): 8–17.
7. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov. Dr. diss. SPb., 2012.
8. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spa-senija: monografija*. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
9. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
10. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. "Breaking the Ice: Navigation in the Arctic." *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.
11. Kheisin, D. E., and Y. N. Popov. *Ice navigation qualities of ships*. 1973. №. CRREL-TL417.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

*Ершов Андрей Александрович* —  
доктор технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*ershov\_63@mail.ru, kaf\_mus@gumrf.ru*  
*Развозов Сергей Юрьевич* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_mus@gumrf.ru*  
*Петухов Павел Игоревич* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Ершов Андрей Александрович.*  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*sevarus89@gmail.com, kaf\_mus@gumrf.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*Ershov Andrey Alexandrovich* —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*ershov\_63@mail.ru, kaf\_mus@gumrf.ru*  
*Razvozov Sergey Jrevich*  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*razvozov.su@mail.ru*  
*Petuhov Pavel Igorevich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Ershov Andrey Alexandrovich.*  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*sevarus89@gmail.com, kaf\_mus@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 30 августа 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-29-38**  
**УДК 519. 22:004.67**

**Д. А. Акмайкин,  
С. Ф. Ключева,  
П. А. Салюк**

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГРАФА МАРШРУТА СУДНА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ**

*В современной теории графов для исследователей актуален класс задач, связанных с формированием графа, построением его вершин и ребер на основе заданных условий и большого числа исходных данных. Такие задачи относят к классу нереализуемых задач. Методы искусственного интеллекта, кластерного анализа, применение эвристических и эволюционных алгоритмов совместно с новыми компьютерными технологиями позволяют решать подобные задачи наиболее эффективным образом. Задача формирования графа маршрута движения судна относится к классу таких задач. Эвристика заключается в возможности применения результатов кластеризации исходной цифровой базы данных как основы для формирования вершин и ребер графа. Данная задача является предметом рассмотрения статьи. В статье используется цифровая база района плавания, которая включает отметки глубин, высот и мелей. Метод кластеризации осуществляется на базе метрики, учитывающей расстояние между точками на карте и разность глубин. Приведены численные значения параметров кластеризации и числовые значения расчета критерия качества кластеризации для различных значений коэффициентов метрики. Разработан, реализован программно и подробно описан алгоритм кластеризации. Приведены результаты программного моделирования алгоритма на участке, характеризующимся извилистой береговой чертой, наличием мысов, мелей, бухт и заливов, а также распределением островов в районе построения маршрута. На основе кластеризации выполнено формирование графа путей движения судна. Приведен алгоритм построения вершин и ребер графа. Программная модель позволяет визуализировать исходную цифровую базу данных и полученные результаты. В заключение указаны основные необходимые направления для дальнейших исследований.*

*Ключевые слова: кластеризация, метрика, качество кластеризации, путь судна, электронная навигационная карта.*

**Введение**

Задачи на графах реализуют большой круг прикладных проблем во многих областях науки и техники. Среди задач, основанных на современной теории графов, актуален для исследования класс задач, связанных с формированием исходного графа, его вершин и ребер на основе некото-

рых начальных условий и данных. Особую сложность представляют задачи построения графа для больших объемов исходных данных порядка миллиона точек. Как известно, такие задачи относятся к классу нереализуемых задач. Необходимы новые методы и алгоритмы, позволяющие строить граф наиболее эффективными способами. Примером такой задачи является проблема программного формирования графа маршрута движения судна для заданной акватории океана. Ограничения, связанные с вычислительными ресурсами компьютера, не позволяют найти решение методом полного перебора всех возможных вариантов для исходных баз данных, содержащих миллионы точек. Поэтому для таких задач необходимы другие методы, позволяющие оперировать группами точек и областей, схожих по некоторым наиболее важным факторам. Основой таких решений является кластерный анализ и применение эвристических алгоритмов.

Применение кластерного анализа в автоматизированных навигационно-информационных системах позволит выполнять анализ района плавания и формировать маршрут движения судна в автоматическом режиме для заданного района с учетом ошибок и неточностей оцифровки навигационных карт, а также погрешностей моделирования электронных карт [1], [2].

В общем виде алгоритм и примеры программной кластеризации для простых областей моря приведены в работах [3], [4]. В данных работах описаны результаты реализации алгоритма кластеризации для района со сложной структурой данных, для областей моря с мелкими островами, закрытыми извилистыми бухтами, каналами. Сложность алгоритма формирования графа маршрута возрастает. Качество кластеризации определяется метрикой — мерой «схожести» объектов по наиболее значимым признакам. Исследование разношкальных метрик имеет особое значение для анализа многомерных данных. В этих случаях метрика строится на основе коэффициентов Гауэра [5], [6]. В настоящее время авторами работ [6] – [9] предложены различные варианты формирования разношкальных метрик. В навигации кластеризация выполняется по ряду навигационных параметров.

В данной работе ключевыми являются параметры глубины и расстояния между точками цифровой карты. На основе выполненной кластеризации осуществляется автоматизация формирования маршрута движения судна. Такой подход особенно актуален при осуществлении судоходства в районе мелководья, архипелагов, вдоль береговой черты.

## Постановка задачи

### *1. Общая постановка задачи*

Программное моделирование графа маршрута движения судна основано на кластеризации исходной цифровой базы данных района плавания. Разработанный алгоритм реализован для упрощенной цифровой модели данных, включающей отметки глубин и их географические координаты, мели и отметки высот.

Необходимо построить граф маршрута движения, используя результаты кластеризации данных района плавания, с учётом заданных начальной и конечной точек пути судна и безопасного минимального уровня глубин. Предлагается вершины графа формировать на основе кластеров глубин, а ребра графа строить таким образом, чтобы избежать избыточности возможных построений с учетом курса судна.

В такой постановке задача включает три основных этапа. Первый этап — выполнение кластеризации объектов (точек) исходной базы данных. Второй этап — формирование множества вершин графа на основе сформированных кластеров. Третий этап — формирование ребер графа на основе подмножества вершин графа. Последний этап самый сложный. Соединять полученные вершины произвольным образом или всеми возможными способами нельзя, так как в этом случае вместо модели маршрута движения судна получится нечто далекое от маршрута. Эта задача включает элементы «обучения» алгоритма тому, как и в каком порядке следует соединять вершины в зависимости от курса судна и его характеристик. Данная задача реализована в настоящее время на основе элементов эвристики, позволяющих формировать множество ребер графа наиболее приемлемым образом. Но в целом эта задача требует дальнейших исследований.

## 2. Постановка задачи кластеризации

Цифровая база данных (ЦБД) представлена матрицей  $A = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i, i = \overline{1, N}\}$ , при  $h_i > 0$  — задана глубина морского дна, при  $h_i \leq 0$  — высота (суша),  $0 < h_i \leq h_m$  — мели,  $h_m$  — предельная безопасная глубина.

Для точек ЦБД:  $a_i = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i\}$ ,  $a_i \in A$ , метрики  $\mu_{C_k}$  — область моря и  $\mu_{L_l}$  — область суши, проводят разбиение точек на непересекающиеся подмножества  $C_k$  (кластеры моря) и  $L_l$  (кластеры суши) так, чтобы каждый кластер состоял из точек, близких по метрике  $\mu_{C_k}$ , а объекты разных кластеров существенно различались. При этом каждому объекту  $a_i \in A$ ,  $h_i > 0$  присписывается метка (номер) кластера  $C_k$  и каждому объекту  $a_i \in A$ ,  $h_i \leq 0$  — метка (номер) кластера  $L_l$ . Метрика кластеризации определена с учетом расстояния и разности глубин:

$$\mu_{C_k} = d_p \cdot \rho(\varphi_i^{C_k}, \lambda_i^{C_k}) + d_h \cdot |h_i^{C_k} - h_{C_k}|, \quad (1)$$

где  $d_p, d_h$  — коэффициенты по расстоянию и глубине (высоте);  $\rho(\varphi_i^{C_k}, \lambda_i^{C_k})$  — расстояние между точкой и центроидом  $c_k$ ;  $(\varphi_i, \lambda_i)$  — координата точки  $a_i \in A$  ЦБД;  $(\varphi_{C_k}, \lambda_{C_k})$  — координата центроида  $c_k \in C$ ;  $C_k = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i \mid h_i > 0, h_k > 0, \mu_{C_k} \rightarrow \min\}$  — кластеры моря;  $L_l = \{\varphi_l, \lambda_l, h_l \mid h_l \leq 0, h_l \leq 0, \mu_{L_l} \rightarrow \min\}$  — кластеры суши.

Оптимальность разбиения объектов кластеризации на группы оценивается при помощи функционала качества кластеризации.

В качестве критерия качества кластеризации можно выбрать сумму средних внутрикластерных расстояний и сумму межкластерных расстояний.

Сумма средних внутрикластерных расстояний должна быть минимальной [3] – [9], т. е.

$$F_0 = \sum_{c \in C} \frac{1}{|C_k|} \sum_k m_c^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $C_k = \{a_i \in H \mid c_k = c\}$  — кластер с номером  $k$ .

Сумма межкластерных расстояний должна быть максимальной, т. е.

$$F_1 = \sum_{c \in C} \mu^2(\mu_c, \mu) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $\mu$  — центр масс всей выборки.

При этом вычисляется отношение пары функционалов, чтобы учесть межкластерные и внутрикластерные расстояния

$$F_0 / F_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

На основе поставленной задачи реализован гибридный алгоритм кластеризации.

## 3. Постановка задачи формирования графа маршрута

Алгоритм построения графа  $G = (V, E)$  маршрута включает три основных этапа.

На первом этапе для областей суши формируются дополнительно кластеры вдоль границы суши. При этом на данном этапе необходимо выполнить кластеризацию области суши для участков возможных маршрутов судна. Можно выполнить кластеризацию для данных, представляющих модель береговой черты, не формируя отдельно кластеры суши.

На втором этапе выполняется формирование классов  $K_1$  и  $K_2$  вершин графа на основе центроидов  $C_i$ , лежащих по разные стороны от прямой, соединяющей начальную  $S_0$  и конечную  $S_1$  точки заданного маршрута, где  $K_1 = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_{n_1}^0\}$ ,  $K_2 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_{n_2}^1\}$ ,  $K_1 \cap K_2 = \emptyset$ ;  $n_1$  — число вершин класса  $K_1$ ;  $n_2$  — число вершин класса  $K_2$ .

На третьем этапе выполняется формирование вершин и ребер графа возможных путей движения судна. Ребра графа формируются с учетом направления движения (предварительная сортировка центроидов на широте и долготе позволяют реализовать этот шаг). Сформированный граф  $G = (V, E)$  маршрута записывается в файл данных в виде списка вершин и ребер графа.

### Алгоритм кластеризации

Алгоритм кластеризации включает два основных этапа. На первом этапе происходит построение центроидов кластеров. Первоначально центроиды задаются на узлах регулярной сетки цифровой карты. Затем происходит оптимизация числа и положения центроидов на базе метрики (1). На втором этапе происходит кластеризация точек цифровой карты.

#### 1. Этап оптимизации центроидов

Шаг 0. Считать данные из сформированного файла центроидов, где  $K$  — число центроидов.  
Внешний цикл:

Шаг 1. Выбрать центроид  $C_i$  (первый раз  $i = 0$ ), пока  $i < N$ .

Внутренний цикл:

Шаг 2. Выбрать центроид  $C_j$ , (первый раз  $j = i + 1$ ), пока  $j < N$ . Иначе перейти на шаг 6.

Шаг 3. Если расстояние по широте или долготе между центроидами  $c_j$  и  $c_i$  больше предельного  $\Delta d$ :  $(\rho(\varphi_{c_i}^{c_j}, \lambda_{c_i}^{c_j}) - \Delta d) > 0$ , и  $|h_{c_i} - h_{c_j}| > \Delta h$ , или глубины разного знака, то центроид  $c_j$  рекомендовано не изменять, в противном случае центроид  $c_j$  помечается на исключение.

Шаг 4. Исключить помеченный центроид  $c_j$  из множества центроидов  $C$ , соответственно пересчитать число кластеров  $K_1$  (первоначально  $K_1 = K$ ).

Шаг 5. Принять  $j = j + 1$ , перейти к шагу 2.

Внутренний цикл завершен.

Шаг 6. Принять  $i = i + 1$  и перейти на шаг 2 пока  $j < K$ .

Внешний цикл завершен.

Шаг 7. Сформировать файл центроидов.

#### 2. Этап кластеризации точек ЦКГ

Шаг 0. Выбрать начальную точку ЦКГ  $a_i$ ,  $i = 0$ .

Внешний цикл: Шаг 1. Переход по точкам  $a_i$  карты (области моря  $C$  или суши  $L$ ) пока  $i < N$ .

Внутренний цикл: Шаг 2. Переход по центроидам  $c_k$  ( $L_i$ ) пока  $k < K_1$ .

Шаг 3. Вычислить значение метрики (1). Принять за минимум значение метрики.

Шаг 4. Перейти к следующему центроиду  $c_{k+1}$  ( $L_{i+1}$ ). Вычислить метрику. Если значение метрики меньше полученной ранее, принять за минимум. Перейти на шаг 2.

Внутренний цикл завершен.

Шаг 5. Отнести точку  $a_i$  карты к кластеру  $C_k$  ( $L_i$ ) с минимальной метрикой.

Шаг 6. Если величина метрики больше порогового значения, то данная точка образует свой собственный кластер (отличные значения глубины).

Шаг 7. Принять  $i = i + 1$ , перейти на шаг 1.

Внешний цикл завершен.

Шаг 8. Повторить шаги 1 – 7 для другой области (моря  $C$  или суши  $L$ ).

Шаг 9. Вычислить критерии качества — условия (2) – (4).

Шаг 10. Вычислить центр группирования точек  $\mu_i$  для каждого кластера  $C_i$ , среднюю величину глубины (или высоты) и выполнить перенос центра кластера  $C_i$  в заданную точку  $\mu_i$ .

Шаг 10. Вычислить критерии качества  $F_0$ ,  $F_1$  и отношение данных критериев. Принять решение: продолжить итерации или останов. В случае продолжения процесса кластеризации перейти на шаг 1. Иначе кластеризация закончена.

### Результаты реализации алгоритмов

Разработанные алгоритмы кластеризации и формирования графа маршрута судна реализованы программно на языке программирования C++ в среде программирования Visual Studio на платформе .NET Framework. Кластеризация точек ЦБГ позволяет выполнить анализ района плавания для планирования маршрута перехода из начальной  $S_0$  точки в конечную точку  $S_1$ , с учетом среднего уровня глубин и мелей. Цифровая база глубин района плавания представлена в виде регулярной сетки отметок глубин (совместно с координатами точек) и высот. На рис. 1 отображена структура кластеров для района около о. Хоккайдо. Данный район выбран как пример сложной



структуры данных: извилистая береговая черта, наличие мелких островов и отмелей. На рисунке показаны кластеры глубин, центры кластеров выделены светлым тоном, серым цветом указаны средние значения глубин для центров кластеров.

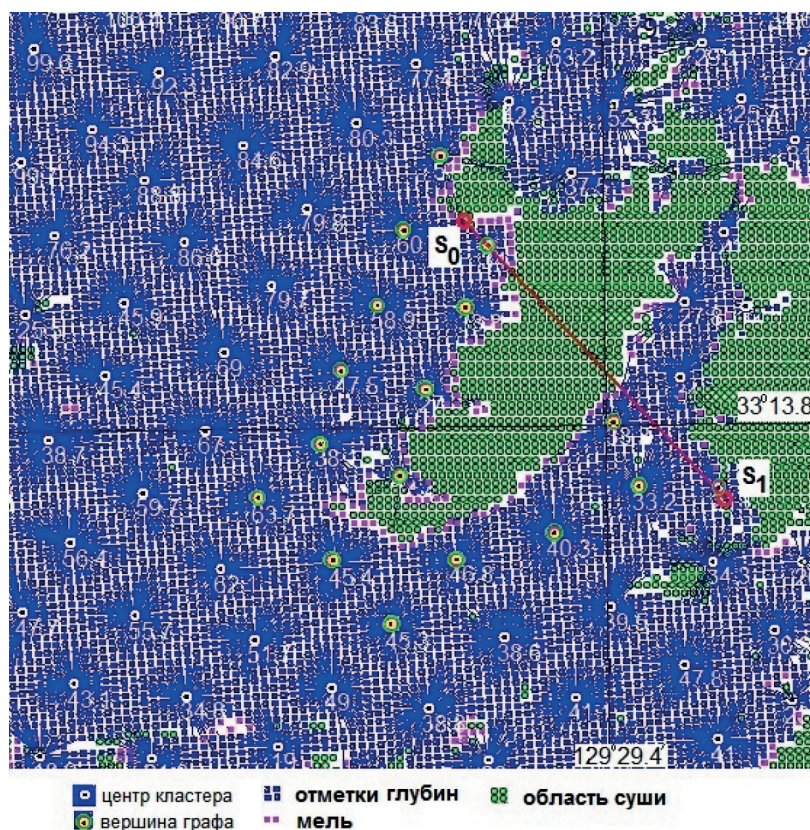


Рис. 1. Формирования вершин графа маршрута на основе кластеров

Радиус кластеров зависит от значений коэффициентов метрики (1). Полученное число кластеров зависит от числа точек района плавания и размеров района, и шага сетки.

В таблице приведены критерии качества кластеризации, которые определены в соответствии с формулами (2) – (4) для соответствующих значений коэффициентов метрики для районов Амурского и Уссурийского заливов и района около о. Хоккайдо.

Таблица

#### Параметры кластеризации

Район плавания	Размер района, широта × долгота, м. м.	Число точек	Число кластеров	Коэффициенты метрики	Значение критерия качества кластеризации $F_0/F_1$
Амурский залив	5,7 × 6	180	11	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	0,3134
			12	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,3216
			33	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,2975
			50	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,2829
			139	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,0195

Таблица  
 (Окончание)

Район около о. Хоккайдо	60 × 60	12952	59	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	0,8934
			59	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,8522
			113	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,7528
			148	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,7438
			434	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,7276
Уссурийский залив	50 × 89	11322	85	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	1,057
			85	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,8252
			88	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,776
			158	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,7206
			376	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,687

Из приведенных расчетов видно, что с ростом величины  $d_p/d_h$  значение критерия качества кластеризации уменьшается. Для целей кластеризации в данной задаче необходимо в первую очередь учесть значения глубин и затем расстояние между точками при оптимальном соотношении коэффициентов меры близости по расстоянию и разности глубин. В соответствии с формулами (2) – (4), наиболее близки к оптимальным значениям коэффициенты  $d_p = 0,55$ ;  $d_h = 0,75$ . Расчеты показывают, что данные результаты дают наилучшую кластеризацию в соответствии со значением критерия качества кластеризации.

### Моделирование графа маршрута на базе кластеров

После того как сформированы вершины графа, все множество вершин делится на два класса. Первый класс включает множество вершин, лежащих над прямой соединяющей начальную и конечную точки, второй класс включает точки, расположенные под прямой (либо слева и справа от прямой). В каждом из подмножеств выполняется сортировка координат по смещению широт к точке  $S_1$ . Сортировка позволяет выполнить выбор вершин (центроидов) для формирования ребер в порядке следования в файле данных, при движении сверху вниз (соответственно курсу судна), либо снизу вверх. Для каждой пары вершин формируется ребро, связывающее эти вершины. В результате построения формируется граф, представленный на рис. 2.

На рис. 2 показан один из возможных вариантов построения графа пути на основе последовательно сформированных вершин графа. Данный вариант даёт неприемлемый результат. Возможен вариант формирования ребер всеми возможными способами с последующей оптимизацией числа ребер на основе выбора кратчайших путей среди трех, четырех и далее вершин так, чтобы сформированные ребра не пересекали границу суши и мелей. В результате получается граф, представленный на рис. 3.



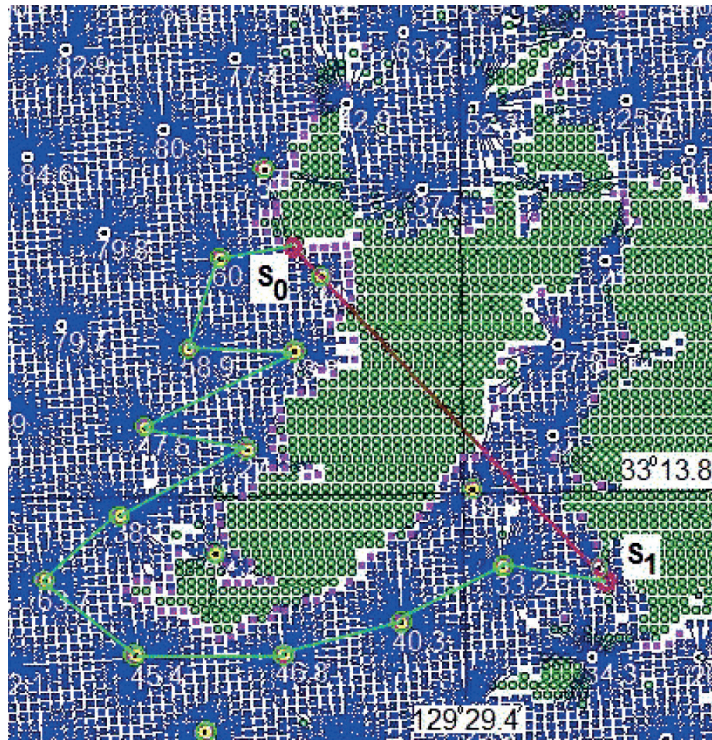


Рис. 2. Вариант последовательного формирования ребер графа

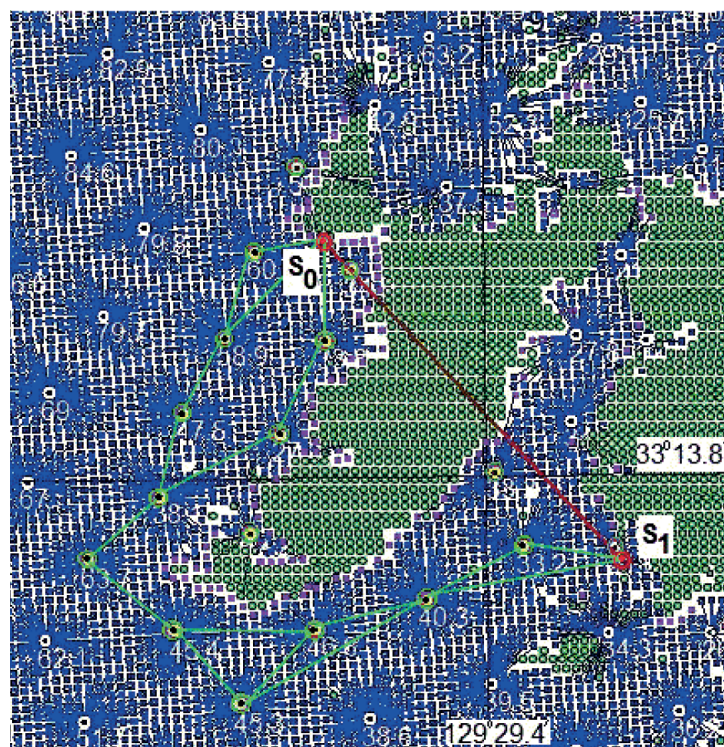


Рис. 3. Вариант выбора кратчайших промежуточных ребер

Граничные точки области суши формируют «зону обхода» вокруг суши. На данном этапе возможно применение классического алгоритма обхода «A-Search» [10], но предложенный метод обхода областей суши на основе сформированных центроидов по границе суши позволяет эффективно с небольшими вычислительными затратами реализовать построение вершин графа.

Программная реализация описанных алгоритмов требует предварительного формирования ограниченных по числу точек цифровых массивов данных [11], так как реализованные алгоритмы требуют больших вычислительных затрат в использовании оперативной памяти. Для больших акваторий моря кластеризация выполняется поэтапно, для каждого участка. Дополнительно, на этапе поиска кратчайшего пути для группы связанных компонент кластеров наиболее эффективно использовать эвристические оценочные функции. Подход поиска кратчайших путей на основе эвристик для уже сформированного графа представлен в работах [12], [13].

### Выводы

Разработанный алгоритм кластеризации позволяет выполнить классификацию точек электронной навигационной карты, включающей район плавания, на непересекающиеся подмножества кластеров, содержащих объекты «схожих» по метрике кластеризации. В работе представлена реализация алгоритма на примере сложного района плавания. Изменение значений коэффициентов позволяет изменять размеры кластеров в зависимости от целей реализации алгоритма и характеристик района плавания.

Предложенный алгоритм формирования графа маршрута позволяет строить сеть возможных маршрутов, которая охватывает область, находящуюся не только вдоль кратчайшего маршрута перехода, но и смежные районы, что является важным при поиске оптимального маршрута по расстоянию, по времени прохождения и безопасности маршрута. Кластеризация позволяет значительно сокращать объем вычислений и получать возможные решения. Изменение функционала метрики позволит строить маршруты, ориентируясь не только на глубину, но и на иные параметры судоходства.

Дальнейшие исследования возможности применения кластерного анализа для целей судовождения должны включать этапы анализа погрешностей вычислительных алгоритмов. Еще одно направление исследований связано с включением в алгоритмы кластеризации и формирования маршрута движения судна гидрометеорологических факторов и учета критериев безопасности судовождения. Следующее направление дальнейших исследований и совершенствования математического и программного обеспечения для автоматизированной информационной телекоммуникационной системы управления и навигации морских судов [14] направлено на разработку интеграции с современными электронными навигационно-информационными картографическими системами [1], [2] и новыми методами обработки и представления геоинформации, визуализации навигационной графической информации [15], [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобастов В. М. Электронные картографические системы в судовождении: учеб. пособие / В. М. Лобастов. — Владивосток: Изд-во МГУ им. Г. И. Невельского, 2009. — 167 с.
2. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы: учеб. пособие / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2004. — 302 с.
3. Ключева С. Ф. Моделирование маршрута движения судна на основе алгоритмов кластеризации / С. Ф. Ключева, А. Д. Акмайкин, П. А. Салюк // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12 – 14, 2016. — IEEE Catalog Number: CFP13794. — CDR.
4. Ключева С. Ф. Применение алгоритмов кластеризации в задачах навигации по глубинам морского дна / С. А. Ключева // Евразийское научное объединение. — 2016. — Т. 1. — № 4 (16). — С. 4–9.
5. Gower J. C. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties / J. C. Gower // Biometrics. — 1971. — Vol. 27. — No. 4. — Pp. 857–871. DOI: 10.2307/2528823.
6. Ali B. B. K-means clustering based on gower similarity coefficient: A comparative study / B. B. Ali, Y. Massmoudi // Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552669.
7. Atev S. Clustering of vehicle trajectories / S. Atev, G. Miller, N. P. Papanikolopoulos // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2010. — Vol. 11. — Is. 3. — Pp. 647–657. DOI: 10.1109/TITS.2010.2048101.



8. Savchuk T. O. Information technology of clustering problem situations in computing and office equipment / T. O. Savchuk, S. I. Petrishyn, P. Kisała, B. Imanbek, S. Smailova // 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications. — International Society for Optics and Photonics, 2015. — Pp. 98161W-98161W-8. DOI:10.1117/12.2229126.

9. Бирюков А. С. Решение задач кластерного анализа коллективами алгоритмов / А. С. Бирюков, В. В. Рязанов, А. С. Шмак // Вычислительная математика и математическая физика. — 2008. — Т. 48. — № 1. — С. 176–192.

10. Goldberg A. V. Computing the shortest path: A-search meets graph theory / A. V. Goldberg, C. Harrelson // Proceedings of the sixteenth annual ACM — SIAM symposium on Discrete algorithms. — Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. — Pp. 156–165.

11. Поляков И. В. Алгоритмы поиска путей на графах большого размера / И. В. Поляков, А. А. Чеповский, А. М. Чеповский // Фундаментальная и прикладная математика. — 2014. — Т. 19. — № 1. — С. 165–172.

12. Akmaykin D. A. Optimization of the search algorithm for the shortest route / D. A. Akmaykin, S. F. Klyueva, O. A. Bukin, P. A. Salyuk // “Stability and Control Processes” in Memory of VI Zubov (SCP), 2015 International Conference. — IEEE, 2015. — Pp. 545–548.

13. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62.

14. Акмайкин Д. А. Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 229–236.

15. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 171–179.

16. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.

## RESULTS OF RESEARCHING THE PROBLEM OF FORMING A GRAPH OF VESSEL'S ROUTE ON THE BASIS OF ALGORITHMS OF CLUSTERING

*The class of problems associated with the forming of the graph, the construction of its vertices and edges on the basis of specified conditions and a large number of source data is relevant for researchers in the modern theory of graphs. These problems belong to the class of unrealizable tasks. To solve such problems of artificial intelligence methods, cluster analysis, and the use of heuristic and evolutionary algorithms in conjunction with the new computer is the most effective technology. The task of forming a graph of the route the ship movement belongs to a class of such problems. Heuristic is the possibility of using the results of the clustering of the original digital database as a basis for the formation of vertices and edges of the graph. This problem is the subject of the article. The digital database of navigation area includes the depths, heights and shallows. The proposed method of clustering is, based on the metric that takes into account the distance between points on the map and difference of depth. Numerical values of clustering parameters and calculating numeric values of clustering criterion of quality metrics for different values of the coefficients are shown. The result of work, in details described designed and implemented in software clustering algorithm. The software simulation results of the algorithm in the area characterized by a winding coastline, the headlands, shoals, bays and inlets, as well as the distribution of the islands in the area of construction of the route was presented. On the base of the clustering performed formation graph tracks the vessel route. Shown an algorithm for constructing the vertices and edges of the graph. The programme allowed visualizing the original digital database and the results a graph of vessel's route. In conclusion, given the necessary basic directions for further research.*

*Keywords: clustering, metrics, clustering validity, vessel's route, electronic navigational chart.*

## REFERENCES

1. Lobastov, V. M. *Jelektronnye kartograficheskie sistemy v sudovozhdenii: uchebnoe posobie*. Vladivostok: Mor. gos. Un-t, 2009.

2. Vagushenko, L. L. *Sudovye navigacionno — informacionnye sistemy: uchebnoe posobie*. Odessa: Feniks, 2004.
3. Klyueva, S. F., D. A. Akmaykin, and P. A. Salyuk. "Modeling a graph of vessel's route on the basis of algorithms of clustering." *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12 — 14, 2016*. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR.
4. Kljueva, S. F. "Primenenie algoritmov klasterizacii v zadachah navigacii po glubinam morskogo dna." *Evrazijskoe nauchnoe obединenie* 1.4(16) (2016): 4–9.
5. Gower, J. C. "A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties." *Biometrics* 27.4 (1971): 857–871. DOI: 10.2307/2528823.
6. Ali, Bilel Ben, and Youssef Massmoudi. "K — means clustering based on gower similarity coefficient: A comparative study." *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference on*. IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552669.
7. Atev, Stefan, Grant Miller, and Nikolaos P. Papanikolopoulos. "Clustering of vehicle trajectories." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11.3 (2010): 647–657. DOI: 10.1109/TITS.2010.2048101.
8. Savchuk, T. O., S. I. Petrishyn, P. Kisała, B. Imanbek, and S. Smailova. "Information technology of clustering problem situations in computing and office equipment." *16th Conference on Optical Fibers and Their Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2015. DOI:10.1117/12.2229126.
9. Birjukov, A. S., V. V. Rjazanov, and A. S. Shmak. "Reshenie zadach klasterного analiza kolektivami algoritmov." *Vychislitel'naja matematika i matematicheskaja fizika* 48.1 (2008): 176–192.
10. Goldberg, Andrew V., and Chris Harrelson. "Computing the shortest path: A search meets graph theory." *Proceedings of the sixteenth annual ACM — SIAM symposium on Discrete algorithms*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005: 156–165.
11. Polyakov, I. V., A. A. Chepovskiy, and A. M. Chepovskiy. "Algorithms for searching paths in huge graphs." *Journal of Mathematical Sciences* 19.1 (2014): 165–172.
12. Akmaykin, Denis A., S. F. Klyueva, O. A. Bukin, and P. A. Salyuk. "Optimization of the search algorithm for the shortest route." "Stability and Control Processes" in Memory of VI Zubov (SCP), *2015 International Conference*. IEEE, 2015: 545–548.
13. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62.
14. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Operational system design analysis and optimization of maritime traffic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 229–236.
15. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179.
16. Firsov, Yu. G., and I. V. Kozhukhov. "The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович —  
кандидат физико-математических наук, доцент.  
МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
akmaykin@msun.ru  
Клюева Светлана Федоровна —  
кандидат технических наук.  
МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
klsvetkl@gmail.com  
Салюк Павел Анатольевич —  
кандидат физико-математических наук.  
ТОИ ДВО РАН  
pavel.salyuk@gmail.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin Denis Aleksandrovich —  
PhD, associate professor.  
Maritime State University named after  
admiral G.I.Nevelskoi  
akmaykin@msun.ru  
Klyueva Svetlana Fedorovna — PhD.  
Maritime State University named after  
admiral G.I.Nevelskoi  
klyueva@msun.ru  
Salyuk Pavel Anatolievich — PhD.  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute  
pavel.salyuk@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 июля 2016 г.

## ПРЕВЕНТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В МОРСКОМ СУДОВОЖДЕНИИ

*Приведено обоснование метода количественной оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна, который положен в основу превентивного регулирования человеческого фактора в процессе судовождения. Алгоритм метода включает в себя три самостоятельных блока. Первый из них предполагает вычисление ранга сложности навигационной ситуации (безотносительно к человеческому фактору), итог которого отображается по десятибалльной шкале. Второй блок представляет собой определение (тестирование) уровня психологической устойчивости судоводителя, который в контексте обоснованного алгоритма является количественной оценкой человеческого фактора безотносительно к навигационной ситуации и также отображается по десятибалльной шкале. Третий, заключительный блок алгоритма, включает в себя расчёт экстремальности навигационной ситуации как функции ранга сложности и человеческого фактора, которая представлена в матричном виде в шкале, свойственной для величин с вероятностным смыслом. По своей сути, экстремальность одновременно представляет собой количественную оценку влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна и квазивероятность возникновения чрезвычайной ситуации, источником которой является навигационная авария. Структура метода позволяет формировать комплекс технических, организационных и образовательных мероприятий по регулированию человеческого фактора в морском судовождении с целью предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций.*

*Матрица экстремальности предполагает различные направления ее применения в практическом судовождении. В первую очередь, это системы поддержки принятия решения судоводителем, где величина экстремальности навигационной ситуации будет определять нагрузку системы. Кроме того, предложенный метод может быть использован при построении конвенционных систем контроля дееспособности вахтенного помощника капитана для дифференциации межсигнального промежутка времени при расследовании морских аварий и инцидентов с целью адекватной оценки их обстоятельств и во многих других случаях.*

*Ключевые слова: навигационная ситуация, сложность, экстремальность, человеческий фактор.*

### Введение

На протяжении всей истории освоения человечеством морей и океанов основной задачей являлось обеспечение безопасности мореплавания. До конца прошлого века эта задача решалась только двумя способами. Первый способ заключался в нормировании движения судов на море, когда путём принятия различных конвенций, резолюций и других нормативно-правовых актов различных уровней императивности международное морское сообщество пыталось обезопасить процесс мореплавания в отношении людей, судов, грузов и окружающей среды. Второй способ — совершенствование конструкций судов, технических средств, технологий различных процессов (в том числе и судовождения) — инициировал повышение безопасности мореплавания за счёт интенсификации научно-технического прогресса. Однако любые, пусть даже самые строгие, нормы морского права (содержащиеся в различных правилах, законах и т. п.) с умыслом или без него (как вариант или без такового) могут быть нарушены человеком, а вся надёжность, точность и безупречность суперсовременных технических средств может превратиться в «ничто» вследствие одной-единственной ошибки судоводителя. В обоих случаях значительно повышается вероятность возникновения чрезвычайной ситуации, а следовательно, риск для людей, судна и окружающей среды.

Таким образом, развитием только двух компонент (технической и нормативной) нельзя добиться обеспечения максимально возможного уровня безопасности мореплавания и снижения аварийности мирового морского флота, анализ которой показывает, что, например, число столкновений судов в море в общей доле аварийности вообще не снижается, и тенденция на их уменьшение

сегодня не просматривается. Вместе с тем около 80 % морских аварий и инцидентов происходит по вине человека [1], или, иными словами, основной причиной происшествий является так называемый «человеческий фактор».

Негативные последствия недооценки влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания были осознаны мировым морским сообществом только ближе к концу прошлого столетия, когда серьёзные аварии морских судов стали следовать одна за другой, а последствия этих аварий становились всё катастрофичнее. С этого момента исследование проблемы влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания является наиболее актуальным из направлений научных исследований, проводимых как на международном, так и на национальных уровнях. В число основных задач, возникающих перед наукой в контексте таких исследований, входит среди прочих задача оценки, учёта и прогнозирования влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания, решение которой связано и непосредственно зависит от наличия методов количественной оценки такого влияния. Наибольший вклад в исследование проблемы человеческого фактора в судоходстве внесли такие учёные, как Ф. М. Кацман [2], А. Е. Сазонов [3], [4], С. В. Смоленцев [5], В. Д. Клименко [3], [6] – [9], М. Л. Маринов [9] – [15], А. А. Даниленко [16], М. А. Котик [17] и др. Практически на каждой рабочей сессии Комитета по безопасности на море Международной морской организации (ИМО) рассматриваются вопросы, касающиеся человеческого фактора.

Вместе с тем необходимо констатировать, что методов количественной оценки влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания (и, в частности, на навигационную безопасность плавания судна), обладающих свойствами простоты и адекватности одновременно, общепризнанных и применяемых как на судах, так и в компаниях в рамках и в качестве необходимого элемента системы управления безопасностью в настоящее время не существует [18].

В настоящей статье представлены итоговые результаты обоснования метода количественной оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна, являющегося основой превентивного регулирования человеческого фактора в процессе судождения.

### **Обоснование методологической основы**

На борту судна судоводитель постоянно решает две взаимосвязанные задачи: расчёт целенаправленного, наиболее выгодного с точки зрения выполнения судном рейсового задания и безопасного в навигационном отношении пути судна, а также контроль действительного местоположения судна и его фактических элементов движения. Иными словами, в процессе своей работы судоводитель должен обеспечивать именно навигационную безопасность судна. Следовательно, при исследовании сегмента проблемы влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания, связанного с процессом судождения и судоводителями, необходимо ограничивать понятие «безопасность мореплавания» навигационной безопасностью, т. е. безопасностью судна как управляемого подвижного объекта.

В свою очередь, навигационная безопасность плавания судна в конкретный момент времени определяется текущим состоянием и качеством результата на выходе некоторой системы «судоводитель в ситуации» (рис. 1) [19]. Количественно этот результат предлагается оценивать таким показателем, как экстремальность, который определяет насколько навигационная ситуация является экстремальной. В свою очередь, экстремальная ситуация в работе судоводителя — это оцениваемая через призму его психологической устойчивости совокупность быстро изменяющихся обстоятельств и условий плавания, представляющих угрозу безопасности экипажа, судна и окружающей среды, обладающих свойством новизны для судоводителя и требующих от него максимального проявления его возможностей для принятия и исполнения адекватного ситуации решения с целью минимизации негативных последствий этой ситуации [20].



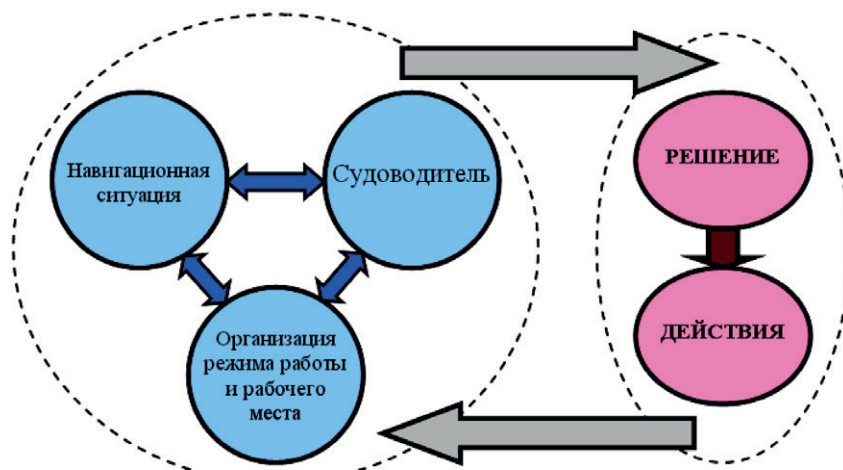


Рис. 1. Система «судоводитель в ситуации»

Таким образом, внешняя профессиональная среда всегда опосредована личностью судоводителя, причём поведение его содержит признаки, обусловленные внешней средой. Одновременно судоводитель не исполняет по отношению к навигационной ситуации роль «ведомого». Комплекс личностных характеристик судоводителя определяет его подготовленность к встрече с различными объективными и субъективными препятствиями, а также его устойчивость к вероятным отрицательным воздействиям со стороны профессиональной среды. Отсюда экстремальность — это не просто характеристика внешней среды или навигационной ситуации, а показатель специфического состояния системы «судоводитель в ситуации», изменяющийся в определенном интервале в зависимости от различных факторов [19].

Очевидно, что экстремальность системы «судоводитель в ситуации» (экстремальность навигационной ситуации) является количественной оценкой влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна. В общем случае экстремальность  $E$  можно представить как следующую функцию двух аргументов:

$$E = f(CNS, HF), \quad (1)$$

где  $CNS$  — сложность навигационной ситуации (Complexity of Navigational Situation);  $HF$  — комплексный показатель, характеризующий психологическое состояние судоводителя и его поведение (Human Factor).

Формула (1) является методологической основой для оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна.

В качестве основополагающих при обосновании метода были использованы следующие принципы:

- принцип рационального соотношения простоты и валидности (адекватности) метода оценки;
- принцип соблюдения границ знаний об объекте;
- принцип обязательности учёта психологических и физиологических аспектов;
- принцип индивидуальности;
- принцип системности;
- принцип допустимости экспертного оценивания;
- принцип презумпции компетентности и здоровья судоводителя;
- принцип практической применимости результата.

#### Формализованная оценка сложности навигационной ситуации

Навигационная ситуация является одним из элементов системы «судоводитель в ситуации» (см. рис. 1), а её сложность — одной из детерминант, определяющих влияние человеческого фак-

тора на навигационную безопасность плавания судна. Таким образом, в начале разработки метода количественной оценки такого влияния необходимо создать алгоритм оценки сложности навигационной ситуации. Под навигационной ситуацией в общем случае необходимо понимать неповторимую совокупность мгновенных значений характеристик взаимосвязанных, субъективных и объективных компонент, имеющих отношение к навигационной безопасности плавания судна и открывающихся восприятию и деятельности судоводителя в определённый момент времени [21].

Анализ морской практики позволяет выделить следующий конечный ряд компонент навигационной ситуации [21]: размеры акватории, глубина, оснащённость района средствами навигационного обеспечения, наличие надводных и подводных препятствий, скорость ветра, направление ветра относительно судна — курсовой угол ветра, сила волнения, направление волнения относительно судна — курсовой угол волнения, скорость течения, направление течения относительно судна — курсовой угол течения, видимость, ледовая обстановка, обледенение, интенсивность и плотность движения судов, количество опасных целей, скорость судна, размеры судна, организационные компоненты — качество и количество правил (норм), особенным образом регламентирующие плавание в отдельно взятом районе. Вместе с тем типовой навигационной ситуацией является совокупность значений характеристик всё тех же компонент в некоторый момент или отрезок времени, при этом каждое из значений принадлежит к своему конечному множеству [21].

В результате содержательного анализа компонент навигационной ситуации были сформированы конечные множества значений характеристик компонент навигационной ситуации, принадлежность к которым можно определить как по качественному, так и по количественному описанию множества. Для примера в табл. 1 представлены множества значений характеристик для двух компонент.

Таблица 1

**Компоненты навигационной ситуации и множества значений их характеристик (пример)**

Название компоненты	Множества				
	0	1	2	3	4
Скорость ветра	Безветрие	Слабый, 1 – 3 балла	Сильный, 4 – 6 баллов	Крепкий, 7, 8 баллов	Штормовой, 9 – 12 баллов
Ледовая обстановка	Лёд отсутствует	Лёгкая, льдом покрыто не более 20 % видимой поверхности моря	Умеренная, льдом покрыто 20 – 50 % видимой поверхности моря	Средней тяжести, льдом покрыто 50 – 80 % видимой поверхности моря	Тяжёлая, льдом покрыто более 80 % видимой поверхности моря

Каждой компоненте навигационной ситуации соответствует от двух до пяти множеств, при этом чем больше номер множества, к которому принадлежит текущее значение характеристики компоненты, тем сложнее навигационная ситуация (при прочих равных условиях).

В основу оценки был положен количественный критерий, выраженный следующим образом:

$$CNS = 1 - (1 - K_2) \cdot (1 - K_3) \cdot \dots \cdot (1 - K_{17}) \cdot (1 - K_{18}), \quad (2)$$

где  $K_2, K_3, \dots, K_{17}, K_{18}$  — коэффициенты, определяющие состояние соответствующей компоненты навигационной ситуации.

Восприятие навигационной ситуации, а следовательно, определение её сложности, в акваториях, относящихся к различным зонам (их три — зона открытого моря, зона прибрежного плавания и зона стесненного плавания), отличается принципиально, а компоненты имеют различный вес. Поэтому коэффициент  $K_1$  в формулу (2) не включён, а акватория плавания учитывается тем, что для каждой зоны имеет место свой набор коэффициентов. Таким образом, основной задачей при разработке метода формализованной оценки сложности навигационной ситуации было определение трёх наборов (по количеству видов акватории) по 54 базовых коэффициента, каждый из которых соответствует определённому множеству.

Для определения значения базовых коэффициентов было проведено экспертное оценивание, в процессе которого были решены две задачи ранжирования: по степени сложности двадцати описанных навигационных ситуаций и компонент по их значимости при определении сложности навигационной ситуации в акватории каждого вида [22].

В итоге многоступенчатой обработки результатов экспертного оценивания были получены значения базовых коэффициентов. Для примера в табл. 2 представлены значения базовых коэффициентов для двух компонент.

Таблица 2

**Расчётные коэффициенты**

Номер компоненты	Вид акватории	Номер множества			
		1	2	3	4
5	$j = 1$	0,040	0,081	0,121	0,161
	$j = 2$	0,044	0,088	0,132	0,176
	$j = 3$	0,037	0,073	0,110	0,147
12	$j = 1$	0,028	0,056	0,084	0,112
	$j = 2$	0,043	0,086	0,128	0,171
	$j = 3$	0,024	0,048	0,072	0,095

Расчитанное по выражению (2) значение сложности навигационной ситуации (CNS) позволяет получить ещё одну, более удобную для использования в практических целях, количественную характеристику навигационной ситуации — ранг её сложности.

Таблица 3

**Ранги сложности навигационной ситуации и их описание**

CNS	Ранг сложности	Лингвистическое наименование рангов и общее описание навигационных ситуаций
От 0,95	10	Критически тяжёлые навигационные ситуации. Плавание судна опасно и нежелательно. Велика вероятность гибели судна
От 0,85 до 0,95	9	Тяжёлые навигационные ситуации. Для обеспечения безопасности плавания от судоводителя требуется постоянная предельная концентрация внимания, максимальное проявление знаний, опыта и умения принимать нестандартные решения. Ошибка судоводителя, как правило, приводит к возникновению аварийной ситуации
От 0,75 до 0,85	8	Навигационные ситуации средней тяжести (умеренные). Для обеспечения безопасности плавания от судоводителя требуется постоянная концентрация внимания, проявление знаний, опыта. Быстрые возвратные действия при совершении ошибки позволят судоводителю не допустить возникновения аварийной ситуации
От 0,65 до 0,75	7	Нормальные навигационные ситуации. Для обеспечения безопасности плавания судоводителю достаточно действовать в соответствии с общепринятыми алгоритмами, знания о которых получены во время теоретической подготовки. У судоводителя существует достаточно времени для исправления своей ошибки
От 0,55 до 0,65	6	Лёгкие навигационные ситуации. Для обеспечения безопасности плавания от судоводителя требуется минимум стандартных действий. Ошибка судоводителя не критична
От 0,45 до 0,55	5	Сверхлёгкие навигационные ситуации. Для обеспечения безопасности плавания от судоводителя, кроме надлежащего наблюдения, каких-либо действий не требуется
От 0,35 до 0,45	4	
От 0,25 до 0,35	3	
От 0,15 до 0,25	2	
До 0,15	1	

В табл. 3 [23] показано, как взаимосвязаны значения CNS и ранга сложности и дано лингвистическое наименование и общее качественное описание навигационных ситуаций рангов. Результаты экспертной оценки, полные наборы коэффициентов и более подробное описание метода формализованной оценки сложности навигационной ситуации представлены в работах [21] – [23].

### **Количественная оценка человеческого фактора**

Одним из аргументов формулы (1) является «изолированный» человеческий фактор. Смысл изолированности заключается в том, что этот аргумент должен быть определён безотносительно к навигационной ситуации. Иными словами, «изолированный» человеческий фактор, подразумеваемая «общение» судоводителя с судном и техническими средствами (и проявляясь только при этом взаимодействии), никак не связан с конкретной навигационной ситуацией как отображением состояния внешней рабочей среды.

Сама идея оценки человеческого фактора, на первый взгляд, кажется несколько некорректной. Однако необходимо признать, что существуют объективные причины необходимости его формализации. Вместе с тем в процессе разработки методики оценки человеческого фактора появляется ряд труднопреодолимых препятствий. Действительно, человек — такая сложная, мультикомпонентная, гипердинамичная, и, главное, труднопрогнозируемая субстанция, что создание подобной методики кажется чуть ли не утопией. Для судна можно создать модель, изучить её в бассейне и сделать определённые, довольно-таки точные выводы о свойствах судна-прототипа. Проведение подобных операций с человеком на настоящем этапе развития науки невозможно [24]. Одновременно нельзя не заметить, что теория допускает создание моделей, описывающих любые явления, процессы и предметы, и человек здесь не исключение. Проблемой является способность добиться максимальной адекватности и правдоподобия модели.

Таким образом, один из вопросов, подлежащих решению при разработке методики оценки человеческого фактора, — это нахождение компромисса между адекватностью и простотой, второй вопрос — оценка составляющих психологического состояния, обладающих значительной динамикой. Действительно, такие параметры, как физическая усталость и психическая напряжённость в течение рейса варьируются в значительных пределах, что влечёт за собой изменчивость оценки психологического состояния.

Скорость судна, его курс и многие другие параметры отображаются в режиме реального времени на соответствующих индикаторах. Трудно представить себе прибор, аналоговый или цифровой, индикатор которого будет отображать текущее психологическое состояние судоводителя. Конечно, можно возложить на капитана судна (или иное лицо) обязанность по мониторингу психологического состояния вахтенного помощника с использованием какой-либо методики, но такой контроль не будет непрерывным хотя бы из-за того, что у капитана достаточно иных обязанностей по обеспечению безопасности мореплавания, а любая дискретность в подобном мониторинге противоречит его целям и самой сущности оценки. Решением этой проблемы может служить замена динамических параметров при определении количественной оценки человеческого фактора такой их характеристикой, как устойчивость. Например, вместо психической напряжённости судоводителя будет оцениваться его способность противостоять негативным последствиям психической напряжённости, или, иначе, способность судоводителя (его психики), находящегося в состоянии напряжённости, поддерживать иные параметры — статические компоненты человеческого фактора (реакция, дисциплинированность, внимательность и т. п.) постоянными. Иными словами, оценку психологического состояния судоводителя предлагается заменить оценкой его психологической устойчивости, которую можно получить априори как в количественном, так и в качественном виде при помощи известных методик, основанных на тестах [24]. При этом психологическая устойчивость обладает большой временной инертностью, не изменяясь для взрослого человека в течение продолжительного промежутка времени (её можно считать постоянной как минимум в течение одного рейса).

Для определения уровня психологической устойчивости (УПУ) судоводителя предлагается использовать немного модернизированную методику «Прогноз-2» В. Ю. Рыбникова, основанную на тесте, состоящем из 86 вопросов. Итогом применения методики является выраженный количественно (по десятибалльной шкале) УПУ судоводителя (табл. 4).



**Интерпретация результатов тестирования по методике «Прогноз-2»**

Уровень психологической устойчивости	Качественная лингвистическая характеристика
1	Неудовлетворительная психологическая устойчивость или психологическая неустойчивость (4-я степень ПУ). Очень велика вероятность срывов, неадекватных действий не только в экстремальных, но и в нормальных условиях
2	
3	Удовлетворительная психологическая устойчивость (3-я степень ПУ). Срывы, неадекватные действия вероятны в экстремальных ситуациях, при значительных физических и психических нагрузках
4	
5	
6	Хорошая психологическая устойчивость (2-я степень ПУ). Срывы маловероятны. Все действия, как правило, адекватны
7	
8	
9	Высокая психологическая устойчивость (1-я степень ПУ). Присутствует склонность к ригидности
10	

Валидность, надёжность и достоверность выбранной методики была исследована и в результате подтверждена по двум разнесённым по времени тестированиям курсантов БГАРФ 3 – 6-го курсов специальности «Судовождение» (109 человек), а также сопоставлением с результатами продолжительных наблюдений за поведенческими реакциями курсантов на различные ситуации.

В целях апробации методики «Прогноз-2» было проведено два исследования. Первое заключалось в сравнительном анализе психологической устойчивости курсантов-судоводителей 3 – 5-го курсов и курсантов и студентов тех же курсов других специальностей, второе — в сравнении психологической устойчивости практикующих судоводителей и представителей других, но не связанных с экстремальными условиями, профессий.

Более подробное обоснование психологической устойчивости судоводителя в качестве основной детерминанты влияния человеческого фактора на навигационную безопасность судна, а также результаты апробации методики «Прогноз-2» представлены в работах [24], [25].

**Количественная оценка влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна**

Аналитически описать функцию (2) довольно затруднительно. Для решения этой проблемы предлагается использовать табличное (матричное) представление данной функции в виде матрицы экстремальности (рис. 2).

Уровень психологической устойчивости	1	0,28	0,35	0,38	0,60	0,63	0,74	0,98	1,00	1,00	1,00
	2	0,25	0,32	0,35	0,54	0,58	0,68	0,90	0,94	0,95	0,97
	3	0,22	0,28	0,32	0,49	0,53	0,62	0,81	0,87	0,91	0,93
	4	0,19	0,24	0,29	0,43	0,48	0,57	0,71	0,81	0,86	0,9
	5	0,17	0,22	0,28	0,39	0,44	0,50	0,67	0,72	0,78	0,83
	6	0,14	0,19	0,24	0,33	0,38	0,43	0,57	0,67	0,71	0,76
	7	0,10	0,13	0,20	0,27	0,33	0,40	0,47	0,53	0,60	0,63
	8	0,08	0,11	0,18	0,22	0,29	0,33	0,40	0,46	0,53	0,56
	9	0,05	0,07	0,15	0,16	0,24	0,27	0,31	0,37	0,80	0,90
	10	0,02	0,04	0,12	0,15	0,19	0,21	0,23	0,28	0,90	1,00
<i>E</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Ранг сложности навигационной ситуации</b>											

Рис. 2. Матрица экстремальности

Основой для формирования матрицы экстремальности послужили результаты эксперимента, проведённого на полнофункциональном навигационном тренажёре. Суть эксперимента заключалась в измерении по разработанной в работе методике адекватности поведенческих реакций судоводителя с определённым УПУ в навигационных ситуациях различных рангов сложности. Однако в эксперименте участвовало 25 судоводителей с уровнями психологической устойчивости от 4 до 7. С целью окончательного формирования матрицы кроме результатов эксперимента, дополнительно были использованы спрогнозированные значения экстремальности, полученные при помощи результатов эксперимента статистическими методами, а также положения об отрицательном характере гиперустойчивости судоводителя. В зависимости от значений  $E_{ij}$  матрица делится на несколько областей:

- «красная область» ( $E_{ij} > 0,66$ ) — область однозначно экстремальных навигационных ситуаций (критическая область);
- «жёлтая область» ( $0,33 < E_{ij} \leq 0,66$ ) — область неоднозначно экстремальных навигационных ситуаций (буферная, промежуточная область);
- «зелёная область» ( $E_{ij} \leq 0,33$ ) — область однозначно неэкстремальных ситуаций (безопасная область).

Способ представления данных в матрице экстремальности даёт возможность изобразить её в виде графика  $E(R, HF)$ , поле которого также можно разделить на три области. Экстремальность навигационной ситуации определяет вероятность возникновения чрезвычайной ситуации, но не является ею с точки зрения классической теории вероятностей. Иными словами, чем выше экстремальность, тем больше вероятность навигационной аварии, являющейся источником чрезвычайной ситуации, и, следовательно, выше вероятность возникновения самой чрезвычайной ситуации. В таком контексте экстремальность можно трактовать как квазивероятность возникновения чрезвычайной ситуации, тем более, что для этой величины предлагается использовать шкалу, которая характерна для величин с вероятностным смыслом.

### Выводы

1. Предложенная матрица экстремальности позволит определять, какие навигационные ситуации для конкретного судоводителя являются экстремальными как по рангу с определённой общей качественной характеристикой ситуаций, так и по конкретному перечню навигационных ситуаций ранга. Такой вывод позволяет, во-первых, идентифицировать ситуации, в которых судоводитель не может нести самостоятельную вахту на мостике, т. е. должен работать под контролем, во-вторых, составить индивидуальную или типовую для судоводителей с таким же уровнем психологической устойчивости программу поэтапной подготовки, которая будет предусматривать тренажёрную отработку действий судоводителя в конкретных навигационных ситуациях одного ранга в совокупности с психологическими тренингами, ориентирующимися именно на эти навигационные ситуации и повышающими уровень психологической устойчивости.

2. Ещё одной предполагаемой сферой применения предложенной матрицы и основанного на ней метода оценки экстремальности является система поддержки принятия решений (СППР). Так, например, СППР для выполнения маневра последнего момента (МПМ), базирующаяся на математической модели МПМ с пассивным фактором [26], с целью учета обстоятельств и условий плавания и человеческого фактора может использовать в своей структуре матрицу экстремальности.

3. В структуре СППР матрица экстремальности может играть роль фильтра. В случае навигационных ситуаций с низким уровнем экстремальности система будет работать с меньшей нагрузкой, отдавая приоритет самостоятельным решениям судоводителям, и, наоборот, при навигационных ситуациях с высоким, «красным», уровнем экстремальности СППР будет не только предлагать оптимальные решения, но и исполнять их (или каким-либо образом «настаивать» на их исполнении). Другим вариантом использования предложенной матрицы в СППР является установка в этой системе зависимость от экстремальности промежутка времени с момента выдачи

решения до начала его исполнения. По истечении этого периода времени в случае бездействия вахтенного помощника капитана система либо сама исполняет решение, либо сигнализирует о лимите времени.

4. В современных системах контроля дееспособности вахтенного помощника капитана межсигнальный период между сигнализациями различного уровня можно сделать также зависимым от экстремальности навигационной ситуации. В итоге предложенная методика позволяет не просто количественно оценивать влияние человеческого фактора на навигационную безопасность судна, но и в целях предупреждения чрезвычайных ситуаций на море формировать комплекс различных технических, организационных и образовательных мероприятий и тем самым превентивно регулировать человеческий фактор.

5. Кроме того, матрица экстремальности даст возможность лицам, проводящим расследование морских аварий и инцидентов, количественно с учётом человеческого фактора оценить ситуацию, в которой произошло происшествие.

6. Очевидная аналитическая сущность метода делает возможным его представление на различных языках программирования с целью автоматизации расчёта экстремальности. Так, программа для ЭВМ, уже созданная в среде MS Excel с использованием языка Visual Basic for Applications, в настоящее время проходит процедуру регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ.

7. Предложенный подход может быть адаптирован для его практической реализации и в других отраслях, где роль человеческого фактора имеет такое же существенное значение. В более далёкой перспективе можно будет рассмотреть вопрос об унификации матрицы экстремальности, что позволит использовать её в любой отрасли в оригинальном универсальном виде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Субанов Э. Э.* Адаптация метода анализа иерархий для принятия решений при оценке степени опасности столкновения морских судов / Э. Э. Субанов, А. В. Миронов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2012. — № 3. — С. 8–12.

2. *Кацман Ф. М.* Человеческий фактор в проблеме обеспечения безопасности судоходства / Ф. М. Кацман. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 150 с.

3. *Клименко В. Д.* Учёт человеческого фактора в судоходных компаниях / В. Д. Клименко, А. Е. Сазонов // Морские информационные технологии: сб. науч. тр. — Вып. 2. — СПб.: Элмор, 2002. — С. 9–19.

4. *Сазонов А. Е.* Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // Сборник материалов XVI Общего собрания академии навигации и управления движением. — 2003. — С. 6–8.

5. *Смоленцев С. В.* Человеческий фактор и пути обеспечения безопасности мореплавания с использованием динамических семантических сетей / С. В. Смоленцев // Морские информационные технологии: сб. науч. тр. / под ред. А. Е. Сазонова. — СПб.: Элмор, 2002. — С. 4–8.

6. *Клименко В. Д.* Безопасность мореплавания и учёт человеческого фактора / В. Д. Клименко // Морской транспорт. Серия: Судовождение, связь и безопасность мореплавания: Экспресс-информация. — 2002. — № 8 (339). — С. 43–49.

7. *Клименко В. Д.* Вероятностный подход к нормированию человеческого фактора / В. Д. Клименко // Морские информационные технологии: сб. науч. тр. — Вып. 2. — СПб.: Элмор, 2002. — С. 20–32.

8. *Клименко В. Д.* Разработка методов количественного учёта влияния человеческого фактора на безопасность судна: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Валерий Дмитриевич Клименко. — СПб., 2003. — 161 с.

9. *Маринов М. Л.* Учёт человеческого фактора в аварийных ситуациях на море / М. Л. Маринов, В. Д. Клименко // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 25–29.

10. *Маринов М. Л.* Проблемы и перспективы оценки человеческого фактора в транспортной деятельности / М. Л. Маринов // Сборник трудов V Международного форума «Безопасность на транспорте». — 2015. — С. 114–116.

11. *Маринов М. Л.* Человеческий фактор — особенности решения проблемы: монография / М. Л. Маринов. — Саарбрюккен: Lap Lambert, 2014. — 178 с.

12. *Круглеевский В. Н.* Оценка и прогнозирование человеческого фактора в сфере безопасности транспортных комплексов / В. Н. Круглеевский, М. Л. Маринов, В. С. Стоянов // Международная науч.-практ. конф. «Транспорт России: проблемы и перспективы». — СПб: Институт проблем транспорта им. Н. С. Солюженко РАН, 2012. — С. 119–125.
13. *Малыгина Е. А.* Роль человеческого фактора в проблеме транспортной безопасности / Е. А. Малыгина, М. Л. Маринов // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2013. — № 2 (26). — С. 19–26.
14. *Маринов М. Л.* Метод и алгоритмы оценки поведения судоводителей в процессе работы / М. Л. Маринов // Сборник научных трудов Двенадцатой Международной конференции по гражданскому судостроению, морской технике освоения океана и шельфа, судоремонту и производству судового оборудования «Нева-2013». — СПб.: ЗАО «Транстех Нева Эксибишнс», 2013. — С. 7–14.
15. *Кобзев В. В.* Оценка морально-волевых характеристик судоводителей в процессе обучения на тренажёре / В. В. Кобзев, М. Л. Маринов, И. В. Телюк // Системы управления и обработки информации. — 2013. — № 27. — С. 116–124.
16. *Даниленко А. А.* Профессиональная надёжность плавсостава как важнейшее условие безопасности судоходства / А. А. Даниленко, А. А. Даниленко // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3. — С. 30–35.
17. *Котик М. А.* Природа ошибок человека-оператора (на примерах управления транспортными средствами) / М. А. Котик, А. М. Емельянов. — М.: Транспорт, 1993. — 252 с.
18. *Ермаков С. В.* Анализ применимости в мореплавании некоторых методов оценки человеческого фактора / С. В. Ермаков // Сб. науч. тр. SWorld. — Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. — Т. 1. — Вып. 4. — С. 83–90.
19. *Ермаков С. В.* Анализ системы «судоводитель в ситуации» / С. В. Ермаков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 699–703.
20. *Бондарев В. А.* Понятие «Экстремальная ситуация» в контексте безопасности мореплавания / В. А. Бондарев, С. В. Ермаков // Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: новые вызовы и ответы: материалы IX Международной конференции. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011. — С. 37–38.
21. *Ермаков С. В.* Формализация и содержание понятия «навигационная ситуация» / С. В. Ермаков // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 17–21.
22. *Ермаков С. В.* Экспертное оценивание как основа построения метода формализованной оценки сложности навигационной ситуации / С. В. Ермаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 122–128.
23. *Ермаков С. В.* Метод формализованной оценки сложности навигационной ситуации / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 26–31.
24. *Ермаков С. В.* Психологическая устойчивость судоводителя как основная детерминанта влияния человеческого фактора на навигационную безопасность судна / С. В. Ермаков // Безопасность жизнедеятельности. — 2013. — № 5. — С. 14–19.
25. *Ермаков С. В.* Результаты исследования психологической устойчивости судоводителей / С. В. Ермаков // Теория и практика современной науки: материалы IX Междунар. научно-практ. конф., Москва, 26 – 27 марта 2013 г.: в 2 т.— М.: Изд-во «Спецкнига», 2013. — Т. 1. — С. 75–79.
26. *Ермаков С. В.* Математическая модель маневра последнего момента с пассивным фактором / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 41–48.

## PREVENTIVE REGULATION OF THE HUMAN FACTOR IN MARINE NAVIGATION

*The method of quantifying the impact of human factors on the ships navigational safety, which is the basis for preventive regulation of the human factor in the process of navigation, was substantiated. The algorithm method comprises three separate blocks. The first one involves the calculation of the rank of the navigation situation complexity (without regard to the human factor). The result is displayed on a ten-point scale. The second block is the definition of (testing) the level of psychological stability of the navigator, who in the context of substantiated algorithm is a quantitative assessment of human factors without regard to the navigational situation and is also displayed on a ten-point scale. The third and final block of the algorithm involves the calculation extremality of navigational*



situation as a function of the rank of complexity and the human factor, which is presented in matrix form in scale, characteristic values for a probabilistic sense. At its core extremality at the same time is a quantitative assessment of the impact of human factors on the navigational safety of the ship and quasiprobability of an emergency, which is a source of navigation accident. The structure of the method allows to create a set of technical, organizational and educational measures to regulate the human factor in marine navigation to prevention of emergencies.

Extremality matrix assumes various ways of integrating it into practical navigation. First of all, this is decision support system, where the value of extremality of navigational situation will determine the system load. In addition, the proposed method can be used in the construction of conventional Bridge Navigational Watch Alarm System to differentiate intersignal period, during the investigation of marine casualties and incidents to adequately assess their circumstances and in many other cases.

*Keywords:* navigational situation, complexity, extremality, human factor.

## REFERENCES

1. Subanov, E. E., and A. V. Mironov. "Hierarchy analysis adoption in taking decisions while evaluation of danger degree in sea vessels collision." *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series* 3 (2012): 8–12.
2. Kacman, F. M. *Chelovecheskij faktor v probleme obespechenija bezopasnosti sudohodstva*. SPb.: SPGUVK, 2003.
3. Klimenko, V. D., and A. E. Sazonov. "Uchjot chelovecheskogo faktora v sudohodnyh kompanijah." *Morskije informacionnye tehnologii: Sb. nauch. trudov*. SPb.: Jelmor, 2002: 9–19.
4. Sazonov, A. E. "Chelovecheskij faktor i bezopasnost upravljenija podvizhnymi obektami." *Sbornik materialov XVI Obshhego sobranija akademii navigacii i upravljenija dvizheniem*. 2003: 6–8.
5. Smolencev, S. V. "Chelovecheskij faktor i puti obespechenija bezopasnosti moreplavanija s ispolzovaniem dinamicheskikh semanticheskikh setej." *Morskije informacionnye tehnologii: Sb. nauch. trudov*. SPb.: Jelmor, 2002: 4–8.
6. Klimenko, V. D. "Bezopasnost moreplavanija i uchjot chelovecheskogo faktora." *Morskoj transport. Seriya "Sudovozhdenie, svjaz i bezopasnost moreplavanija": Jekspress-informacija* 8(339) (2002): 43–49.
7. Klimenko, V. D. "Verojatnostnyj podhod k normirovaniju chelovecheskogo faktora." *Morskije informacionnye tehnologii: Sb. nauch. trudov*. SPb.: Jelmor, 2002: 20–32.
8. Klimenko, V. D. *Razrabotka metodov kolichestvennogo uchjota vlijanija chelovecheskogo faktora na bezopasnost' sudna*. PhD diss. (Tech.). SPb., 2003.
9. Marinov, M. L., and V. D. Klimenko. "Taking human factor into account in the emergency situations at sea." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 25–29.
10. Marinov, M. L. "Problemy i perspektivy ocenki chelovecheskogo faktora v transportnoj dejatel'nosti." *Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo foruma «Bezopasnost na transporte»*. 2015: 114–116.
11. Marinov, M. L. *Chelovecheskij faktor — osobennosti reshenija problemy: monografija*. Saarbrücken: Lap Lambert, 2014.
12. Krugleevskij, V. N., M. L. Marinov, and V. S. Stojanov. "Ocenka i prognozirovanie chelovecheskogo faktora v sfere bezopasnosti transportnyh kompleksov." *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija "Transport Rossii: problemy i perspektivy": trudy konferencii*. SPb., 2012: 119–125.
13. Malygina, E. A., and M. L. Marin. "The role of human factor in transport safety problem." *Problemy upravljenija riskami v tehnosfere* 2 (26) (2013): 19–26.
14. Marinov, M. L. "Metod i algoritmy ocenki povedenija sudovoditelej v processe raboty." *Sbornik nauchnyh trudov Dvenadcatoj Mezhdunarodnoj konferencii po grazhdanskomu sudostroeniju, morskoi tehnike osvoenija okeana i shel'fa, sudoremontu i proizvodstvu sudovogo oborudovanija "Neva-2013"*. SPb., 2013: 7–14.
15. Kobzev, V. V., M. L. Marinov, and I. V. Teljuk. "Ocenka moralno-volevyh karakteristik sudovoditelej v processe obuchenija na trenazhore." *Sistemy upravljenija i obrabotki informacii* 27 (2013): 116–124.
16. Danilenko, A. A., and A. An. Danilenko. "Professional reliability of crew as the most important prerequisite of the safety of the shipping." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 30–35.
17. Kotik, M. A., and A. M. Emeljanov. *Priroda oshibok cheloveka-operatora (na primerah upravljenija transportnymi sredstvami)*. M.: Transport, 1993.
18. Ermakov, S. V. "Analysis of the applicability in seafaring of some methods of human factor's assessment." *Sbornik nauchnyh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii "Modern*

problems and ways of their solution in science, transport, production and education' 2012". Vol. 1. Is. 4. Odessa: KUPRIENKO, 2012: 83–90.

19. Ermakov, S. V. "Analiz sistemy "sudovoditel v situacii." *Vestnik of MSTU* 16.4 (2013): 699–703.

20. Bondarev, V. A., and S. V. Ermakov. "Ponjatie "Jekstremalnaja situacija" v kontekste bezopasnosti moreplavaniya." *Morskaja industrija, transport i logistika v stranah regiona Baltijskogo morja: novye vyzovy i otvety: materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii*. Kaliningrad: Izdatelstvo BGARF, 2011: 37–38.

21. Ermakov, S. V. "Formalization and the content of term "navigational situation." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 17–21.

22. Ermakov, S. V. "Expert evaluation as the basis of building method of formalized assessment of complexity of navigational situation." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2013): 122–128.

23. Ermakov, S. V. "Method of formalized assessment of complexity of navigational situation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 26–31.

24. Ermakov, S. V. "Psychological Stability of Navigator, as the Primary Determinant of Human Factor Influence on the Navigational Safety of the Vessel." *Life safety* 5 (2013): 14–19.

25. Ermakov, S. V. "Rezultaty issledovanija psihologicheskoy ustojchivosti sudovoditelej." *Teorija i praktika sovremennoj nauki: materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, g. Moskva, 26–27 marta 2013 g. V 2 t.: t. I / Nauch.-inf. izdat. centr "Institut strategicheskikh issledovanij"*. M.: Speckniga, 2013: 75–79.

26. Ermakov, S. V. "Mathematical model of last moment maneuver with passive factor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 41–48.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —  
старший преподаватель.  
Балтийская государственная академия  
рыбопромышленного флота  
esv.klgd@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov Sergey Vladimirovich —  
Senior Lecturer.  
BFFSA  
esv.klgd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-50-61  
УДК 656.613: 519.86

И. В. Зуб,  
Ю. Е. Ежов

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ ТЕХНИКИ НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

В работе рассмотрены проблемы безопасности эксплуатации перегрузочной техники на контейнерном терминале (КТ). Поставлена задача посредством имитационной модели выявить конфликтные ситуации, которые оказывают влияние на безопасность эксплуатации КТ. В процессе эксплуатации КТ существует вероятность возникновения аварии, инцидента, отказа и повреждения перегрузочной техники (ПТ), что влечет за собой нарушение правил промышленной и экологической безопасности (разлив топлива, гидравлического масла и т. п.). В результате этих обстоятельств снижается скорость обработки транспортных средств и пропускная способность КТ, что влечет за собой экономические потери, а также возможные потери грузоперевозчиков. При эксплуатации ПТ на промышленную безопасность оказывают влияние следующие факторы: квалификация оператора ПТ, психофизиологическое состояние оператора, состояние окружающей среды (погодные условия, состояние покрытия терминала, интенсивность движения транспортных средств и другой ПТ, сложность выполняемой операции). Повышение уровня безопасности труда решается с помощью проведения организационных мероприятий (проведение инструктажей, разработка инструкций по охране труда и рабочих технологических карт, издание приказов и распоряжений, проведение стажировок с вновь поступившими на работу сотрудниками, проведение ежегодных проверок знаний, обучение сотрудников на рабочем месте и в учебно-курсовых комбинатах) и технических мероприятий (проведение регламентных работ, диагностика, контроль за эксплуатацией

*ПТ). Нарушение технологии работ с опасными грузами могут повлечь не только нарушение промышленной, но и экологической безопасности. Некачественное проведение ремонта ПТ приводит к нарушениям промышленной, экологической и экономической безопасности. Отмечается, что в ходе моделирования были получены следующие результаты: определены конфликтные ситуации, которые могут развиваться по нескольким различным сценариям; определен оптимизирующий параметр  $\tau$  (время восстановления работоспособности ПТ); определен объект оптимизации — производительность ПТ.*

*Ключевые слова: контейнерный терминал, безопасность эксплуатации, экологическая безопасность, перегрузочная техника, имитационная модель, пропускная способность.*

## Введение

Применение контейнеризации позволяет перевозить грузы с использованием практически всех видов транспорта. Эффективность смешанных перевозок достигается в том случае, когда минимизированы трудозатраты и время оказания погрузочно-разгрузочной услуги (ПРУ) на контейнерном терминале (КТ). Будем рассматривать КТ как систему, состоящую из взаимосвязанных и взаимодействующих между собой подсистем: технической, технологической, информационной и организационной:

$$КТ = \{\text{Технич. сист., Технолог. сист. ОС, ИС}\}, \quad (1)$$

где Технич. сист. — техническая система; Технолог. сист. — технологическая система; ОС — организационная система; ИС — информационная система.

На КТ, как и в любой транспортной системе, выделяются исходные и конечные пункты транзакций, перемещаемые объекты, техническое оборудование и штат квалифицированного персонала. В любой из подсистем при нарушении равновесия происходят нештатные ситуации, оказывающие влияние на безопасную эксплуатацию, которая является интегральным понятием и включает в себя промышленную, экологическую и экономическую безопасность.

КТ как самостоятельное звено логистической цепи оказывает погрузо-разгрузочную услугу (ПРУ) владельцам груза. Качественными составляющими ПРУ являются время оказания ПРУ и сохранность груза. В терминальные услуги также включена услуга по хранению груза. Время хранения и оказания ПРУ оказывает влияние на пропускную способность КТ ( $ПС_{КТ}$ ), а, следовательно, и на экономическую безопасность. Время оказания ПРУ зависит от автоматизации работ, производительности и технического состояния парка перегрузочной техники (ПТ).

Парк ПТ формируется в зависимости от принятой терминальным оператором технологической схемы погрузочно-разгрузочных работ (ПРР). Для обеспечения работоспособного состояния ПТ разрабатывается система технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Оптимизация циклов ТО и Р снижает эксплуатационные расходы на содержание ПТ и себестоимость ПРР, что повышает конкурентоспособность терминала.

## Основная часть

**Промышленная безопасность и охрана труда.** Сложность в исследовании и решении проблем охраны труда (ОТ) и промышленной безопасности (ПБ) заключается в том, что её непосредственное измерение невозможно. Безопасная и эффективная работа КТ зависит, прежде всего, от степени совершенства применяемой ПТ, технологических процессов, своевременного и качественного выполнения ТО и Р, осуществления организационных мероприятий и квалификации инженерно-технических работников и рабочих.

При дефиците на КТ квалифицированных специалистов одну или несколько функций ремонтной службы (РС) передают на аутсорсинг. Оценка эффективности от аутсорсинга производится по однокритериальной модели. Когда аутсорсинг оказывает комплексное влияние на показатели терминала, оценка эффективности производится по многокритериальной модели [1]. Решение об аутсорсинге принимается при сравнении текущего уровня эффективности системы ТО и Р

и эффекта, который достигается при передаче функциональных обязанностей по ТО и Р на аутсорсинг. Для этого формируется комплекс критериев, позволяющих определить качество и стоимость работ [2]. Проведение такого анализа позволяет выбрать стратегическое решение о развитии РС или рассматривать вопрос о переводе обслуживания ПТ на аутсорсинг [3]. Для определения функций, передаваемых на аутсорсинг, рассматриваются риски, которые позволяют оценить влияние аутсорсинга на деятельность терминала [4].

Передавая ПТ на ТО и Р аутсорсинговой организации (АО), терминальный оператор передает этой организации часть финансовых рисков, которые могут возникнуть из-за изменения стоимости запасных частей и комплектующих, в том числе из-за колебаний курса валют. Причем терминальный оператор в случае невыполнения АО качественного ремонта ПТ и срыва отгрузок может потерять грузоперевозчика. Кроме того, при передаче ТО и Р на аутсорсинг терминальный оператор сокращает свой ремонтный персонал. В случае расторжения договора с АО набрать квалифицированный персонал в короткие сроки сложно, что оказывает отрицательное влияние на промышленную и экономическую безопасность терминала.

Потенциально опасными объектами (ОО) на КТ являются ПТ и опасные грузы (ОГ) на тех КТ, которые имеют лицензию на работы с опасными грузами:

$$ОО = ПТ + ОГ. \quad (2)$$

Основной перегрузочной техникой КТ являются: *STS* (причальный перегружатель), краны на пневмоходу, ричстакеры, автоконтейнеровозы. ПТ с двигателем внутреннего сгорания оказывают влияние не только на промышленную, но и на экологическую безопасность.

Проблема ПБ рассматривается как важнейший аспект использования различной ПТ. Это обусловливается сложностью ПТ и тем возможным ущербом, который может быть нанесен в случае отказа ПТ при работе с ОГ и в случае его повреждения. Последовательность реализации технических, технологических и организационных решений зависит от стратегических целей терминального оператора и возможностей КТ. Организационные и технические мероприятия по ОТ и ПБ требуют оценки их эффективности, в том числе и экономической.

ПТ как объект повышенной опасности рассматривается как при эксплуатации (экспл.), так и при проведении ремонтно-профилактических работ (РПР) (технического обслуживания (ТО)), планово-предупредительных ремонтов (ППР), осмотров ( $L$ ) и испытаний ( $T_i$ ):

$$ПТ = f(\text{Экспл.}, \text{ТО}, \text{ППР}, L, T_i). \quad (3)$$

При эксплуатации ПТ (Экспл. ПТ) на безопасность производства работ оказывают влияние следующие факторы: квалификация оператора ( $K_{в.о}$ ) ПТ, психофизиологическое состояние ( $Pf$ ) оператора, состояние окружающей среды (ОС) (погодные условия, состояние покрытия терминала, интенсивность движения транспортных средств и другой ПТ, сложность выполняемой операции (выполнение операций при ППР контейнеров или негабаритного груза)), качество ППР ( $Q_{ППР}$ ):

$$\text{Экспл. ПТ} = f(K_{в.о}, Pf, \text{ОС}, Q_{ППР}). \quad (4)$$

При проведении ППР ПТ на безопасность ремонтных работ оказывают влияние: квалификация ремонтного персонала ( $K_{в.рп}$ ), исправность и соответствие используемого инструмента ( $T$ ), условия проведения ППР.

На качество ППР влияют: квалификация ремонтного персонала ( $K_{в.рп}$ ), наличие технической документации (ТД) и средств диагностики (СД), качество запасных частей ( $ЗЧ_k$ ), качество технических жидкостей и смазок ( $Q_{ТЖ}$ ), состояние окружающей среды (ОС):

$$Q_{ППР} = f(K_{в.рп}, T, \text{ТД}, \text{СД}, Q_{ТЖ}, \text{ОС}). \quad (5)$$

Повышение уровня безопасности труда решается двумя методами: внедрением организационных мероприятий (ОМ) и технических мероприятий (ТМ) на основе оценки условий ОТ и ПБ. К ОМ относятся: проведение инструктажей по ОТ и ПБ ( $И_{н.от \text{ и } пб}$ ), разработка инструкций по охране труда (ИОТ), разработка рабочих технологических карт (РТК) погрузочно-разгрузочных



работ, издание приказов и распоряжений (ПР) в области ОТ и ПБ, проведение стажировок с вновь поступившими на работу сотрудниками (Ст.), проведение ежегодных проверок знаний (ПЗ), обучение сотрудников на рабочем месте и в учебно-курсовых комбинатах (Об.):

$$OM = f(\text{Ин}_{\text{ОТ и ПБ}}, \text{ИОТ}, \text{РТК}, \text{ПР}, \text{Ст.}, \text{ПЗ}, \text{Об}). \quad (6)$$

Под ТМ понимается своевременное и качественное проведение ТО, планомерно-предупредительных ремонтов (ППР), осмотров и испытаний ПТ, разработка и изготовление специальных грузозахватных приспособлений (ГЗП):

$$TM = f(\text{ТО}, \text{ППР}, L, Tt, \text{ГЗП}). \quad (7)$$

Для оценки условий труда проводится аттестация рабочих мест. При этом оцениваются условия труда по гигиеническим критериям, травмобезопасности и обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты. Данные показатели характеризуют состояние условий труда, но не учитывают профессиональные качества оператора ПТ и техническое состояние ПТ. Техническое состояние ПТ зависит от качества профилактического обслуживания, квалификации и психофизиологического состояния ремонтного персонала. Квалификация и психофизиологическое состояние операторов ПТ и ремонтного персонала оказывают влияние на производительность и безопасность труда. Для определения квалификации и психофизиологического состояния требуются оценочные показатели, которые могли бы учесть их влияние на уровень безопасности ПТР. Если оценка квалификации сотрудников не вызывает затруднений, то оценка психофизиологического состояния сотрудников требует разработки и применения специальных тестов.

Показатели тестов психофизиологического состояния, прошедшие математическую обработку, позволяют наряду с качественной оценкой квалификации сотрудника определить его профессиональные возможности и пути повышения его квалификации, сделать вывод о соответствии квалификации сотрудника выполняемому технологическому процессу. Эти показатели учитываются при планировании и распределении сотрудников по участкам работ. Внедрение указанных организационных мероприятий на основе тестовых показателей будет способствовать снижению вероятностных рисков возникновения аварийных ситуаций.

При оценке безопасности ПТР с помощью вероятностных показателей возникает затруднение в математическом описании действий оператора по управлению ПТ и действий по устранению последствий воздействия неблагоприятных факторов.

По статистическим показателям проводят оценку аварийности за определенный период. Эти показатели происшествия как потенциально возможный исход погрузо-разгрузочного цикла. Подобный исход является по своей природе случайным событием в силу возникновения неблагоприятных факторов, влияющих во времени и пространстве на движения ПТ и контейнера.

За уровень безопасности выполнения погрузочно-разгрузочного цикла принимают вероятность  $P$  благополучного его завершения. За вероятность неблагоприятного погрузо-разгрузочного цикла (уровень риска) принимаем  $Z$ , при этом

$$P + Z = 1. \quad (8)$$

Вероятности  $P$  и  $Z$  являются показателями безопасности погрузочно-разгрузочного цикла. Исходя из формулы (8), для оценки безопасности одного погрузочно-разгрузочного цикла или уровня риска достаточно знать одну из указанных вероятностей.

Использование на КТ современной ПТ не привело к сокращению аварийных отказов и внеплановых простоев. В случае отсутствия резервного оборудования продолжительные простои техники нарушают ритмичность работы КТ. Это приводит к увеличению нагрузки на работников, обслуживающих ПТ, отрицательно сказывается на результатах труда, ведет к возрастанию вероятности получения производственных травм и профессиональных заболеваний. Одним из важных направлений снижения аварийности является автоматизация перегрузочных процессов.

**Автоматизация перегрузки контейнеров.** Для оптимизации работы ПТ ведутся работы по уменьшению времени рабочего цикла. Это достигается двумя способами: 1) заменой механизмов на более производительные; 2) автоматизацией процессов ПРР. Второй способ наиболее предпочтительный по двум причинам: во-первых, он менее затратный, во-вторых, автоматизация ПРР не только сокращает время работ, но и обеспечивает сохранность груза, исключает аварийные ситуации, которые могут произойти из-за ошибок оператора.

Системы автоматизации ПТ используют программные модули для отслеживания преград в зоне работ и профиля расположения контейнеров на судне или в штабеле. В дальнейшем, за счёт применения информационных технологий предполагается использовать систему автоматической идентификации контейнеров. Автоматизация ПРР позволяет не только уменьшить время рабочих циклов, но и сократить время работы ПТ, что приводит к увеличению времени между ТО и Р. В АСУ КТ объектом управления является технологический процесс, заключающийся в погрузке / выгрузке с / на транспортное средство контейнеров и их размещении и хранении в штабеле. Часто контейнеры в штабеле размещены в произвольном порядке, что приводит к лишним операциям при отгрузке нужного контейнера.

Последовательность событий принято называть потоком, следовательно, можно говорить о входном потоке контейнеров. Поток может быть регулярным, когда контейнеры поступают через равные промежутки времени, и случайным, когда интервалы являются случайной величиной. Несмотря на различия в типах контейнеров, они требуют реализации одинаковых операций, и с этой точки зрения поток является однородным. В случайном однородном потоке интервалы между поступлением контейнеров — случайные величины, они характеризуются функцией плотности распределения по экспоненциальному закону с плотностью вероятности  $p(t) = \nu e^{-\nu t}$ , где  $\nu$  — интенсивность обслуживания. При этом  $P_k(t)$  — вероятность того, что в течение промежутка времени  $t$  поступит  $k$  контейнеров, выражается формулой

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где  $\lambda$  — интенсивность потока, равная математическому ожиданию числа контейнеров (заявок), поступающих на терминал за единицу времени.

Зная ресурсы и закон функционирования терминала, можно сделать прогноз, как будет работать терминал при увеличении потока заявок и определить основные характеристики (скорость обслуживания транспортного средства, среднее время ожидания транспортным средством обслуживания). На основании полученных данных терминальный оператор будет планировать количество каналов обслуживания и состава парка перегрузочной техники. При этом терминальный оператор ориентируется на следующие критерии:

- 1) критерий ограничения расходов на оказание погрузочно-разгрузочной услуги  $P$ :

$$P = P_{\text{ПТ}} + P_{\text{обс}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $P_{\text{ПТ}}$  — расходы на приобретение перегрузочной техники;

- 2) критерий наибольшего экономического эффекта  $\mathcal{E}_{\text{эфф}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{эфф}} = C_{\text{пост}} - C_c \rightarrow \max, \quad (11)$$

где  $C_{\text{пост}}$  — поступающие средства (за вычетом налогов);  $C_c$  — расходы на системы, обеспечивающие поступление средств.

КТ является управляемой системой, на поведение которой оказывается целенаправленное воздействие. Под влиянием данного воздействия КТ переходит из одного состояния в другое. Управление КТ характеризуется двумя группами параметров. К первой группе относятся параметры, определяющие состояние терминала ( $x, y$ ). Поведение терминала во времени характеризуется функцией  $x = x(t)$ . Ко второй группе относятся внешние управляющие параметры  $u$ ,

их воздействия во времени определяется функцией  $u = u(t)$ . Пара  $(x(t), u(t))$  — управляемый процесс.

Отечественный и зарубежный опыт разработки АСУ показал, что среди объектов, подлежащих автоматизации, широкий класс образуют ТП, которые являются сложными стохастическими объектами, подверженными действию внешней среды с плохо определенной математической моделью.

С учетом воздействия внешней среды структурно-адекватная модель КТ будет иметь следующий вид:

$$\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{\theta}), \quad (12)$$

где  $y$  — предсказанное значение выходного показателя;  $f(x)$  — известная функция;  $\vec{x} \in X$  — вектор управляемых переменных;  $\vec{\theta}$  — вектор оценок параметров.

Под воздействием внешней среды подразумевается прибытие транспортных средств (ТС) под погрузку / выгрузку. Прибытие ТС, отказы ПТ носят стохастический характер, в связи с этим часто принятие управляющего решения происходит в условиях неопределенности.

Задача нахождения оптимального управления с учётом неопределённости может быть сформулирована в одном из следующих вариантов:

$$\bar{x}_1^* = \arg \min_{x \in X} [f(\bar{x}, \bar{\theta}) + g(L)\sqrt{d(\bar{x})}]; \quad (13)$$

$$\bar{x}_2^* = \arg \min_{x \in D} f(\bar{x}, \bar{\theta}), D = \{\bar{x} \in X, d(\bar{x}) \leq d_0\}, \quad (14)$$

$d(\vec{x})$  — дисперсия прогноза выхода модели (1), которая является известной функцией значений  $\vec{x}$ ;  $g(L)$  — квантиль нормированного распределения для заданной вероятности  $L$ .

Решения (13) и (14) отличаются от обычно используемого на практике решения

$$\bar{x} = \arg \min_{x \in X} f(\bar{x}, \bar{\theta}) \quad (15)$$

тем, что они учитывают неточность прогноза модели (12). При этом в случае использования варианта (13) вводится штраф за неточность модели, а в случае (14) допустимыми векторами считаются лишь те, для которых дисперсия прогноза  $d(\vec{x})$  не превосходит заданную величину  $d_0$ .

Перспективы развития АСУ КТ связаны с дальнейшим углублением и расширением информационной интеграции контейнерного плана со сменно-суточным планом и прибытием транспортных средств. Внедрение АСУ обеспечивает оперативность принятия экономически и технологически целесообразных решений. Информационные ресурсы являются экономической ценностью и выступают как один из факторов управления КТ.

**Имитационная модель работы контейнерного терминала.** Для исследования КТ использовалась имитационная модель, построенная посредством аппарата сети Петри, что позволило провести анализ поведения системы при её функционировании [5]. Формализм сетей Петри даёт возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, а также требует точных определений и исключает неопределенность и противоречия [6]. Последовательность событий сети образует моделируемый процесс, отражая его структурно-логическую связь.

Ряд специфических особенностей терминала делает целесообразным использование сетей Петри для его описания и анализа:

- в структуре КТ выделяются взаимосвязанные подсистемы со сложными структурными и функциональными отношениями, включая обратные связи;
- изолированная оптимизация отдельных подсистем может приводить к конфликтным ситуациям и не обеспечивает системную оптимизацию;
- стохастичность транспортных потоков делает процесс обслуживания заявок вероятностным.

Работа КТ обеспечивается разнородными ресурсами: человеческими, техническими, информационными [7], взаимодействие которых обеспечивает работу КТ и качество ПРУ [7], [8]. Эти ресурсы при моделировании помещаются в позиции сети в виде маркеров, причем маркерам придается вес (размерность) в соответствии с необходимыми для перехода ресурсами.

Рассмотрим структурно-логическую модель функционирования КТ, представленную сетью Петри (рис. 1). Функционирование КТ представляется в виде последовательности событий, основанных на причинно-следственных связях. Задачей данной модели является идентификация конфликтных ситуаций, в которых позиция имеет выходы на два и более перехода.

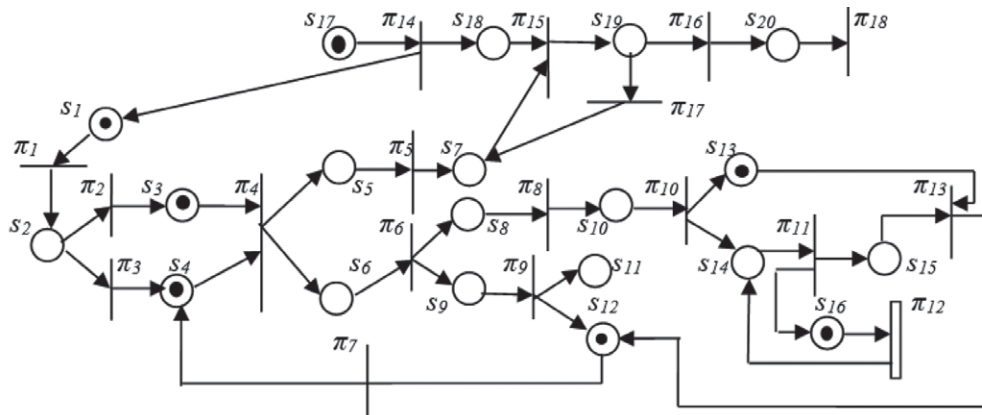


Рис. 1. Имитационная модель контейнерного терминала

- Условные обозначения:  $s_1$  — заявки на ПРУ;  $s_2$  — наличие ресурсов;  $s_3$  — операторы ПТ;  $s_4$  — парк ПТ;  $s_5$  — ПТ в работоспособном состоянии;  $s_6$  — ПТ в не работоспособном состоянии;  $s_7$  — ПТ готова к работе;  $s_8$  — заявка на ремонт ПТ;  $s_9$  — заявка на резервную единицу ПТ;  $s_{10}$  — дефектная ведомость;  $s_{11}$  — резерв ПТ отсутствует;  $s_{12}$  — резерв ПТ;  $s_{13}$  — наличие запасных частей (ЗЧ) на складе;  $s_{14}$  — отсутствие ЗЧ на складе;  $s_{15}$  — ПТ в ожидании ремонта;  $s_{16}$  — наличие ЗЧ у фирмы-поставщика;  $s_{17}$  — транспортное средство;  $s_{18}$  — транспортное средство под погрузку/выгрузку;  $s_{19}$  — транспортное средство погружено;  $s_{20}$  — готовность документов;  $\pi_1$  — формирование сменно-суточного плана;  $\pi_2$  — обеспечение выхода в смену необходимого количества операторов;  $\pi_3$  — планирование необходимого количества ПТ;  $\pi_4$  — приемка оператором ПТ;  $\pi_5$  — получение задания на оказание ПРР;  $\pi_6$  — вывод ПТ из эксплуатации;  $\pi_7$  — ввод резервной ПТ в эксплуатацию;  $\pi_8$  — диагностика ПТ механиком;  $\pi_9$  — рассмотрение заявки;  $\pi_{10}$  — проверка наличия ЗЧ на складе;  $\pi_{11}$  — заказ ЗЧ;  $\pi_{12}$  — доставка ЗЧ;  $\pi_{13}$  — ремонт ПТ;  $\pi_{14}$  — прибытие на терминал транспортного средства;  $\pi_{15}$  — оказание ПРР (погрузка / разгрузка);  $\pi_{16}$  — оформление транспортных документов выезд за терминал;  $\pi_{17}$  — информирование диспетчера об окончании ПРР;  $\pi_{18}$  — убытие транспортного средства с терминала

Из имитационной модели (см. рис. 1) видно, что на безопасность эксплуатации КТ влияют организационные, технологические, технические и информационные процессы. Процессы в пределах переходов  $\pi_{14}$  —  $\pi_{18}$  оказывают влияние на экономическую безопасность. Переходы  $\pi_4$  —  $\pi_{13}$  оказывают влияние как на промышленную, так и экологическую безопасность. Эта часть имитационной модели представляет собой внутренние процессы КТ, которые обеспечивают производство ПРУ, и подлежит анализу и оптимизации. В позиции  $s_1$  (заявка на обслуживание) находится маркер, который имеет некую размерность  $p$  (в зависимости от количества поступивших заявок  $n = n_1, n_2, \dots, n_i$ ). В позиции  $s_3$  маркер имеет размерность  $l$  — по количеству операторов ПТ,  $l > n$ . В позиции  $s_4$  маркер имеет размерность  $n$  — по количеству единиц ПТ. Позиция  $s_{11}$  является тупиковой, что свидетельствует о том, что при отсутствии резерва ПТ терминальный оператор не сможет производить ПРР. Отсутствие временных параметров и средств для фиксации порядка поступления маркеров в позиции не позволяет установить порядок срабатывания переходов. По-



этому в алгоритме имитационного моделирования каждому переходу  $\pi_j$ , который обозначает отдельную производственную операцию, приписывается время его реализации  $\tau_j$ . Значение  $\tau_j$  в ходе имитации может задаваться двояко: либо как среднее выборочное по совокупности статистических данных, либо путем разыгрывания соответствующей эмпирической функции распределения.

Влияние технического состояния ПТ на пропускную способность контейнерного терминала. В зависимости от используемого парка ПТ определяется пропускная способность КТ. Под пропускной способностью КТ понимаем максимальное количество груза, которое можно обработать на КТ за определённый период времени:

$$ПС_{КТ} = \sum_{i=1}^k \frac{\Pi_i}{t_i}, \quad (16)$$

где  $\Pi_i$  — суточная производительность парка ПТ определенного типа,  $t_i$  — время обработки одной грузовой единицы,  $k$  — количество типов ПТ.

ПС зависит от типа и количества ПТ. Надежность парка ПТ обеспечивает скорость обработки ТС. Увеличение парка ПТ позволяет сократить время обработки ТС, но для этого требуются дополнительные капитальные затраты, которые должны быть экономически обоснованы. ПС определяется как функция технологических и экономических параметров и внешних ограничений [9]:

$$ПС = f(Q_{вх}, \Pi_{ПТ}, ПС_{ПП}, V_{КТ}, t_{xp}, P_{ТС}), \quad (17)$$

где  $Q_{вх}$  — входной поток;  $\Pi_{ПТ}$  — производительность перегрузочной техники;  $ПС_{ПП}$  — пропускная способность подъездных коммуникаций;  $V_{КТ}$  — емкость КТ (в TEUs (транспортная условная единица, эквивалент 20-футового контейнера), м<sup>3</sup>, т и т. п.):

$$V_{КТ} = (F_{КТ}h)f_{гр}, \quad (18)$$

где  $F_{КТ}$  — полезная площадь КТ, т. е. площадь занятая под хранение груза (данный параметр зависит от типа ПТ и геометрических размеров КТ);  $h$  — высота складирования груза (данный параметр зависит от типа ПТ);  $f_{гр}$  — площадь, занимаемая единицей груза;  $t_{xp}$  — время хранения контейнера,  $t_{xp} = f(t_{xp,дор}, P_{ТС})$ ;  $P_{ПП}$  — ритмичность ППП;  $P_{ТС}$  — ритмичность подачи ТС.

Производительность перегрузочной техники ( $\Pi_{ПТ}$ ) — фактор, который может выступать как объект оптимизации. Она определяется конструктивными особенностями и техническим состоянием. Поддержание ПТ в работоспособном состоянии обеспечивается системой управления технической эксплуатацией (СУТЭ) ПТ, основной задачей которой является проведение мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособного состояния ПТ. Функционирование СУТЭ представляется в виде последовательности событий, основанных на причинно-следственных связях. Важной целью такого структурно-логического моделирования является идентификация конфликтных ситуаций (рис. 2).

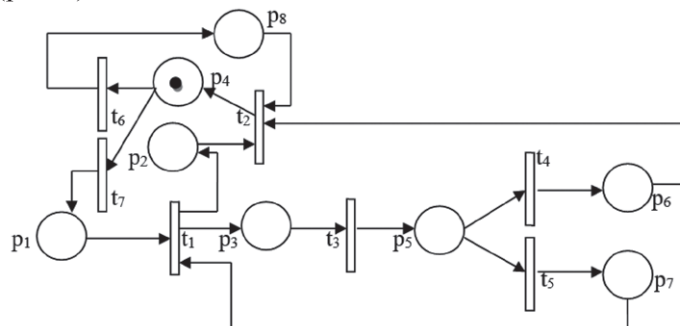


Рис. 2. Модель управления качеством ремонта ПТ

Условные обозначения:  $p_1$  — ПТ поставлена на диагностику;  $p_2$  — контролируемые параметры в заданных пределах;  $p_3$  — контролируемые параметры имеют отклонения;  $p_4$  — ПТ в эксплуатации;  $p_5$  — решение по техническим воздействиям;  $p_6$  — параметры в норме;  $p_7$  — ПТ отремонтирована;  $p_8$  — ПТ выведена на ТО;  $t_1$  — диагностика ПТ;  $t_2$  — проведение ТО;  $t_3$  — анализ отклонений параметров;  $t_4$  — настройка параметров;  $t_5$  — ремонт ПТ;  $t_6$  — наработка ПТ моточасов на ТО;  $t_7$  — наработка ПТ в моточасах на отказ

Если работу СУТЭ рассматривать без учёта реального времени, а только с позиций причинно-следственных связей, то СУТЭ можно рассматривать как конвейерную систему. Основной задачей модели конвейерной системы является проверка моделируемого ею процесса. В конвейерной системе каждый запуск должен быть обязательно завершён, и запуск новой операции не может быть разрешён до момента окончания предыдущей операции [10].

СУТЭ представляет собой многокритериальную задачу:

$$(BP, I, C_{T_p}, H_{от}, T_p, P_p, C_k, K_{TT}, R), \quad (19)$$

где  $BP$  — множество вариантов решения;  $R$  — отношение нестрогого предпочтения.

В сети Петри (см. рис. 2) в позиции  $p_4$  маркер имеет размерность  $k$ , где  $k = n$ , а  $n$  — количество однотипных единиц ПТ, которое имеется на КТ.

Конфликты возникают в следующих позициях:  $p_4$  — ПТ находится в эксплуатации, при наработке заданного времени (переход  $t_6$ ), ПТ становится на ТО, переход  $t_7$  будет запущен в случае отказа ПТ. При достижении маркером позиции  $p_5$  решение по техническим воздействиям принимается в зависимости от полученной информации: произвести настройку параметров (переходов  $t_4$ ) или произвести ремонт ПТ для восстановления работоспособности (переход  $t_5$ ). По окончании ремонтных работ (позиция  $p_7$ ) машина диагностируется (переход  $t_1$ ). Если все контролируемые параметры соответствуют требованиям завода-изготовителя (позиция  $p_2$ ), то производится ТО (переход  $t_2$ ) в соответствии с наработкой, и ПТ сдается в эксплуатацию (позиция  $p_4$ ).

В данной сети все переходы временные. Переходы  $t_2, t_6$  имеют нормированное время проведения работ. Переходы  $t_1, t_3, t_4, t_5, t_7$  имеют вероятностные временные параметры, каждому переходу  $t_j$  приписан закон распределения. В сети имеется две конфликтные позиции:  $p_4$  и  $p_5$ . Поскольку маркер имеет размерность в начальной разметке  $k > 1$ , то при определенном срабатывании переходов произойдёт распараллеливание процессов. При  $k > 3$  возможно выполнение одновременно или в произвольном порядке параллельного срабатывания переходов.

**Экологическая безопасность контейнерного терминала.** Проблемы экологической безопасности рассматриваются как применительно к конкретному КТ, так и к конкретной ситуации, так как причинами, оказывающими влияние на экологическую безопасность, могут быть повреждение опасного груза, аварии и инциденты, возникающие в процессе эксплуатации ПТ, разлив масла при проведении ТО и Р. В большинстве случаев аварийные ситуации возникают из-за халатности сотрудников, при отсутствии должного контроля при проведении ежесменного ТО, несвоевременное проведение ТО и Р, отсутствие диагностики ПТ. В процессе эксплуатации ПТ образуются накопление отработанных, экологически опасных материалов (использованные запчасти, масла, резинотехнические изделия), который хранятся на КТ, до момента их утилизации. Для предотвращения их вредного воздействия на окружающую среду (ОС) оборудуются специальные места хранения. Контроль за соблюдением правил хранения и сбора отходов на территории КТ возлагается на сотрудников терминала. Задачами контроля являются соблюдение лимитов образования и условий хранения отходов на территории ТТ и предотвращение загрязнения окружающей среды (почвы, акватории порта, воздушного пространства).

Для решения задач экологической безопасности на КТ выполняются следующие мероприятия [11]: устанавливаются нормы предельно-допустимых воздействий на ОС, устанавливаются объекты КТ, являющиеся источниками загрязнения, разрабатывается и проводится комплекс мероприятий по снижению загрязнений до предельно-допустимых значений и ниже. Нормами предельно допустимых значений по количеству загрязняющих веществ на КТ являются предельно-допустимые концентрации этих веществ в единице объема исследуемой среды (вода, воздух).

Для предотвращения негативных воздействий на ОС на основе математических моделей разрабатываются системы прогнозирования последствий данных воздействий. Для обеспечения экологической безопасности проводятся организационные и технические мероприятия. Под организационными мероприятиями понимаются: разработка документации по экологической безопасности, обучение сотрудников, разработка РТК и ознакомление с ними сотрудников, повышение

квалификации сотрудников и проверка их знаний. Под техническими мероприятиями понимается проведение ТО и Р, складирование, хранение и утилизация отходов, обеспечение защиты ОС от вредных выбросов (аспирация, изготовление кожухов и т. п.).

Формируется банк вероятных аварийных ситуаций  $S = (S_1, \dots, S_n)$ , определяется  $f(x/S_i)$  — плотность вероятности описания  $x$  ситуации при условии, что описание принадлежит ситуации  $S_i$ . Обозначим вероятности возникновения ситуаций через  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , где  $\sum z = 1, z > 0$ . Определим множество решений возникших ситуаций как  $D_d = (D_1, \dots, D_m)$ . Пространство решений  $D$  состоит из  $m + 1$  возможных решений. Для определения предпочтительного решения определяют решающее правило  $\lambda(x)$ , которое может быть представлено как распределение вероятностей на пространстве решений  $D$ .

### Выводы

1. В итоге применения имитационной модели к функционированию контейнерного терминала были получены следующие результаты:

- определены конфликтные ситуации, в которых существует вероятность развития событий по нескольким возможным вариантам;
- определен оптимизирующий параметр  $\tau$  (время восстановления работоспособности ПТ);
- определен объект оптимизации — производительность ПТ;
- показано, что для предотвращения аварийных ситуаций необходимо создание банка вероятных ситуаций и проработка путей их решения, что позволит сотруднику принимать адекватные решения;

2. Причинами аварийных ситуаций, оказывающих влияние на промышленную, экономическую и экологическую безопасность, являются некачественные ремонтные работы и не соблюдение графиков ТО и Р.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляров И. Д. Принятие решения об использовании аутсорсинга на основе оценки его эффекта для предприятия / И. Д. Котляров // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. — 2011. — № 2. — С. 56–63.
2. Курбанов А. Х. Методика оценки целесообразности использования аутсорсинга / А. Х. Курбанов // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 1. — С. 231.
3. Хлебников Д. Аутсорсинг как инструмент снижения затрат и оптимизации бизнес-системы [Электронный ресурс] / Д. Хлебников. — Режим доступа: [http://iteam.ru/publications/strategy/section\\_16/article\\_222](http://iteam.ru/publications/strategy/section_16/article_222) (дата обращения — 31.08.2016).
4. Вишняков О. Аутсорсинг как инструмент реформирования компании [Электронный ресурс] / О. Вишняков, Д. Гайнутдинов. — Режим доступа: <http://citicity.ru/13940/> (дата обращения — 01.09.2016).
5. Юдицкий С. А. Операционно-целевое моделирование динамики развития организационных систем средствами сетей Петри / С. А. Юдицкий // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 114–123.
6. Зуб И. В. Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 41–48.
7. Зуб И. В. Информационные технологии повышения эффективности управления контейнерным терминалом / И. В. Зуб // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 6–9.
8. Зуб И. В. Контейнерный терминал как объект управления качеством транспортно-технологических операций / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 35–41.
9. Зуб И. В. Пропускная способность контейнерного терминала как функция технологии управления / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: сборник трудов Седьмой международной науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 28-30.04.2009. — Т. 16 (2) / под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. — С. 176–181.

10. Руднев В. В. К вопросу об описании конвейерных процессов сетями Петри / В. В. Руднев // Автоматика и телемеханика. — 1985. — № 8. — С. 115–121.

11. Зуб И. В. Транспортный терминал как объект управления экологической безопасностью / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Д. А. Филиппова // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 123–130.

## SIMULATION MODEL FOR SAFETY ASSESSMENT OF MANUAL HANDLING EQUIPMENT

*The paper discusses problems of safe operation of handling equipment at the container terminal (CT). Tasked by the simulation model to identify conflict situations that affect the safety of operation of CT. In the process of operation of CT, there is a probability of occurrence of an accident, incident, failure and damage of handling equipment (HE), which entails the violation of rules of industrial and environmental safety (spillage of fuel, hydraulic oil, etc.). As a result of these circumstances reduces the processing speed of vehicles and the throughput capacity of CT, which leads to economic losses and possible loss of the carriers. In the operation of HE on industrial safety are affected by the following factors: qualifications of the operator HE, the psychophysiological state of the operator, the environment (weather conditions, the condition of the coating of the terminal), traffic vehicles and other HE, the complexity of the operation. Increasing the level of safety is solved through the organization of events (briefings, development of instructions on labor protection of workers and routings, issue orders and instructions, carrying out training with newly hired employees, conducting annual inspections of knowledge, training of employees in the workplace and in educational and training centers) and technical measures (routine maintenance, diagnostics, control over the operation of HE). Infringement of technology of work with dangerous goods can lead to the violation of industrial and environmental safety. Substandard repair of HE leads to violations of industrial, environmental, and economic security. It is noted that in the simulation were obtained the following results: identified conflicts that can develop in several different scenarios; determined by optimizing the parameter  $\tau$  (the restoration time of HE) and the object of optimizing the performance of HE.*

*Keywords: container terminal, operation safety, environmental safety, handling equipment, simulation model, throughput capacity.*

### REFERENCES

1. Kotliarov, I. D. “Decision to use outsourcing, based on an assessment of its effect for the enterprise.” *Vestnik of the Russian State University of Trade and Economy* 2 (2011): 56–63.
2. Kurbanov, A. Kh. “Methods of assessing the value of outsourcing.” *Modern problems of science and education* 1 (2012): 231.
3. Khlebnikov, D. Outsourcing как инструмент снижения затрат и оптимизации бизнес-системы. Web. 31 Aug. 2016 <[http://iteam.ru/publications/strategy/section\\_16/article\\_222](http://iteam.ru/publications/strategy/section_16/article_222)>.
4. Vishnyakov, A., and D. Gainutdinov. Outsourcing как инструмент реформирования компании. Web. 1 Sept. 2016 <<http://citcity.ru/13940/>>.
5. Yuditskii, S. A. “Operational-objective modeling of dynamics of organizational systems development via Petri nets.” *Automation and Remote Control* 69.1 (2008): 105–113.
6. Zub, I. V., and Y. E. Ezhov. “Modeling of functioning of the transport terminal nested Petri nets.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 41–48.
7. Zub, I. V. “Informacionnye tehnologii povysheniya jeffektivnosti upravleniya kontejnernym terminalom.” *Jekspluatatsija morskogo transporta* 3 (2009): 6–9.
8. Zub, I. V., and Y. E. Ezhov. “The container terminal as an objekt of management of the quality of transport-tehnologičai operations.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3(19) (2013): 35–41.
9. Zub, I. V. “Propusknaja sposobnost kontejnernogo terminala kak funktsija tehnologii upravlenija.” *Vysokie tehnologii, fundamentalnye issledovanija, obrazovanie: sbornik trudov Sedmoj mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokih tehnologij v promyšlennosti»*. 2830.04.2009, Sankt-Peterburg, Rossija. Vol. 16 (2). SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009: 176–181.
10. Rudnev, V. V. “On description of conveyor-belt processes as Petri nets.” *Automation and Remote Control* 46 (1985): 1027–1032.



11. Zub, I. V., Ju. E. Ezhov, and D. A. Filippova. "Transport terminal as ecological safety regulation object." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova: sbornik nauchnyh statej*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 123–130.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зуб Игорь Васильевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ежов Юрий Евгеньевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*ezhovye@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zub Igor Vasilevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ezhov Yyri Evgenevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*ezhovye@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 5 сентября 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-61-68**  
**УДК 624.3**

**М. Н. Кирсанов**

### СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОНТАЖНАЯ СХЕМА ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ

*Предлагается статически определяемая схема плоской фермы решетчатого типа с четырьмя внешними связями, моделируемыми симметрично расположенными опорными жесткими стержнями. Ставится задача определения прогиба конструкции в зависимости от числа панелей, размеров фермы и величины нагрузки, приложенной равномерным образом к узлам верхнего пояса. Усилия в стержнях определяются методом вырезания узлов. В цикле по числу стержней составляется матрица системы уравнений равновесия всех шарниров конструкции. Методом индукции по числу панелей с применением специальных операторов *rgf\_findrecur* и *rsolve* из пакета *Genfunc* системы компьютерной математики *Maple* получена точная формула для прогиба среднего узла нижнего пояса фермы в виде полинома четвертого порядка. Для последовательности коэффициентов формулы выводятся и решаются рекуррентные уравнения восьмого порядка. Кривые зависимости прогиба от числа панелей при фиксированной суммарной нагрузке и длине пролета обнаруживают резкие скачки и горизонтальную асимптоту, зависящую от высоты фермы и соотношения жесткостей стержней поясов и решетки. Обнаружена кинематическая изменяемость фермы при нечетном числе панелей, приводящая к равенству нулю определителя системы уравнений узлов. Построена непротиворечивая схема возможных скоростей изменяемой конструкции и найдены соотношения между скоростями узлов. С целью недопущения изгибных деформаций предлагается метод проектирования монтажа фермы с учетом размещения стержней фермы в отдельных плоскостях. Задача о последовательности крепления стержней в узлах сводится к решению задачи дискретной математики о реберной раскраске графа. Применяются операторы *Graph* и *EdgeChromaticNumber* пакета *GraphTheory* системы *Maple*. Приводится конкретный пример монтажа.*

*Ключевые слова:* ферма, прогиб, аналитическое решение, *Maple*, индукция, реберная раскраска.

#### Введение

Ферма — неотъемлемый элемент конструкций портовых складов, гидротехнических сооружений, портовых кранов, мостов и корпусов кораблей [1] – [4]. Легкие и прочные, сравнительно недорогие и удобные в монтаже, они широко распространены как в строительных, так и судовых конструкциях. Существует множество численных расчетов и специализированных программ

(в том числе метод конечных элементов), предназначенных для определения усилий в стержнях фермы и прогиба под действием различных нагрузок [5] – [10]. Для повышения надежности и достоверности таких расчетов весьма актуальны простые тестовые аналитические решения. В настоящей работе предлагается схема статически определимой конструкции и ее аналитический расчет. Ставится цель получить точное решение для напряженно-деформированного состояния фермы в зависимости от величины нагрузки, геометрических параметров и числа панелей. Обзор аналитических решений плоских ферм содержится в работах [11] – [13].

### Расчетная схема

Ферма, содержащая  $n$  панелей в половине пролета, состоит из  $m = 4n + 4$  стержней вместе с четырьмя опорными, соединенных  $2n + 2$  шарнирами (рис. 1). Опорные стержни примем жесткими. Конструкция статически определимая. Система уравнений равновесия (по два уравнения в проекциях для каждого узла) состоит из  $m$  уравнений для  $m$  неизвестных усилий в стержнях. Для расчета используем алгоритм [14] составления уравнений равновесия узлов в символьной форме на языке системы компьютерной математики Maple [14], [15].

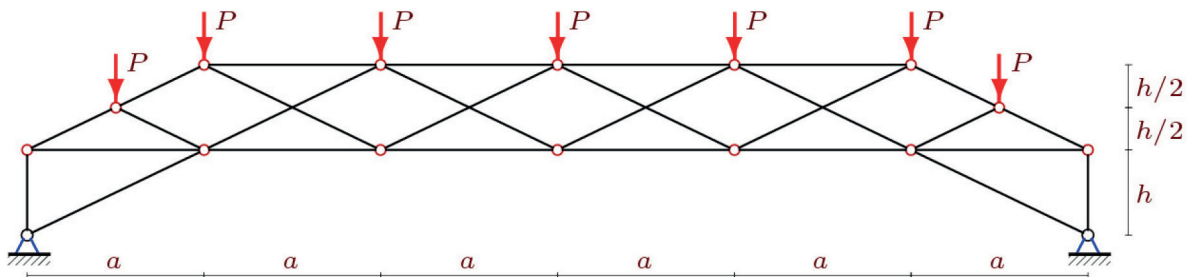


Рис. 1. Нагружение верхнего пояса фермы при  $n = 6$

Пронумеруем шарниры фермы слева направо сначала по нижнему, затем по верхнему поясу (рис. 2). Выберем начало координат в левой неподвижной опоре и введем в программу системы Maple координаты узлов:

$$\begin{aligned} x_i &= ai - a, y_i = 0, i = 1, \dots, n + 1; \\ x_{i+n+2} &= ai, y_{i+n+2} = h, i = 1, \dots, n - 1; \\ x_{n+2} &= a / 2, y_{n+2} = h / 2; \\ x_{2n+2} &= na - a / 2, y_{2n+2} = h / 2; \\ x_{2n+3} &= 0, y_{2n+3} = -h; \\ x_{2n+4} &= na, y_{2n+4} = -h. \end{aligned}$$

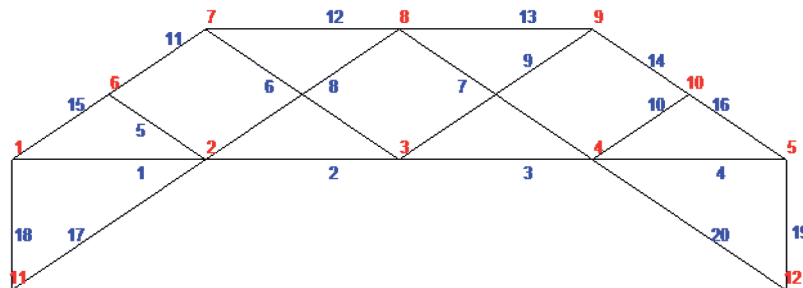


Рис. 2. Номера узлов и стержней при  $n = 4$

Структуру решетки фермы введем конфигурационными векторами  $\bar{V}_i, i = 1, \dots, m$ . Первая компонента этих векторов — номер шарнира фермы в условном начале этого вектора, вторая —

номер шарнира в его конце. Выбор направления векторов, определяющих структуру соединений стержней фермы, произволен и никак не связан с величинами усилий.

Для стержней нижнего и верхнего пояса имеем следующие векторы:  $\bar{V}_i = [i, i + 1]$ ,  $\bar{V}_{i+3n-2} = [i + n + 1, i + n + 2]$ ,  $i = 1, \dots, n$ ; стержни решетки:  $\bar{V}_{i+n} = [i + 1, i + n + 1]$ ,  $\bar{V}_{i+2n-1} = [i + 1, i + n + 3]$ ,  $i = 1, \dots, n - 1$ ,  $\bar{V}_{4n-1} = [1, n + 2]$ ,  $\bar{V}_{4n} = [n + 1, 2n + 2]$ . Стержни опор моделируются векторами  $\bar{V}_{m-3} = [2, 2n + 3]$ ,  $\bar{V}_{m-2} = [1, 2n + 3]$ ,  $\bar{V}_{m-1} = [n + 1, 2n + 4]$ ,  $\bar{V}_m = [n, 2n + 4]$ . Первый индекс в номере  $V_{j,i}$  принимает значения 1 или 2 и соответствует номеру компоненты вектора  $\bar{V}_i$ , второй — номер стержня. Элементы матрицы системы уравнений равновесия узлов **G** имеют следующий вид:

$$G_{q,i} = -l_{j,i} / l_i, \quad q = 2V_{i,2} - 2 + j, \quad q \leq m, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, \dots, m;$$

$$G_{r,i} = l_{j,i} / l_i, \quad r = 2V_{i,1} - 2 + j, \quad r \leq m, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, \dots, m,$$

где  $l_i = \sqrt{l_{1,i}^2 + l_{2,i}^2}$ ;  $l_{1,i} = x_{V_{2,i}} - x_{V_{1,i}}$ ;  $l_{2,i} = y_{V_{2,i}} - y_{V_{1,i}}$ ;  $i = 1, \dots, m$ .

Задача определения усилий в стержнях фермы сводится к решению системы линейных уравнений, которую запишем в матричной форме:

$$\mathbf{G}\bar{S} = \bar{B},$$

где  $\bar{B}$  — вектор нагрузок длиной  $m$ ;  $\bar{S}$  — вектор неизвестных усилий;  $B_{2i} = 1$ ,  $i = n + 2, \dots, 2n + 2$  — для случая нагружения по верхнему поясу (остальные элементы вектора правой части равны нулю) и  $B_{2(k+1)} = 1$  — при определении усилий в стержнях от действия сосредоточенной нагрузки, приложенной к среднему узлу нижнего пояса. Принято четное число панелей,  $k = 2n$ . Прогиб фермы в упругой стадии работы определяем по формуле Максвелла–Мора:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{m-4} \frac{S_i \tilde{s}_i l_i}{EF_i}, \quad (1)$$

где  $S_i$  — усилие в стержне  $i$  от действия внешней нагрузки;  $\tilde{s}_i$  — усилие в стержне  $i$  от действия единичной вертикальной силы в середине пролета нижнего пояса;  $E$  — модуль упругости;  $F_i = F_0$  — площадь сечений стержней верхнего и нижнего пояса длиной  $a$ ;  $F_i = F_0 / \gamma$  — площадь сечений стержней решетки длиной  $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ . Если последовательно рассчитывать прогиб в фермах с различным числом панелей ( $n = 1, \dots, 16$ ), то можно заметить, что результирующая формула будет иметь всякий раз один и тот же вид:

$$\Delta = \frac{P}{EF_0 h^2} (A_k a^3 + C_k c^3 \gamma).$$

Для получения общей формулы остается только найти закономерность образования коэффициентов  $A_k$  и  $C_k$ . С помощью оператора **rgf\_findrecur** из пакета **genfunc** системы **Maple** для последовательности 0, 3, 2, 22, 16, 73, 58, 172, 144, 335, 290, 578, 512, 917, 826, 1368 коэффициентов при  $a^3$  (оператор **rgf\_findrecur** требует четное число элементов) получаем рекуррентное уравнение

$$A_k = A_{k-1} + 3A_{k-2} - 3A_{k-3} - 3A_{k-4} + 3A_{k-5} + A_{k-6} - A_{k-7}.$$

Решение этого уравнения (общий член последовательности) находим с помощью оператора **rsolve**

$$A_k = (4k^3 + 9((-1)^k - 1)k^2 + (17 - 15(-1)^k)k + 9((-1)^k - 1)) / 12.$$

Аналогично получаем и другой коэффициент

$$C_k = (2k + (-1)^k - 1) / 4.$$

### Числовой пример. Анализ

Рассмотрим ферму заданного пролета  $L = 2ka = 40$  м с решеткой из стержней, площадь сечений которых в два раза меньше площади сечений поясов:  $\gamma = 2$ . Пусть суммарная нагрузка  $P_s$

на ферму не меняется при изменении числа панелей:  $P_s = (2k+1)P$ , а длина пролета определяет размер панели  $a = L/(2k)$ . Кривые зависимости относительной величины прогиба  $\Delta' = \Delta EF / P_s$  от числа панелей для различных высот фермы отображены на рис. 3.

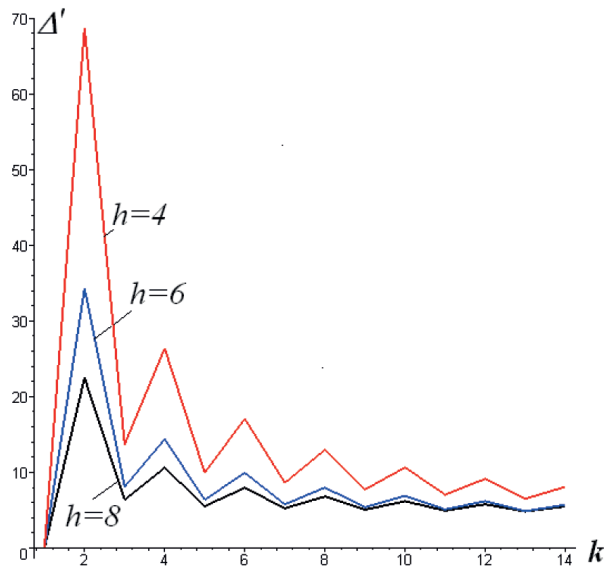


Рис. 3. Зависимость прогиба от числа панелей

Полученная зависимость обнаруживает резкие скачки, свидетельствующие о чувствительности конструкции к четности числа  $k$  панелей в половине пролета. Очевидно также, что кривые при больших  $k$  выходят на горизонтальную асимптоту. Аналитическая форма решения позволяет найти предел:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' = h^3 / 4$ .

#### Анализ кинематической изменяемости

Первоначальный выбор четного числа панелей был обусловлен желанием иметь центральную точку в пролете, в которой можно было бы объективно измерить прогиб. При нечетном числе панелей такой точки нет, и расчет не был произведен. Но если взять нечетное число панелей  $n = 2k - 1$  и вместо центральной точки попытаться определить прогиб в какой-либо другой точке, то оказывается, что задача не имеет решения, и это связано не с выбором контрольной точки и видом внешней нагрузки, а с вырождением системы уравнений равновесия. В численном анализе этот факт иногда ускользает из поля зрения исследователя, скрывшись за ошибками округления и погрешностями вычислений. В аналитическом же варианте решения результат очевиден — определитель системы становится равным нулю. Ранее такие эффекты были обнаружены в плоских [16] – [18] и пространственных фермах [19]. Для надежного подтверждения кинематической изменяемости фермы с нечетным числом панелей в пролете необходимо привести схему возможных скоростей. Такая схема для трех панелей дана на рис. 4.

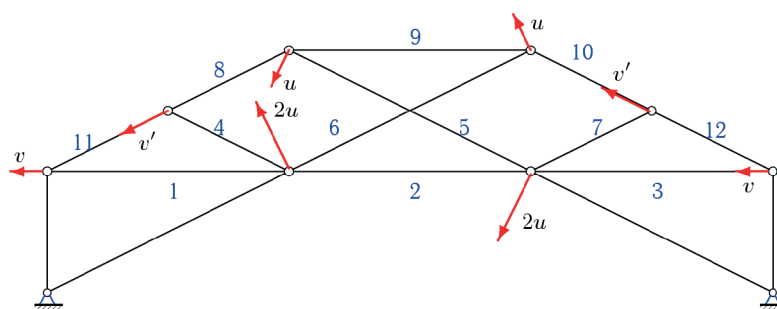


Рис. 4. Виртуальные скорости изменяемой фермы,  $n = 3$



Стержни 1 и 3 нижнего пояса совершают вращательные движения вокруг соответствующих опор, остальные стержни движутся вокруг мгновенных центров скоростей. Получившаяся картина распределения скоростей кинематически непротиворечива, механизм имеет одну степень свободы. Все скорости могут быть выражены через одну величину, например, скорость узла 1  $v$ . Рассматривая положения мгновенных центров скоростей, можно получить, что виртуальные скорости связаны кинематическими соотношениями:  $u = vc / (2h)$ ,  $4hv' = v\sqrt{a^2 + 9h^2}$ . Направление скоростей указано схематично. В действительности вектор скорости  $v'$  направлен не по стержню, а весьма близок к нему, что легко проследить по расположению мгновенных центров скоростей элементов. Таким образом, рассмотренная схема фермы имеет весьма коварное свойство — при одних числах панелей это вполне работоспособная конструкция, при других — мгновенно изменяемый механизм. Второй факт можно не заметить, если ферма имеет вместо шарнирных узлов жесткие связи (сварка), и вся конструкция держится только на этих дополнительных связях, имея при этом врожденное опасное свойство кинематической изменяемости.

### Монтажная схема

Практическое исполнение схемы фермы с перекрещивающимися раскосами не очевидно. Возникает вопрос, как монтировать стержни, чтобы избежать их изгиба? Вполне возможно, что при больших длинах стержней небольшой изгиб стержня не сильно скажется на работоспособности конструкции. Но лучше, конечно, этого не допускать, тем более, что всегда можно расположить стержни в разных (параллельных) плоскостях. Фактически, это задача о реберной раскраске графа, при которой ребрам графа ставятся в соответствие натуральные числа (цвета) так, чтобы одной вершине графа (узлу фермы) были инцидентны ребра разных цветов [20]. В данном случае цвета — это условный уровень плоскости, в которой монтируется стержень.

В системе Maple есть специальный оператор `EdgeChromaticNumber` из пакета `GraphTheory`, решающий эту задачу. Приведем это решение на примере фермы с  $n = 4$  (см. рис. 2). Сначала оператор `Graph` задает граф фермы: `G:=Graph(undirected, {{1, 2}, {2, 3}, {3, 4}, {4, 5}, {5, 10}, {10, 9}, {9, 8}, {8, 7}, {7, 6}, {6, 1}, {6, 2}, {2, 8}, {8, 4}, {4, 10}, {7, 3}, {3, 9}})`. Затем оператор `EdgeChromaticNumber (G,'col')` возвращает в переменную `'col'` набор ребер одного цвета: `[{{2, 8}, {3, 9}, {4, 10}}, {{2, 6}, {3, 7}, {4, 8}}, {{1, 6}, {2, 3}, {4, 5}, {7, 8}, {9, 10}}, {{1, 2}, {3, 4}, {5, 10}, {6, 7}, {8, 9}}` и хроматический индекс 4. Это означает, что в списке четыре группы пар вершин ребер одного цвета (одного уровня плоскости при монтаже). Уровень 1 (низший), например, состоит из стержней с вершинами {2, 8}, {3, 9} и {4, 10} (рис. 2, 5), уровень 2 также из трех стержней, а уровень 3 — из пяти.

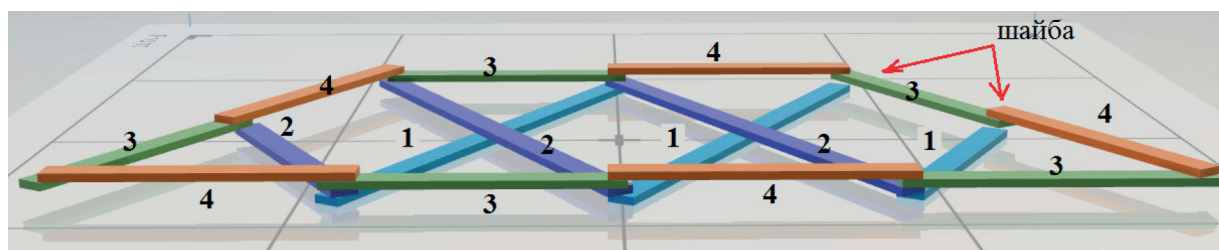


Рис. 5. Реберная раскраска и монтажная схема фермы,  $n = 4$

При этом выясняется, что в узлах 9 и 10 (см. рис. 2, 5) между стержнями образуются промежутки по высоте, требующие дополнительных шайб с толщиной, равной толщине стержня. Очевидно, эффективность предлагаемого автоматического составления монтажной схемы растет с увеличением числа панелей, где вручную назначить порядок сборки узлов представляется практически невыполнимой задачей.

## Выводы

Предложена схема статически определимой фермы. Методом индукции получена точная формула для расчета прогиба в зависимости от числа панелей. Символьная математика позволила выявить опасную особенность схемы — кинематическую изменяемость конструкции при нечетном числе панелей. Для большого числа панелей две фермы, отличающиеся друг от друга при равном пролете на одну панель, на первый взгляд, могут показаться принципиально идентичными. Однако это не так: одна схема — это конструкция, другая — механизм. Обнаружить кинематическую изменяемость, руководствуясь традиционными в строительной механике методами, здесь трудно. Приведенная схема виртуальных скоростей подтверждает вывод о влиянии четности числа панелей на работу конструкции. Впервые с использованием теории графов предложен алгоритм планирования монтажа конструкции для безмоментной работы стержней. Алгоритм легко программируется и хорошо вписывается в уже существующую программу расчета усилий в стержнях. Приведенный пример показал, что допускается решение этой задачи, при котором в конструкцию для корректировки между некоторыми стержнями необходимо добавлять пассивные шайбы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подобед В. А.* Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны / В. А. Подобед // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 318–331.
2. *Панасенко Н. Н.* Дискретно-континуальная модель пространственных металлоконструкций грузоподъемных кранов / Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2006. — № 1. — С. 184–193.
3. *Arena A.* Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification / A. Arena, A. Casalotti, W. Lacarbonara, M. P. Cartmell // International Journal of Mechanical Sciences. — 2015. — Vol. 93. — Pp. 8–21. DOI: 10.1016/j.jimecs.2014.11.024.
4. *Kopnov V. A.* Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry crane / V. A. Kopnov // Engineering Failure Analysis. — 1999. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 131–141. DOI: 10.1016/S1350-6307(98)00041-7.
5. *Heyman J.* Design of a simple steel truss / J. Heyman // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings. — 2010. — Vol. 163. — Is. 1. — Pp. 53–56. DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.53.
6. *Hutchinson R. G.* The structural performance of the periodic truss / R. G. Hutchinson, N. A. Fleck // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2006. — Vol. 54. — Is. 4. — Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008.
7. *Алпатов В. Ю.* Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций / В. Ю. Алпатов, И. С. Холопов // Металлические конструкции. — 2009. — Т. 15. — № 1. — С. 47–57.
8. *Camp C. V.* Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization / C. V. Camp, M. Farshchin // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 62–63. — Pp. 87–97. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.
9. *Kaveh A.* Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach / A. Kaveh, M. Shahrouzi // Engineering Computations. — 2008. — Vol. 25. — Is. 3. — Pp. 268–288. DOI: 10.1108/02644400810857092.
10. *Sonmez M.* Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures / M. Sonmez // Applied Soft Computing. — 2011. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 2406–2418. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.09.003.
11. *Тиньков Д. В.* Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций / Д. В. Тиньков // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 5 (57). — С. 66–73. DOI: 10.5862/MSE.57.6.
12. *Тиньков Д. В.* Анализ точных решений прогиба регулярных шарнирно-стержневых конструкций / Д. В. Тиньков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2015. — № 6. — С. 21–28.
13. *Кийко Л. К.* Аналитическая оценка прогиба арочной фермы под действием ветровой нагрузки / Л. К. Кийко // Научный вестник. — 2016. — № 1 (7). — С. 247–254.
14. *Кирсанов М. Н.* Maple и MapleT. Решения задач механики / М. Н. Кирсанов. — СПб.: Лань, 2012. — 512 с.

15. *Голоскоков Д. П.* Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: ПаркКом, 2010. — 644 с.
16. *Кирсанов М. Н.* Расчет жесткости стержневой решетки / М. Н. Кирсанов // Вестник машиностроения. — 2015. — № 8. — С. 48–51.
17. *Кирсанов М. Н.* Анализ прогиба решетчатой балочной фермы распорного типа / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 5 (57). — С. 58–65. DOI: 10.5862/MCE.57.5.
18. *Кирсанов М. Н.* Аналитический расчет балочной фермы со сложной решеткой / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2015. — № 3 (260). — С. 7–12.
19. *Кирсанов М. Н.* Расчет пространственной стержневой системы, допускающей мгновенную изменяемость / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2012. — № 3. — С. 48–51.
20. *Andersen L. D.* On edge-colourings of graphs / L. D. Andersen // *Mathematica Scandinavica*. — 1977. — Vol. 40. — No. 2. — Pp. 161–175.

## STATIC ANALYSIS AND MOUNTING DIAGRAM OF FLAT TRUSS

*The statically determinate scheme of flat lattice-type truss with four external connections that are modeled by the symmetrically arranged supporting rigid rods is proposed. The problem of finding the deflection of the structure depending on the number of panels, size of truss and amount of load applied in a uniform manner to the nodes of the upper belt is solved. The forces in the rods are determined by cutting out the knots. In the cycle according to the number of rods arranged the matrix of the system of equilibrium equations of all joints of the structure. By induction on the number of panels with the use of special operators `rgf_findrecur` and `rsolve` package `genfunc` the computer algebra system Maple we have obtained exact formula for the deflection of the middle node of the lower chord in the form of a polynomial of the fourth order. For the sequence of the coefficients of the formulae are derived and solved the recurrence equation of the eighth order. Curves of deflection by the number of panels at a fixed total load and the length of the passage detect sharp form and horizontal asymptote, depending on the height of the truss and the ratio of the stiffness of the rods of the belts and lattice. the kinematic variability of the truss with odd number of panels, leading to the equality to zero of the determinant of The system of equations of the nodes was discovered. The consistent scheme of possible speeds variable and the ratio between the speeds of the nodes are obtained. To prevent the Flexural deformation the method of installation of rods in the truss based on the location of the rods in separate planes is proposed. The problem of the sequence of attachment of the rods at the nodes is reduced to the solution of a problem of discrete mathematics on edge-coloring of the graph. Apply operators `EdgeChromaticNumber` and `Graph` from `GraphTheory` package of Maple. The example of installation is given.*

*Keywords: truss, deflection, analytical solution, Maple, induction, edge-coloring.*

## REFERENCES

1. Podobed, V. A. “Mathematical modelling of wind load on port bridge cranes.” *Vestnik of MSTU* 9.2 (2006): 318–331.
2. Panasenko, N. N., and A. V. Sinelshchikov. “Discrete-continuum model of spatial metalwear of climbing cranes.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1 (2006): 184–193.
3. Arena, A., A. Casalotti, W. Lacarbonara, and M. P. Cartmell. “Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification.” *International Journal of Mechanical Sciences* 93 (2015): 8–21. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.024.
4. Kopnov, V. A. “Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry crane.” *Engineering Failure Analysis* 6.3 (1999): 131–141. DOI: 10.1016/S1350-6307(98)00041-7.
5. Heyman, J. “Design of a simple steel truss.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 163.1 (2010): 53–56. DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.53.
6. Hutchinson, R. G., and N. A. Fleck. “The structural performance of the periodic truss.” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 54.4 (2006): 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008.
7. Alpatov, V. Yu., and I. S. Kholopov. “Geometrical form optimization of a spatially-rod structures.” *Metal Constructions* 15.1 (2009): 47–57.
8. Camp, C. V., and M. Farshchin. “Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization.” *Engineering Structures* 62–63 (2014): 87–97. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.

9. Kaveh, A., and M. Shahrouzi. "Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach." *Engineering Computations* 25.3 (2008): 268–288. DOI: 10.1108/02644400810857092.
10. Sonmez, M. "Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures." *Applied Soft Computing* 11.2 (2011): 2406–2418. DOI: 10.1016/j.asoc. 2010.09.003.
11. Tinkov, D. V. "Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection." *Magazine of Civil Engineering* 5(57) (2015): 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6.
12. Tinkov, D. V. "The analysis of nice calculations for displacements of regular joint-and-rod structures." *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 6 (2015): 21–28.
13. Kiyko, Larisa Konstantinovna. "Analytical evaluation of deflection of arched trusses under the action of wind loads." *Science Bulletin* 1(7) (2016): 247–254.
14. Kirsanov, M. N. *Maple i Maple. Resheniya zadach mekhaniki*. SPb.: Izd-vo Lan, 2012.
15. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoy fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
16. Kirsanov, M. N. "The calculation of the stiffness of the rod grille." *Russian Engineering Research* 8 (2015): 48–51.
17. Kirsanov, M. N. "Analysis of the deflection of a strut-type lattice girder truss." *Magazine of Civil Engineering* 5(57) (2015): 58–65. DOI: 10.5862/MCE.57.5.
18. Kirsanov, M. N. "Analytical calculation of beamed truss with complex lattice." *Structural Mechanics and Analysis of Constructions* 3(260) (2015): 7–12.
19. Kirsanov, M. N. "Calculation of spatial bar system that permits variability of instantly." *Structural Mechanics and Analysis of Constructions* 3 (2012): 48–51.
20. Andersen, L. D. "On edge-colourings of graphs." *Mathematica Scandinavica* 40.2 (1977): 161–175.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирсанов Михаил Николаевич —  
доктор физико-математических наук, профессор.  
Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
C216@Ya.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov Mikhail Nikolayevich —  
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor.  
National Research University "MPEI"  
C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-68-75  
УДК 81-112.2

Е. В. Наденна

### ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КОММУНИКАТИВНЫХ УМЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВОДИТЕЛЕЙ

В статье рассмотрена проблема формирования коммуникативных умений современных судоводителей на основе таких методов, как описание, эксперимент, сравнение, моделирование. Языковым материалом является английская морская стандартная фразеология радиообмена, содержащая специальную терминологию и многочисленные клише без их реального лексического наполнения, что затрудняет процесс запоминания и использования в речевой ситуации профессионального общения. Обучение терминологии связано с серьезными трудностями из-за отсутствия разработанных методических основ подачи студентам терминологической лексики по их специальности. Представлен опыт моделирования образовательной среды, применения в учебном процессе мультимедийного обучающего модуля «Стандартные фразы», обеспечивающего работу зрительной, слуховой и моторной памяти при запоминании специальной терминологии, а также апробирования комплекса упражнений при выполнении аудиторных практических работ, обеспечивающего развитие долговременной памяти студентов-судоводителей. Алгоритмы работы с разделами «Справочник» и «Тестирование» модуля «Стандартные фразы» помогают организовать работу по формированию лексических знаний в области английского морского языка и приобретению практических речевых навыков. Сделан вывод о том, что специфическая образовательная среда, систематическое вне-



*дрение IT технологий, современных методов и приёмов обучения английскому морскому языку, организация различных видов и форм внеаудиторных занятий значительно повышают качество усвоения языкового материала и его действенность в речи. Это позволяет реализовывать требования стандарта специальности и Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты, принятой в Лондоне в 1995 году, и формировать судоводителя как социально-профессиональную личность, которая будет способна к продуктивному владению иностранным языком как средством решения профессиональных задач в поликультурной среде.*

*Ключевые слова: коммуникативные умения, английский язык, фразеология радиообмена, образовательная среда, мультимедийный обучающий модуль*

### **Введение**

В рамках реализации программы «Экономическое и социальное развитие Арктической зоны Российской Федерации на 2011 – 2020 годы» организовано строительство ключевого логистического центра — морского порта Сабетта, который имеет общегосударственное значение. Арктическая морская транспортная система, включающая этот порт, может обеспечить надежные транспортные связи, эффективное освоение месторождений полезных ископаемых, экспорт нефти и газа и вследствие этого — существенное улучшение условий жизнедеятельности в северных субъектах РФ [1]. Процесс инновационного развития водного транспорта и модернизации судов речного и морского флота определил потребность в высококвалифицированном персонале для отрасли водного транспорта [2]. Именно судоводители обеспечивают своевременную доставку грузов и осуществляют взаимодействие с экипажами иностранных судов.

Стандарт специальности 26.02.03 «Судовождение» указывает на то, что квалифицированный судоводитель должен обладать общими и профессиональными компетенциями, связанными с управлением и эксплуатацией судна, обеспечением безопасности плавания, обработкой и размещением грузов, а также выполнением работ по одной или нескольким рабочим профессиям. Поскольку судоводитель не только осуществляет навигацию, но и управляет деятельностью экипажа, значит, очень важна психологическая подготовка, умение правильно выстраивать взаимоотношения с людьми и владеть коммуникативными умениями и навыками. По данным психологических исследований, судоводители в равной степени должны обладать чертами как интроверсии, так и экстраверсии с преобладающим сенсорным способом получения информации в противоположность интуитивному, мыслительным типом принятия решений против чувствующего и преобладающей решающей жизненной позиции в сравнении с созерцательной [3].

Необходимость формирования готовности к профессиональному общению обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, в сфере профессиональной деятельности судоводителей от уровня готовности к профессиональному общению зависит обеспечение безопасности эксплуатации морских судов, а, следовательно, безопасности команды, выполнение международного и национального законодательства в области водного транспорта, адекватное понимание своих коллег и подчиненных в условиях разнородного национального, религиозного и социально-культурного состава экипажа судна, конструктивное разрешение напряженности или конфликта. Повышение безопасности морских перевозок, охрана труда, защита окружающей среды от возможных негативных последствий морской деятельности определены в качестве приоритетных задач, направленных на успешную реализацию национальной морской политики России. Выпускник образовательного учреждения по данной специальности должен обладать высоким уровнем профессионального общения, который позволял бы ему беспрепятственно пользоваться русским и иностранным языками для осуществления профессиональных задач и будущего продвижения. Во-вторых, в образовательном процессе подготовки специалистов-судоводителей преимущественно обращается внимание на формирование компетентности в области предмета общения, в то время как теоретические и практические основы формирования готовности к общению недостаточно разработаны и изучаются в значительно меньшей степени. Подготовка к общению явля-

ется неотъемлемой частью профессиональной подготовки будущего специалиста, а способность к организации профессионального общения в производственной среде — одним из основных требований к современному специалисту. Все это должно выполняться на высоком профессиональном уровне, так как именно готовность специалиста к профессиональному общению является важной составляющей его успеха в профессиональной деятельности [4].

Проблема формирования коммуникативных умений судоводителей рассматривалась в работах О. К. Митраковой [5], Н. В. Горбуновой [6] и др. О. К. Митракова считает, что коммуникативная компетенция является частью социально-психологической составляющей понятия «специалист — судоводитель высокой квалификации» [5]. Результаты исследования показали, что большая часть респондентов использует типичную деструктивную модель поведения в конфликтных ситуациях, что, безусловно, отражает недостаточность развития у них социально-психологической компетентности. Н. В. Горбунова определяет цель изучения иностранного языка судоводителями как формирование такой социально-профессиональной личности, которая будет способна к продуктивному использованию иностранного языка в качестве средства решения профессиональных задач в поликультурной среде [6]. В предложенной системе упражнений по формированию коммуникативных умений выделено три типа: *подготовительные* (формирование лексических навыков), *естественно-коммуникативные* (составление различного рода сопроводительных писем, организации деловых игр) и *условно-коммуникативные* (вопросно-ответные упражнения, условные беседы и т. п.). Все типы упражнений формируют такие коммуникативные качества речи, как уместность и действенность речи, позволяющие воспроизводить лексические единицы в типичной повторяющейся речевой ситуации. Сегодня студент, владеющий разговорным и базовым английским языком на хорошем уровне, не всегда может быть успешен в коммуникации, касающейся морского английского языка. Знание лексем не обеспечивает их действенность в речевой ситуации профессионального общения. Чтобы перевести их из пассивного в активный словарный запас, необходимо создание определённых условий, о которых и пойдёт речь в этой статье.

### Основная часть

Коммуникативная иноязычная компетенция будущих судоводителей представлена английским языком не случайно. Потребность в едином национальном языке в рамках международного профессионального общения существовала всегда. В настоящее время базовым национальным языком международного радиообмена выбран и закреплён нормативными актами ИМО (ИМО) английский язык. Так, в резолюции А.918 (22) от 29.11.2001 Ассамблея ИМО, ссылаясь на ст. 150 Конвенции о Международной морской организации, касающуюся функций Ассамблеи применительно к правилам и руководствам по безопасности на море, потребовала от стран-участниц, чтобы «на всех судах для переговоров в целях безопасности «мостик – мостик» и «мостик – берег, как и для переговоров между лоцманом и вахтенными на мостике, применялся английский язык» [7, с. 4]. Тем самым Ассамблея ИМО признала, что «именно английский язык и его терминология, применяемая при таком общении, способствует безопасной эксплуатации судов и вносит вклад в повышение безопасности мореплавания» [7, с. 4]. Поэтому, начиная с 2002 г., знание «международного» морского английского языка в рамках радиообмена является обязательным образовательным компонентом для диспетчеров, штурманов и иных лиц, допущенных к ведению радиопереговоров. Данные категории персонала обязаны владеть английским языком по четвертому уровню (по нормам ИМО всего существует шесть уровней), что примерно соответствует уровню Intermediate (по общей международной шкале) [8]. Достаточное знание английского языка должно позволять вахтенному помощнику капитана пользоваться картами и другими морскими пособиями, понимать метеорологическую информацию и сообщения о безопасности судов и их эксплуатации, а также уметь ясно выражать свои мысли при связи с другими судами или берегом, понимать и использовать Стандартный морской словарь [9].

**Описание методики формирования коммуникативных умений.** Формирование коммуникативных умений будущих судоводителей представляет собой строгую систему и складывается

ся из таких компонентов, как высокий уровень организации образовательной среды, современное программное обеспечение, систематическое использование IT-технологий, современных приёмов обучения английскому морскому языку, организация различных видов и форм внеаудиторных занятий. Все указанные элементы взаимосвязаны между собой и направлены на то, чтобы студент-судоводитель заговорил на подъязыке своей будущей специальности. При исследовании этого процесса нами использовались такие методы, как описание, эксперимент, сравнение и моделирование. Анализ теоретических работ по формированию коммуникативных умений выявил отсутствие методических основ подачи студентам терминологической лексики по специальности 26.02.03 Судовождение. Это обусловило изучение современного программного обеспечения, облегчающего усвоение английской морской фразеологии радиообмена.

Образовательный процесс направлен сегодня на подготовку специалиста-управленца, способного решать разнообразные производственные задачи, используя современное оборудование и технологии взаимодействия. Поэтому к преподавателю иностранного языка предъявляются серьёзные требования. Он должен владеть современными информационными технологиями для организации деятельности как на аудиторных, так и на внеаудиторных занятиях, использовать такие активные методы обучения, как ролевые игры, дискуссионные группы, проектные и рабочие группы и т. п., а также организовывать обучение, имеющее личностно-ориентированный характер. Преподаватель становится тьютором, консультирующим в процессе обучения и организующим контроль качества знаний студентов.

Внедрение IT-технологий при проведении аудиторных занятий освобождает преподавателя от рутинной работы и дает возможность использовать справочный и иллюстративный материал, представленный в разнообразном виде [10]. Это способствует эффективному запоминанию лексических и синтаксических единиц, позволяет интенсифицировать образовательный процесс, увеличить скорость восприятия, понимания и глубину усвоения языкового материала, развивать эрудицию. В основе формы обучения с применением компьютерных средств обучения лежит концепция построения процесса обучения, основанного на самостоятельной познавательной деятельности студента. Для этого необходимо обеспечить максимальный доступ студента к учебной информации. В процессе изучения морского английского языка используется электронный учебно-методический комплекс, расположенный на сайте профессиональной образовательной организации и доступный студентам в любое удобное им время.

Мультимедийный обучающий модуль «Стандартные фразы» — это средство организации работы студентов с языковым материалом профессиональной направленности, реализующее требование стандарта специальности по изучению фраз Международной морской организации общения на море [11]. Он установлен на рабочих местах преподавателя и студентов и включает в себя разделы «Справочник» и «Тестирование». В разделе «Справочник» представлены пять частей: «Общие положения», «Глоссарий», «Фразы для внешней связи», «Фразы для внутренней связи» и «Дополнения». Каждая часть содержит фразы и реплики, которые можно прослушать, нажав на них дважды. При выборе студентом фразы внизу окна программы появляется её перевод на русский язык. Раздел «Тестирование» позволяет обучающимся проверить знание фраз и осуществить самоконтроль. Для организации самостоятельного изучения и закрепления лексического материала были разработаны и апробированы алгоритмы деятельности студентов в обучающем разделе «Справочник» и контролирующем разделе «Тестирование». Эксперимент по использованию описанного модуля в процессе изучения профессионального английского языка показал, что при запоминании студентами стандартных фраз для общения на море реализуется индивидуальный подход. Таким образом, повышается производительность урока, реализуются межпредметные связи [10], формируется коммуникативная компетенция, позволяющая осуществлять иноязычное общение.

Целью внеаудиторной деятельности является закрепление и совершенствование уже изученной лексики, создание условий для пользования ею в определённых речевых ситуациях. Помимо заданий, предложенных студентам в методических указаниях по выполнению внеаудиторной

самостоятельной работы, традиционными формами этой деятельности являются конкурсы и конференции.

Конкурс «High speed» предлагает участникам проверить своё знание терминологии морского английского языка. Он проводится между группами и курсами. Создаются команды для работы с карточками, содержащими тематические группы терминов. За фиксированный промежуток времени необходимо вписать перевод термина на русский / английский язык. При такой форме работы важна скорость воспроизведения лексем и умение работать в команде.

Конкурс «The best ship's crew» направлен на совершенствование фонетических и лексико-грамматических навыков. Лучшей командой становится та, члены которой наиболее грамотно прочитают, отредактируют и переведут предложенные стандартные фразы для общения на море.

Конкурс «Radio communications» — это моделирование производственных ситуаций, в которых предлагается сообщить другому судну информацию о своём местоположении, погодных условиях, особенностях перевозимых грузов и т. п. Критерием оценки деятельности каждой команды является соблюдение фонетических особенностей используемой лексики, уместность её использования, умение слушать собеседника, гибкость мышления.

Проведение конкурсов «High speed», «The best ship's crew», «Radio communications» помогает оценить уровень и качество освоения лексического материала, организовать его использование в смоделированных речевых ситуациях, приближенных к производственным. Ежегодная научно-практическая конференция на тему «Английский язык в моей будущей профессии» даёт возможность студентам продемонстрировать навыки чтения, перевода и пересказа текстов профессиональной направленности.

Специфическая образовательная среда, представленная компьютерным (мультимедиа) лингафонным кабинетом, играет большую роль в организации процесса формирования коммуникативных умений. Кабинет имеет две зоны, отделённые друг от друга мобильной перегородкой. В первой зоне располагаются рабочие места студентов и преподавателя, магнитно-маркерная доска и проектор, во второй — индивидуальные мобильные рабочие места студентов и рабочее место преподавателя, интерактивная доска с приставкой Mimio, проектор.

Современное программное обеспечение, представленное мультимедийным обучающим модулем «Стандартные фразы», аудиопрактикумом «Рейс судна Ютопия», тестом «Дельта-Судоводитель» даёт возможность организовать на учебном занятии различные формы работы с языковым материалом профессиональной направленности (диалогами и текстами) в зависимости от индивидуальных возможностей обучающихся.

Эффективность изучения профессиональной лексики обеспечивается использованием современного интерактивного оборудования и приёмов обучения. Запоминание происходит в процессе работы в парах, малых группах при использовании таких приёмов, как «Tic-Tac-Toe», «Corners», «Mix-Pair-Share». Сущность первого приёма заключается в том, что студенты в малых группах записывают на листочках изученные / изучаемые фразы, а затем раскладывают девять листочков в формате 3 × 3, и каждый член группы составляет и проговаривает три предложения, используя три слова на одной линии. Это можно использовать как на этапе изучения нового материала, так и на этапе закрепления коммуникативных умений. Второй приём связан с закреплением изученного лексического материала через группирование студентов в различных местах учебного кабинета, имеющих название производственных ситуаций, например, они могут называться «Фразы для связи при бедствии», «Стандартные команды на руль», «Фразы для лоцманской проводки», «Фразы для обеспечения в целях безопасности». Студенты берут со стола преподавателя карточки с фразами, читают их и группируются в том угле, тематика которого подходит к содержанию их фразы. Можно смешать листочки с разными заданиями по окончании работы и повторить это упражнение. Таким образом, содержание всех предложенных лексических единиц будет освоено. Третий приём предполагает запоминание языкового материала через проживание следующих этапов: объединение студентов в общую рабочую группу и перемещение по кабинету



(можно под музыку), формирование пар по окончании музыки, отработку фонетических навыков тех языковых единиц, которые предлагает преподаватель каждой паре.

Проведённый эксперимент по использованию названных приёмов в учебном процессе позволяет сделать вывод об их эффективности и повышении уровня владения студентами англо-русской стандартной фразеологией радиообмена. В экспериментальной группе обучаемые значительно быстрее осваивают лексические единицы, что позволяет увеличивать объём изучаемого материала и эффективно использовать время учебного занятия для отработки коммуникативных умений.

### Выводы

Результаты работы показали, что актуальность проблемы формирования коммуникативных умений обусловлена требованиями к уровню подготовки специалиста-судоводителя. Исследование этого процесса показало, что владение разговорным и базовым английским языком на достаточном уровне не обеспечивает успешность коммуникации в области морского английского языка. Знание лексем не определяет их действенность в речевой ситуации профессионального общения — можно знать огромное количество фраз и выражений, но не уметь пользоваться ими в специально смоделированном задании, требующем выбора уместных лексических единиц. В связи с этим систематическая отработка типичных речевых ситуаций в профессиональной практике вырабатывает навык применения стандартных фраз, позволяющих сделать любое общение эффективным и результативным, независимо от языка адресата и адресанта.

Исследование процесса формирования коммуникативных умений с помощью описания, эксперимента, сравнения и моделирования, показало следующее.

1. На сегодняшний день отсутствуют разработанные методические основы подачи студентам терминологической лексики по их специальности, поэтому необходимо обобщение имеющегося практического опыта.

2. Составляющими компонентами строгой системы этого процесса являются высокий уровень организации образовательной среды, современное программное обеспечение, систематическое использование IT-технологий, современных приёмов обучения английскому морскому языку, организация различных видов и форм внеаудиторных занятий.

3. Применение мультимедийного обучающего модуля «Стандартные фразы» повышает интерес к изучению профессиональной лексики, активизирует зрительную, слуховую и моторную память обучаемых и способствует улучшению качества запоминания английской стандартной фразеологии радиообмена. Различные формы работы с лексическими единицами позволяют перевести их из пассивного словарного запаса в активный, научить выбирать из знакомых лексем те, которые необходимы в конкретной речевой ситуации.

4. Разработанный комплекс упражнений предполагает заучивание специальной лексики, аудирование, составление и инсценировку диалогов, решение ситуационных задач профессиональной направленности на основе использования таких приёмов, как «Tic-Tac-Toe», «Corners», «Mix-Pair-Share». Это помогает интенсифицировать процесс запоминания языкового материала, формировать такие актуальные коммуникативные умения, как правильность, точность, уместность, логичность, действенность как устной, так и письменной речи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лебедев Г. В.* Перспективы развития арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 179–189.

2. *Пантина Т. А.* Кадровый потенциал как фактор стратегического развития внутреннего водного транспорта / Т. А. Пантина, М. Н. Савельева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 194–199.

3. *Панков И. И.* Применение методов психологической диагностики для определения текущего состояния профессионально важных качеств моряков / И. И. Панков, А. П. Смягликова, В. Н. Окунев // Вестник

Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 235–237.

4. Кожевникова И. Д. Проблема формирования готовности к профессиональному общению у будущих специалистов-судоводителей / И. Д. Кожевникова // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. — 2014. — № 1. — С. 132–134.

5. Митракова О. К. Коммуникативная компетентность в системе профессионально-важных качеств специалиста судоводителя / О. К. Митракова // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2008. — № 20. — С. 432–439.

6. Горбунова Н. В. Межкультурная иноязычная профессионально-коммуникативная компетенция будущих морских судоводителей в условиях модернизации современного профессионального образования / Н. В. Горбунова, Ю. И. Божко // Проблемы современного педагогического образования. — 2015. — № 47-1. — С. 24–30.

7. Овчинников Г. М. Стандартные фразы для общения на море / Г. М. Овчинников. — СПб.: Изд-во Морсар, 2002. — 374 с.

8. Севостьянов А. П. Прагмалингвистические характеристики английской морской фразеологии [Электронный ресурс] / А. П. Севостьянов. — Режим доступа: [http://www.shipdesign.ru/Sea/2013-02-12/3\\_253-262.pdf](http://www.shipdesign.ru/Sea/2013-02-12/3_253-262.pdf) (дата обращения — 01.09.2016).

9. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78) (консолидированный текст). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. — 406 с.

10. Расулова М. Ж. Использование информационно-коммуникационных технологий на уроках английского языка / М. Ж. Расулова // Теория и практика образования в современном мире: материалы II междунар. науч. конф. — СПб.: Реноме, 2012. — С. 91–92.

11. Мультимедийный обучающий модуль Стандартные фразы [Электронный ресурс]. — М., 2011. — 1 электрон, опт. диск (CD-ROM).

## THE PROBLEM OF FORMATION OF COMMUNICATIVE SKILLS OF MODERN NAVIGATORS

*The article considers the problem of formation of communicative skills of modern navigators on the basis of such methods as description, experiment, comparison, simulation. Language material English is the marine standard phraseology radio containing special terminology, and numerous clichés without their actual lexical content, making it difficult to remember and use in situations of professional communication. Learning the terminology is associated with serious difficulties due to the lack of developed methodological principles to the students of terminology in their field. The article presents the experience of modeling the educational environment application in the educational process of a multimedia learning module “Standard phrases” that provides visual, auditory and motor memory when memorizing special terminology, and testing of a set of exercises when performing practical classroom activities to ensure the development of long-term memory of the students of skippers. The algorithms work with sections “Reference” and “Test” module the “Standard phrases” help to organize work on the development of lexical knowledge of English nautical language and the acquisition of practical language skills. It is concluded that the specific educational environment, the systematic introduction of IT technologies, modern methods and techniques of teaching English nautical language, the organization of various types and forms of extracurricular significantly improves the quality of language acquisition and its effectiveness in speech. This allows to implement the requirements of the standard of the specialty and the International Convention on training and certification of seafarers and carrying watches, adopted in London in 1995 and shape of the vessel as a social and professional personality which will be able to productive command of a foreign language as a means of solving professional tasks in a multicultural environment.*

*Keywords: communication skills, English, radio phraseology, educational environment, multimedia learning module.*

## REFERENCES

1. Lebedev, G. V., and G. E. Rummyantsev. “The prospects of Arctic marine transportation system’s development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 179–189.

2. Pantina, T. A., and M. N. Savelieva. "Personnel potential for inland waterway transport as a factor of strategic development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 194–199.

3. Pankov, I. I., A. P. Smyaglikova, and V. N. Okunev. "Psychological assessment methods as measure of current state of sailor's important professional skills." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 235–237.

4. Kozhevnikova, I. D. "The problem of forming readiness of future specialists-navigators for professional communication." *Humanities, Social-economic and Social Sciences* 1 (2014): 132–134.

5. Mitrakova, O. K. "Kommunikativnaja kompetentnost v sisteme professionalno-vazhnyh kachestv specialista sudovoditelja." *Nauchnye trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tehničeskogo rybohozajstvennogo universiteta* 20 (2008): 432–439.

6. Gorbunova, N. V., and U. I. Bozhcko. "Intercultural foreign language professionally-communicative competence of future sea-skippers in the modernization of vocational education." *Problemy sovremennogo pedagogičeskogo obrazovanija* 47-1 (2015): 24–30.

7. Ovchinnikov, G. M. *IMO Standard Marine Communication Phrases*. SPb.: Izd-vo Morsar, 2002.

8. Sevost'janov, A. P. Pragmalingvističeskie harakteristiki anglijskoj morskoy frazeologii. Web. 1 Sept. 2016 <[http://www.shipdesign.ru/Sea/2013-02-12/3\\_253-262.pdf](http://www.shipdesign.ru/Sea/2013-02-12/3_253-262.pdf)>.

9. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text). SPb.: ZAO "TSNIIMEF, 2010.

10. Rasulova, M. Zh. "Ispolzovanie informacionno-kommunikacionnyh tehnologij na urokah anglijskogo jazyka." *Teorija i praktika obrazovanija v sovremennom mire: materialy II mezhdunar. nauch. konf.* SPb.: Renome, 2012: 91–92.

11. Multimedijnyj obučajushhij modul Standartnye frazy. Web. M., 2011. 1 electron, opt. disk (CD-ROM).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Надеина Елена Владимировна — аспирант.  
 Научный руководитель:  
 Миронова Александра Анатольевна —  
 доктор филологических наук, профессор,  
 ФГБОУ ВО «Челябинский государственный  
 педагогический университет».  
 ГАПОУ ТО «Тюменский колледж  
 водного транспорта»  
[nadeina.elena2014@yandex.ru](mailto:nadeina.elena2014@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nadeina Elena Vladimirovna — postgraduate.  
 Supervisor:  
 Mironova Aleksandra Anatolevna —  
 Dr. of Philological Sciences, professor,  
 Chelyabinsk State Pedagogical University.  
 Tyumen College of water transport  
[nadeina.elena2014@yandex.ru](mailto:nadeina.elena2014@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2016 г.

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-76-85

УДК 626.44

М. А. Колосов,  
А. А. Смирнов

## РАЗРАБОТКА ФРИКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВОРОТ ШЛЮЗА ОТ НАВАЛА СУДНА

*Основной задачей статьи является разработка фрикционной системы защиты ворот шлюза от навала судна. Указывается на уязвимость шлюза как элемента напорного фронта гидроузла на внутренних водных путях России. Выявляются последствия навала судна на ворота нижней головы шлюза, а также последствия её смещения. Приводятся несколько случаев аварий. Представлен расчет ударных нагрузок на ворота на примере судна водоизмещением 3920 т. Приводится краткий обзор существующих предохранительных устройств. Перечисляются серьезные недостатки различных вариантов конструкции. Рассматриваются факторы, снижающие эффективность в работе устройств. Подробно рассмотрены недостатки предохранительного устройства с использованием гидроцилиндров как одного из самых распространенных. Рассматриваются усилия в заградительном органе системы защиты от навала судна на примере проекта Каневского шлюза. Перечисляются условия останова судна, приводится расчет характеристик системы гашения энергии судна с построением соответствующих графиков. Выполнен расчет длины пути торможения в зависимости от изменения конструктивных параметров устройства. Представленная фрикционная система учитывает недостатки существующих предохранительных устройств и позволяет регулировать тормозные усилия и удлинять путь торможения. Рассматриваются способы наводки гибкого заграждения со сменой положения в зависимости от уровня воды в камере шлюза. Сделаны выводы о возможности использования на существующих судоходных шлюзах России новой конструкции предохранительного устройства, её эксплуатационной эффективности, преимуществах по сравнению с другими системами защиты ворот шлюза от навала судна.*

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, предохранительное устройство, навал судна, энергия навала, фрикционная система.

### Введение

Судоходные шлюзы на внутренних водных путях России являются наиболее уязвимым элементом напорного фронта гидроузла. Это подтверждает многолетний опыт эксплуатации и данные статистики, а также такие крупные аварии как авария на Сайменском канале (2002 г.) [1], [2], на Пермском шлюзе (4 ноября 1994 г.), на Нижнесвирском шлюзе (22 октября 2011 г.) [3] и др. В большинстве случаев причиной выхода из строя судоходного шлюза является воздействие судна на конструктивные элементы сооружения, наиболее уязвимыми из которых являются ворота. Навалы судов могут привести к тяжелым последствиям и требуют не только значительных затрат на ремонт, но и вызывают простои шлюза, а также всего водного пути (на 18 сут. было остановлено движение судов на участке Волгоград – Ростов в результате аварии на Константиновском шлюзе 1 ноября 2004 г.).

Вопрос расчета ударных нагрузок на ворота и последующее состояние ворот поднимался в работе [4]. Для расчета силы навала использовалась зависимость

$$P = 0,98\sqrt{D} \frac{V}{16},$$

где  $D$  — дедвейт судна, т;  $V$  — скорость судна в узлах.

Данная формула, включенная в американский стандарт AASHTO (Американская ассоциация управления дорожным движением), получена в результате исследований на крупномасштабных моделях в Германии. Расчеты по приведенной формуле показали, что ворота шлюза при начале судна водоизмещением 3920 т создают следующую величину нагрузок (табл. 1).



Таблица 1

Сила навала на ворота судна водоизмещением 3920 т

Скорость судна при навале, м/с	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Сила навала, мН	3,1	6,21	9,31	12,41	15,52

Естественно, что при таких нагрузках разрушатся конструкции ворот, а также туго натянутый канат легко разорвется.

### Постановка и описание задачи

В настоящее время в процессе эксплуатации предохранительных устройств для защиты ворот шлюза от навала судна выявляется множество недостатков, поэтому оптимальным решением будет проектирование единого для всех судоходных ГТС устройства. Устройство должно учитывать проблемы существующих конструкций систем защиты от навала судов, быть надежным в работе, обладать возможностью установки на существующих сооружениях и не увеличивать продолжительность шлюзования.

### Обзор существующих предохранительных устройств

Для обеспечения безопасности, защиты конструкций, недопущения возможности прорыва напорного фронта ГТС было разработано несколько вариантов предохранительных устройств, отличающихся как конструктивно, так и принципом работы:

- система заключённых в резиновую оболочку канатов, закреплённых за поворотную стойку на подвижных тележках [5];
- система плавающих балок [6];
- тросо-блочная система [7];
- система «встречной» волны [8].

Существующие заградительные устройства на судоходных шлюзах имеют два эксплуатационных недостатка:

- значительную инерционную массу элементов в системе гашения энергии, что вызывает в начальный момент навала судна большие нагрузки на заградительный канат (цепь);
- системы гашения энергии навала обеспечивают довольно короткий путь торможения, что приводит в результате воздействия сил инерции на судно к потере устойчивости пассажиров и разрушению приборов и оборудования на судне.

Наиболее широко используются для гашения энергии навала судна системы из гидроцилиндров, штоки которых соединены с заградительным органом (канатом, цепью). Цилиндры располагаются как на одной стенке шлюза, так и на двух, поперек или вдоль камеры, а также в вертикальных шахтах.

Впервые гидроцилиндры в вертикальных шахтах были установлены на шлюзах Велландского канала [9].

Современный опыт эксплуатации предохранительных устройств с использованием гидроцилиндров указывает на их значительные недостатки:

- большая инерционная масса, которая включает столб масла в штоковой полости цилиндра;
- трение о стенки цилиндра и сальники, напряжение трения в жидкости, которое зависит от вязкости масла и скорости сдвига (рис. 1) [10].

Особенно значительное влияние на вязкость рабочей жидкости оказывает температура окружающей среды (рис. 2) [10].

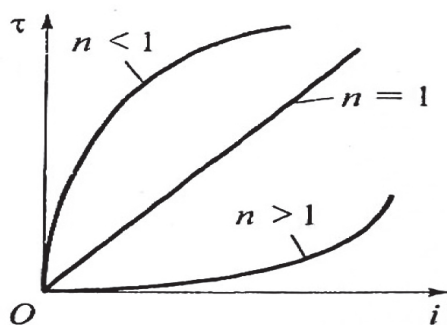


Рис. 1. Зависимость напряжения трения от скорости сдвига:

$\tau$  — напряжение трения;  $i$  — скорость сдвига;  
 $n$  — константа, характеризующая рабочую жидкость

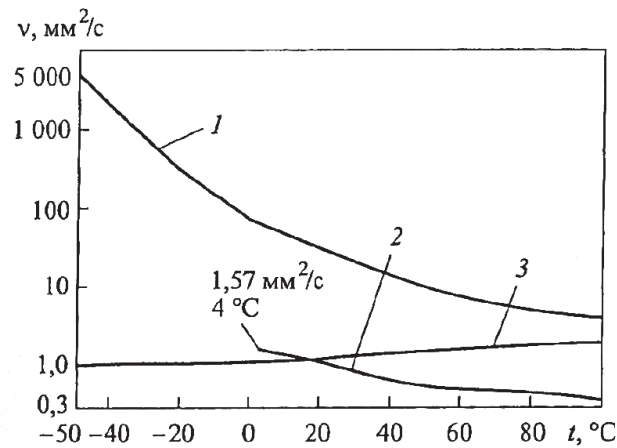


Рис. 2. Зависимости вязкости масла (1), воды (2) и воздуха (3) от температуры

Эти факторы приводят к повреждению устройств при навале судов (повреждению каната).

Для иллюстрации влияния инерционной массы масла приведем график, составленный для проекта Каневского шлюза (рис. 3) [11].

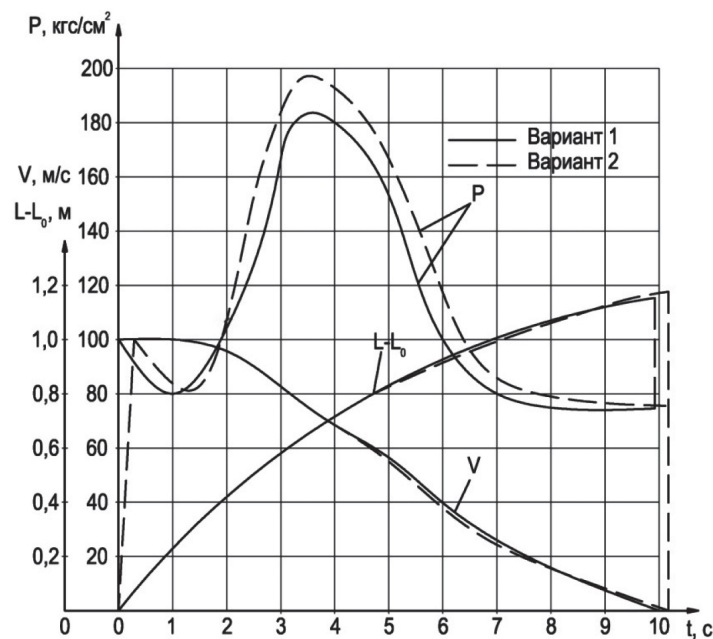


Рис. 3. Характеристика работы предохранительного устройства при навале т/х «Волго-Дон» со скоростью 1,0 м/с

Рассматривается амортизатор в виде гидравлического цилиндра длиной 3,0 м в блоке с воздушно-гидравлическим аккумулятором. График (см. рис. 3) показывает, что начальное давление в цилиндре, которое держит натянутый канат, составляет 100 кг/см<sup>2</sup>, а уже после второй секунды поднимается до 180 кг/см<sup>2</sup>.

Второй негативный фактор — короткий путь торможения, который вызывает значительные инерционные нагрузки. Так, в расчетах (см. рис. 3) ускорение торможения для т/х «Волго-Дон» принято 0,1 м/с<sup>2</sup>, следовательно, сила инерции торможения составляет 675 т, что требует достаточно прочного и массивного оборудования (каната, цепи).

Для снижения инерционных сил покоя в качестве амортизаторов используется система из тормозных цилиндров фирмы «Jarret» (рис. 4) [9], в которых шток погружается в эластичную мас-

су (силикон), заполняющую цилиндр. Так как шток не имеет поршня, вхождение его в цилиндр происходит с постепенным увеличением сопротивления.

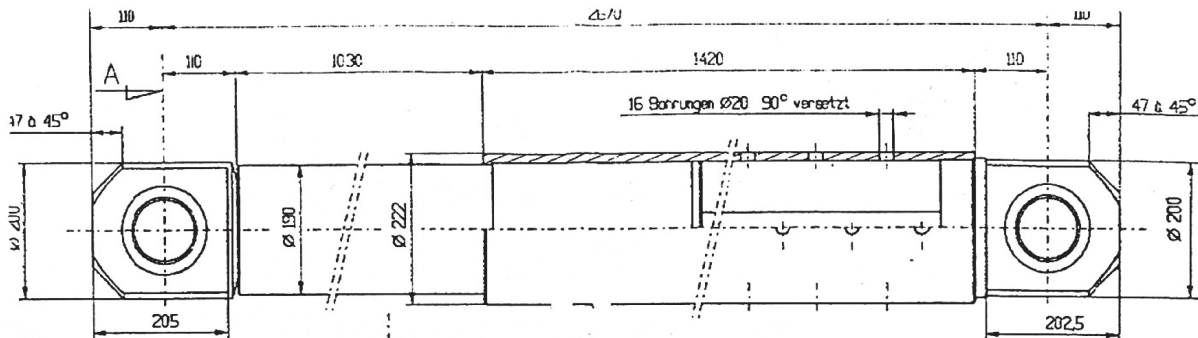


Рис. 4. Конструкция цилиндра фирмы «Jarret»

Данные цилиндры используются в предохранительных устройствах на шлюзах Германии. Их энергоёмкость (рис. 5) не превышает 100 кН (цилиндр BCLR-1000) и имеют довольно короткий ход штока, что является значительным недостатком и позволяет применять данные цилиндры только блоками, а для увеличения пути торможения использовать сложную тросо-блочную систему.

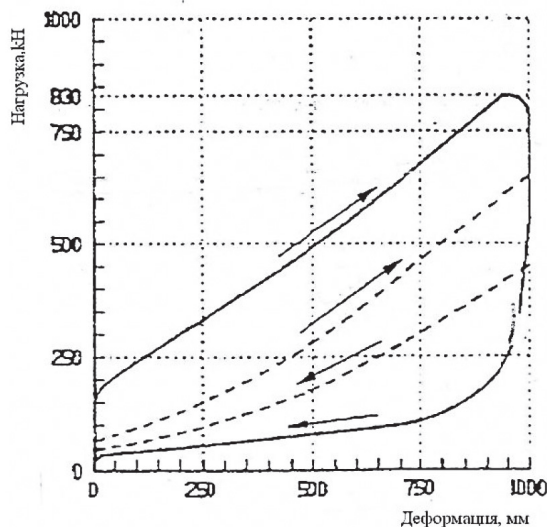


Рис. 5. Диаграмма работы амортизатора «Jarret»

### Предохранительное устройство с фрикционной системой гашения энергии навала судна

Для уменьшения инерционных сил покоя в начальный период навала, а также в связи с необходимостью регулировать тормозные усилия и удлинять путь торможения предлагается фрикционная система торможения [12].

Устройство заключается в следующем: на стенах камеры шлюза монтируется система тормозных тележек, рассчитанная на перемещение судна в зоне ворот. Вся система предупреждения навала (рис. 6) состоит из гибкого органа 1 в виде цепи или каната, перекинутого через судоводный пролет. Канат 1 опускается с помощью специальной тележки 2 на необходимый уровень. Тормозные тележки 3 установлены в горизонтальных пазах 4, проложенных по стенам шлюза 5. В стенках паза 4 проложены тормозные шины 6, а на тележках 3 установлены тормозные колодки 7, при этом тормозные шины 6 установлены с переменной шириной по длине. Между корпусом тележек 3 и тормозными колодками 7 установлены амортизаторы 8 в виде резиновых конических блоков (амортизаторов). По дну паза проложены рельсовые пути 9 на которые опираются тележки 2 и 3.

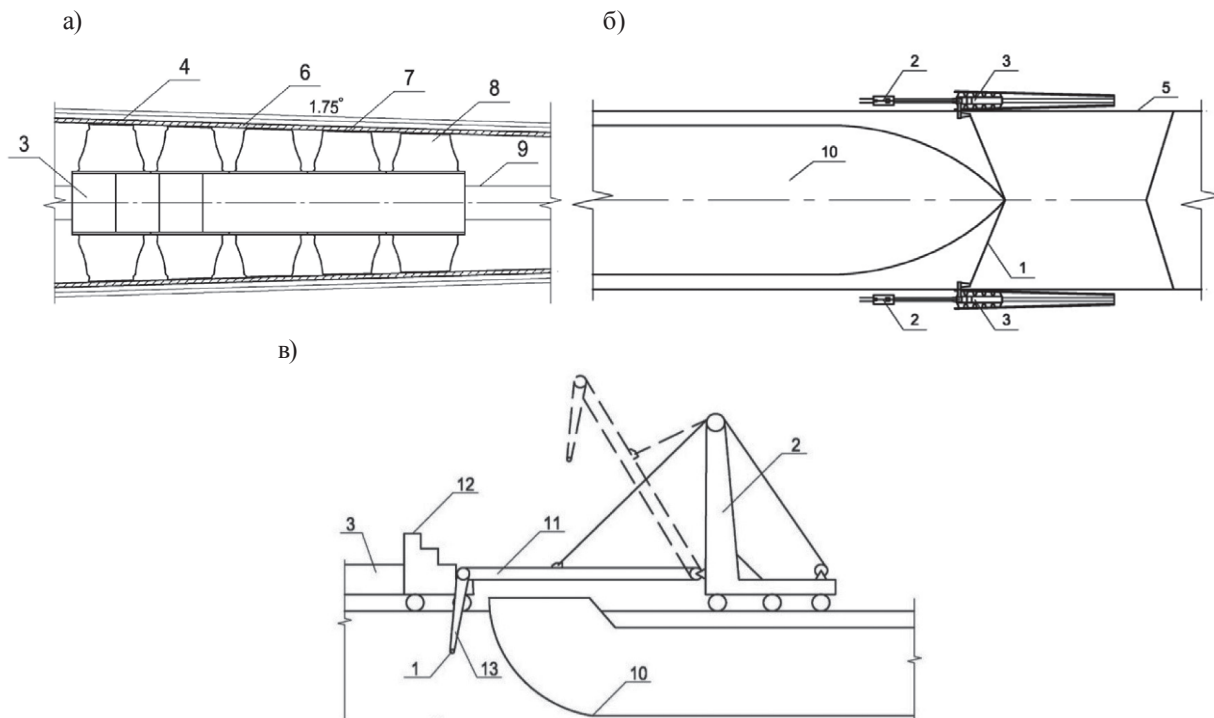


Рис. 6. Предохранительное устройство:

а — тормозные тележки; б — план тормозной системы; в — система наводки заграждения

Для остановки судна 10 в камеру посредством поворотных штанг 11, 13 опускается заградительный канат, при этом концы каната, закрепленные на штангах, входят в сопряжение с тележками. При навале судна заградительный канат, штанговые тележки, и тормозные тележки перемещаются в сторону ворот до полной остановки, при этом энергия навала поглощается силами торможения.

Для остановки судна необходимо выполнение следующего условия:

$$E_k = E_{тр} + E_{сж}$$

где  $E_k$  — кинетическая энергия движения судна;  $E_{тр}$  — энергия сил трения;  $E_{сж}$  — энергия сжатия амортизаторов.

В качестве амортизаторов предлагается использовать отбойные устройства HC600H фирмы «Bridgestone» с известными характеристиками (рис. 7) [13].

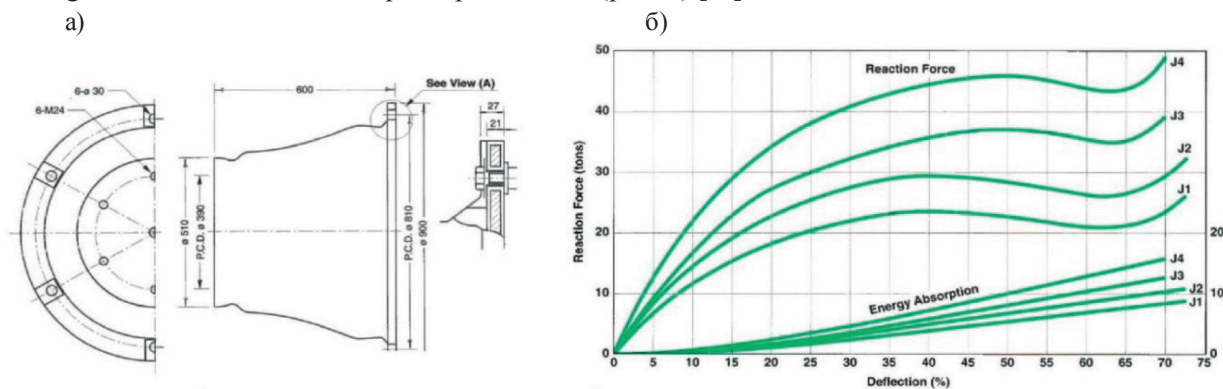


Рис. 7. Отбойное устройство HC600H фирмы «Bridgestone»:

а — общий вид; б — характеристики J1, J2, J3, J4 — типы резины

В нашем примере для расчета амортизаторов использованы характеристики судна Волго-Дон ( $W = 6750$  т,  $V_c = 1,0$  м/с).



Предлагается установить на каждой тележке по десять конусных отбойных устройств НС600Н из класса резины J4. Уклон горизонтального паза с установленными тормозными шинами принимается равным  $1,75^\circ$ .

Эффективность гашения кинетической энергии судна за счет силы трения во многом зависит от характеристик фрикционного материала, из которого состоят тормозные колодки. В рассматриваемом примере был выбран материал ЭМ-1, относящийся к группе вальцованных фрикционных изделий на основе асбеста (коэффициент трения по углеродистой стали — 0,44).

В результате расчетов системы с уклоном горизонтального паза  $1,75^\circ$  был составлен график характеристик системы, а также график изменения скорости судна  $W = 6750$  т после включения в работу предохранительного устройства (рис. 8, 9).

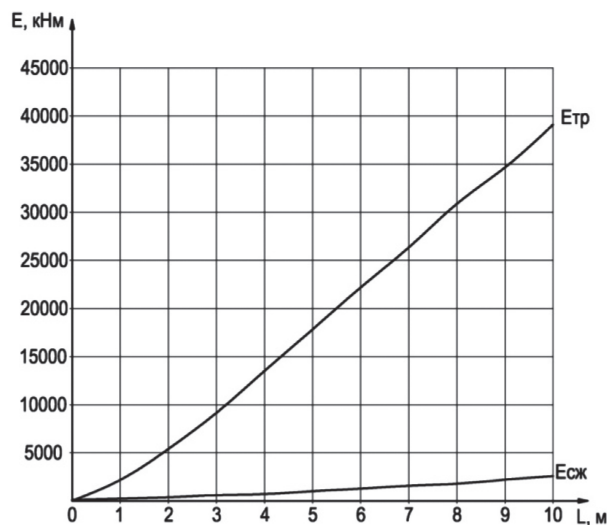


Рис. 8. График характеристик тормозной фрикционной системы (угол установки шин  $\alpha = 1,75^\circ$ ):  $E_{тр}$  — энергия, поглощаемая трением;  $E_{сж}$  — энергия, поглощаемая амортизаторами;  $L$  — путь торможения

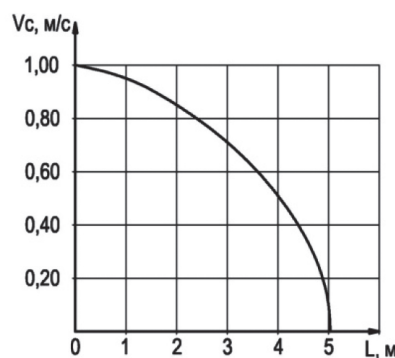


Рис. 9. График изменения скорости судна после включения в работу предохранительного устройства (судно  $W = 6750$ ,  $V_H = 1$  м/с)

При увеличении величины скорости движения судна (табл. 2) при навале график формирует другой режим, а именно увеличение пути движения со снижением ускорения торможения.

Таблица 2

**Изменение характеристик системы в процессе остановки судна**

$L, м$	0	1	2	3	4	5	5,04
$E, кНм$	38000	32745	26510	18610	9655	460	0
$V, м/с$	1,00	0,95	0,85	0,71	0,51	0,11	0,00
$t, с$	0	1,02	1,11	1,28	1,64	3,22	0,36

Для увеличения длины торможения и снижения ускорения рекомендуется уменьшить угол установки тормозных шин. Регулирование уклона допускается в узлах закрепления шин. На фундаментах устанавливаются прокладки и подбором их толщины выбирается оптимальный уклон для создания безопасного режима торможения.

В результате расчетов системы с уклоном горизонтального паза  $1,00^\circ$  был построен график характеристик системы, а также график изменения скорости судна  $W = 6750$  т после включения в работу предохранительного устройства (рис. 10, 11).

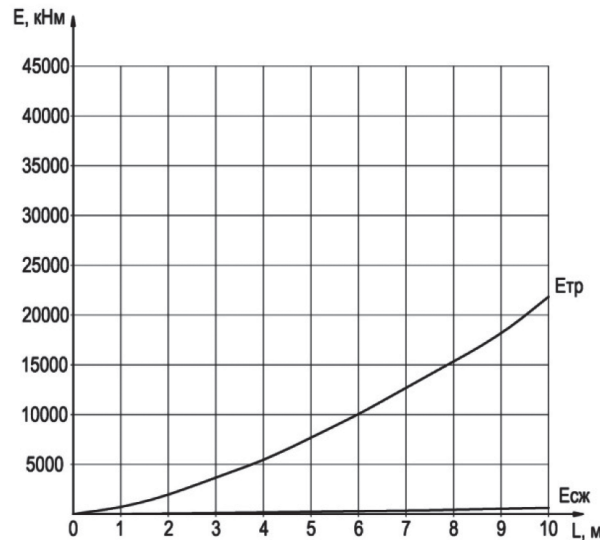


Рис. 10. График характеристик тормозной фрикционной системы (угол установки шин  $\alpha = 1,00^\circ$ ):  $E_{тр}$  — энергия, поглощаемая трением;  $E_{сж}$  — энергия, поглощаемая амортизаторами;  $L$  — путь торможения

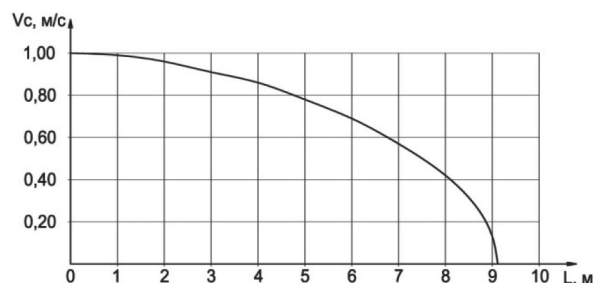


Рис. 11. График изменения скорости судна после включения в работу предохранительного устройства (судно  $W = 6750$ ,  $V_H = 1$  м/с)

Для установки гибкого предохранительного ограждения рассматривались следующие способы:  
– подъем-опускание по вертикальным пазам, выполненных в пилонах;  
– подъем-опускание в воду ниже днища судна.

Принят вариант подъема над судном и опускания перед ним посредством поворотных штанг (см. рис. 6) [14].

Данное решение позволяет автоматически установить посредством захвата гибкое ограждение в захвате тормозных тележек, что сокращает затраты времени и повышает надежность. Кроме того, система поворотных штанг позволяет менять положение гибкого органа по высоте в зависимости от положения уровня воды в камере.

### Выводы

Существующие системы предохранительных устройств для защиты ворот шлюза от навала судна имеют ряд недостатков, в частности, распространенные системы с гидравлическими цилин-

драми не снижают усилие навала в начальный момент контакта форштевня судна с заградительным органом, что приводит к разрыву каната (цепи), выходу из строя всего устройства. Ограниченный путь торможения приводит к воздействию инерционных сил на судно и может привести к повреждению оборудования и несчастным случаям с людьми.

Предлагаемая фрикционная система торможения позволяет снизить начальное усилие в заградительном органе, увеличить длину торможения, обеспечить плавную остановку судна, снизить воздействие инерционных сил. Данная система может быть смонтирована на существующих шлюзах России без переустройства камеры и голов. Эффективность системы обеспечивается за счет постепенного увеличения сил трения от момента навала до полной остановки судна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богатырёв В. Г.* Анализ воздействия судов на ворота шлюза / В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 14–17.
2. *Валькович Я. М.* Проведение исследований по определению оптимальных конструкций аварийных ворот и предохранительных устройств для оснащения различных типов шлюзов / Я. М. Валькович, М. Л. Кузьмицкий // Материалы науч.-практ. конф. «Обеспечение безопасности и надежности судоходных гидротехнических сооружений». — М.: Перо, 2013. — С. 70–99.
3. *Нычик Т. Ю.* Оценка риска аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Т. Ю. Нычик. — СПб.: Гос. университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — 21 с.
4. *Богатырёв В. Г.* Определение несущей способности двустворчатых ворот при навале на них судна / В. Г. Богатырёв // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 3 (62). — С. 73–78.
5. *Колосов М. А.* Предохранительные устройства судоходных шлюзов / М. А. Колосов, С. В. Обоймов // Гидротехника. XXI век. — 2013. — № 4. — С. 34–37.
6. А. с. 1249108 СССР. МПК Е 02 С 1/10. Предохранительное устройство для защиты ворот шлюза от навала / Н. В. Селезнев. — № 3829383/21-11; Заявлено 25.12.84; Оpubл. 07.08.86, Бюл. № 29 (71). — 2 с.
7. А. с. 1079745 СССР. МПК Е 02 С 1/10. Устройство для защиты ворот шлюза от навала судов / В. А. Вознесенский, С. И. Кулагин. — № 3487848/29-11; Заявлено 03.09.82; Оpubл. 15.03.84, Бюл. № 10 (72). — 4 с.
8. Пат. 2335599. Российская Федерация. МПК Е 02 В 7/20, Е 02 С 1/10. Способ защиты ворот шлюза от навала судна / М. А. Колосов; патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. — № 2006139119/03; Заявлено 07.11.2006; Оpubл. 10.10.2008, Бюл. № 28. — 2 с.
9. *Колосов М. А.* Разработка предохранительных устройств металлоконструкций ворот судоходных шлюзов: науч.-технич. отчет по теме № 49 / М. А. Колосов. — СПб., 2004. — 151 с.
10. *Никитин О. Ф.* Рабочие жидкости и уплотнительные устройства гидроприводов / О. Ф. Никитин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 288 с.
11. *Шестаков А. С.* Методы решения уравнений работы предохранительных устройств / А. С. Шестаков, Л. В. Черноморская // Сб. тр. Ленинградского института водного транспорта. — Л.: 1974. — С. 58–71.
12. Пат. 2579229. Российская Федерация. МПК Е 02 С 1/10, Е 02 В 7/20. Предохранительное устройство для защиты ворот шлюза от навала судов / М. А. Колосов, А. А. Смирнов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». — № 2014154371/13; Заявлено 30.12.2014; Оpubл. 10.04.2016, Бюл. № 10. — 7 с.
13. Bridgestone.Hypercellfenders. F250E-1. — BridgestoneCorporation, 2000. — 25 p.
14. Пат. 2532036. Российская Федерация. МПК Е 02 С 1/10. Предохранительное устройство судоходного шлюза / М. А. Колосов, А. А. Эйрус; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». — № 2013109265/13; Заявлено 01.03.2013; Оpubл. 27.10.2014, Бюл. № 30. — 5 с.

## DEVELOPMENT OF A FRICTION SYSTEM TO PROTECTION GATE NAVIGATION LOCK FROM SHIP IMPACT

*The main objective of the article is to provide a friction system to protect gate navigation lock. The vulnerability of the navigation lock, as a part of waterfront waterworks on inland waterways of Russia is specified. The consequences of the ship impact to the gate bottom head of the navigation lock, as well as the consequences of its displacement are identified. A few cases of accidents are specified. Calculation of shock loads on the gate on the example of a displacement of 3920 tons of the ship is submitted. A brief overview of the existing safety devices is provided. Major disadvantages of different constructions are specified. Factors that reduce the effectiveness of the devices are considered. Disadvantages of the safety device using a hydraulic cylinder as one of the most common are discussed in details. The tension in the cable of the protection systems from ship impact on the example of Kanevsky navigation lock project is considered. The conditions which are stopping the ship are considered, calculation of the characteristics of system damping ship energy with corresponding graphs is given. The calculation of the length of the braking path, depending on structural changes in the devices construction was done. Presented friction system eliminates the disadvantages of existing safety devices and allows to manipulate the braking tensions and increase the length of the braking path. The methods to set the protection cable and change position depending of the water level in navigation lock camera are considered. Conclusions on the possibility to using the new safety devices on existing navigation lock in Russian, its operational efficiency, the benefits on comparison to other system to protection gate navigation lock from ship impact are made.*

*Keywords: navigation lock, safety device, ship impact, energy of the impact, the friction system.*

### REFERENCES

1. Bogatyrvov, V. G. "Analiz vozdeystvija sudov na vorota shljuzaz." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3 (2011): 14–17.
2. Valkovich, Ja. M., and M. L. Kuzmitskij. "Provedenie issledovanij po opredeleniju optimal'nyh konstrukcij avarijnyh vorot i predohranitel'nyh ustrojstv dlja osnashhenija razlichnyh tipov shljuzov." *Materialy nauch.-praktich. konf. «Obespechenie bezopasnosti i nadezhnosti sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij»*. M.: Pero, 2013: 70–99.
3. Nychik, T. Ju. Ocenka riska avarij i transportnyh proisshestvij v sudohodnyh shljuzah. Abstract of PhD diss. SPb.: Gos. un-t mor. i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova, 2014.
4. Bogatyrev, V. "Defining of carrying capacity of lock's double folding gates pressed by a ship." *River transport (XXI<sup>st</sup> century)* 3(62) (2013): 73–78.
5. Kolosov, M. A., and S. V. Obojmov. "Predohranitelnye ustrojstva sudohodnyh shljuzov." *Gidrotehnika. XXI vek* 4 (2013): 34–37.
6. Seleznev, N. V. IPC E 02 C 1/10. Predohranitelnoe ustrojstvo dlja zashhity vorot shljuzaz ot navala. USSR, assignee. Patent 1249108. 07 Aug. 1986.
7. Voznesenskij, V. A., and S. I. Kulagin. IPC E 02 C 1/10. Ustrojstvo dlja zashhity vorot shljuzaz ot navala sudov. USSR, assignee. Patent 1079745. 15 March 1984.
8. Kolosov, M. A. RU 2 335 599 C2, IPC E 02 B 7/20, E 02 S 1/10. Sposob zashhity vorot shljuzaz ot navala sudna. Russian Federation, assignee. Patent 2335599. 10 Oct. 2008.
9. Kolosov, M. A. Razrabotka predohranitel'nyh ustrojstv metallokonstrukcij vorot sudohodnyh shljuzov: nauchno — tehnikeskij otchet po teme № 49. SPb., 2004.
10. Nikitin, O. F. *Rabochie zhidkosti i uplotnitel'nye ustrojstva gidroprivodov*. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2013.
11. Shestakov, A. S., and L. V. Chernomorskaja. "Metody reshenija uravnenij raboty predohranitelnyh ustrojstv." *Sbornik trudov Leningradskogo instituta vodnogo transporta*. Leningrad, 1974: 58–71.
12. Kolosov, M. A., and A. A. Smirnov. RU 2 579 229 C1, IPC E 02 S 1/10, E 02 B 7/20. Predohranitelnoe ustrojstvo dlja zashhity vorot shljuzaz on navala sudov. Russian Federation, assignee. Patent 2579229. 10 Apr. 2016.
13. Bridgestone.Hypercellfenders. F250E-1. BridgestoneCorporation, 2000.
14. Kolosov, M. A., and A. A. Jejrus. RU 2 532 036 C1, IPC E 02 S 1/10. Predohranitelnoe ustrojstvo sudohodnogo shljuzaz. Russian Federation, assignee. Patent 2532036. 27 Oct. 2014.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Колосов Михаил Александрович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Смирнов Александр Александрович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Колосов Михаил Александрович*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*inf-smirnoff@yandex.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Kolosov Mikhail Aleksandrovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Smirnov Aleksandr Aleksandrovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Kolosov Mikhail Aleksandrovich*.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*inf-smirnoff@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 25 августа 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-85-97**  
**УДК 626.421; 691.32**

**И. В. Комков,  
К. П. Моргунов,  
А. В. Семенников**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНА КАМЕР ШЛЮЗОВ  
ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА**

*Судоходные шлюзы Волгоградского гидроузла эксплуатируются более 55 лет, при этом железобетонные конструкции гидротехнического сооружения подвергаются воздействию различных нагрузок, изменяющихся во времени. Контрольно-измерительная аппаратура, установленная на шлюзах, морально и физически устарела, часть её вышла из строя, с момента проектирования и строительства шлюзов изменились и нормативные требования, регламентирующие надежную работу шлюзов. Для оценки реального состояния железобетонных конструкций было выполнено детальное исследование свойств бетона камер шлюзов. Использовались две группы методов: выбуривание и лабораторные испытания контрольных образцов бетона (кернов) и методы неразрушающего исследования. Для верхней и нижней камер шлюза № 31 определялась прочность и защитные свойства бетона, степень коррозии арматуры. Установлено, что в большинстве образцов прочность бетона превышает проектную, пониженная прочность бетона выявлена на участках, подверженных выщелачиванию и морозной деструкции. Бетон строительных конструкций верхней и нижней камер шлюза № 31 не карбонизирован. Конструктивная арматура частично корродированна, на рабочей арматуре коррозии нет. При наличии в стенах камер достаточного количества дефектов, связанных с разуплотнением и разрушением поверхностных зон бетона, зоны слабого бетона не превышают глубины в 20 – 40 см. За 55 лет эксплуатации бетон конструкций лишь упрочнился.*

*Ключевые слова: судоходные шлюзы, определение прочности и сплошности бетона, прочность на сжатие, степень карбонизации, активная коррозия арматуры.*

**Введение**

Судоходные шлюзы № 30 и № 31 Волгоградского гидроузла являются гидротехническими сооружениями I класса и находятся в эксплуатации уже более 55 лет. Длительная эксплуатация шлюзов привела к определенным изменениям параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций, особенно проявившимся в последние 20 лет. В значительной степени это обусловлено, по-видимому, тем, что в эти годы изменился характер эксплуатации шлю-

зов — существенно снизилось количество шлюзований, как правило, одна из ниток гидроузла находилась в осушенном состоянии для производства ремонтных работ, подвергаясь при этом температурным воздействиям значительных амплитуд. В результате этого в последние годы зафиксировано изменение состояния сооружения: возникли особенности в фильтрационном режиме сооружений, деформациях верха стен камер шлюзов, напряжениях в тыловой арматуре стены.

С самого начала эксплуатации на шлюзах было организовано наблюдение за состоянием железобетонных конструкций. В соответствии с проектом, шлюзы были оснащены контрольно-измерительной аппаратурой для оценки состояния и перемещения конструкций сооружений: щелемерами, геодезическими марками. Кроме того, в научно-исследовательских целях одна из секций верхней камеры шлюза была оснащена специальными закладными приборами для изучения и контроля напряжений в арматуре, давления грунта на тыловые грани стен камеры, деформаций швов и температурного режима железобетонных конструкций.

К настоящему времени установленная на Волгоградском гидроузле контрольно-измерительная аппаратура, в том числе и закладная, морально и физически устарела, а часть её вышла из строя. Кроме того, с момента проектирования и строительства шлюзов разработаны новые методы исследования свойств бетонов и оценки их характеристик [1] – [7], изменились и нормативные требования, регламентирующие надежную работу шлюзов. Поэтому оценка реального состояния железобетонных конструкций в настоящее время является весьма актуальной задачей, так как очевидно, что нарушение прочности и устойчивости конструктивных элементов сооружений может привести их в аварийное состояние с понижением уровня безопасности гидроузла в целом и прекращением судоходства через него.

С этой целью в 2014 – 2015 гг. было выполнено детальное исследование свойств бетона конструкций камер шлюзов.

### **Исследование свойств бетона**

В соответствии с проектной архивной документацией по производству работ [8], днище камер Волгоградского гидроузла и первый ярус бетонирования должны были быть изготовлены из бетона марки М250 В 4 морозостойкостью 200 циклов, остальные стеновые блоки — из бетона М200 В 4 Мрз200, а плиты-оболочки — из бетона М250 В 8 Мрз300. Однако при строительстве в отступление от проекта бетон с морозостойкостью 200 циклов не применялся и был заменён на бетон с морозостойкостью 100 циклов.

Для приготовления бетонов использовался пластифицированный и пуццолановый портландцемент марки не ниже 400. По минералогическому составу в применяемых цементах Себряковского и Магнитогорского заводов содержание извести составляло 65 – 66 %. Расход цемента составлял 270 – 320 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, водоцементное отношение — 0,45 – 0,6, подвижность бетонной смеси — в пределах 4 – 8 см. В качестве мелкого заполнителя использовался песок с модулем крупности 1,1 – 1,6, в качестве крупного заполнителя применялся щебень и гравий фракций 5 – 40 и 40 – 80 мм в соотношении 50 : 50. В качестве добавки пластификатора применялась сульфатно-спиртовая барда в количестве 0,2 % от веса цемента.

Проведенные в 2014 – 2015 гг. исследования имели своей целью определение фактической прочности монолитного бетона железобетонных строительных конструкций верхней и нижней камер шлюза № 31 через 55 лет с момента строительства.

Работа началась с проведения внешнего осмотра и освидетельствования железобетонных строительных конструкций для выявления наиболее значимых дефектов и повреждений по внешним признакам (разрушения, вывалы, значительные трещины). В процессе обследования составлялись карты дефектов и дефектные ведомости с детальным описанием повреждений и их расположения. Пример карты дефектов правой стенки верхней камеры шлюза № 31 приведен на рис. 1.

По результатам освидетельствования были определены места дальнейшего инструментального обследования.

Схема повреждения стен верхней камеры шлюза №31 (правая сторона)

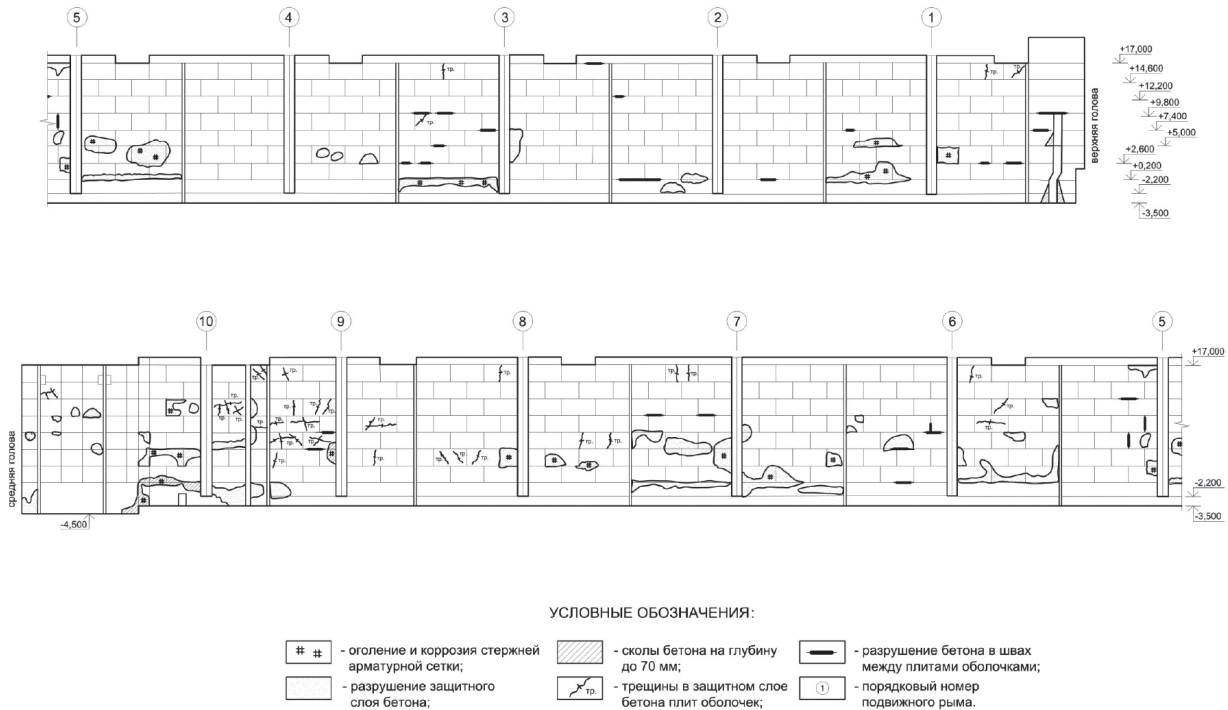


Рис. 1. Карта дефектов правой стенки верхней камеры шлюза № 31

Выявленные в ходе визуального освидетельствования дефекты и повреждения бетона в основном сводились к следующим:

- оголение и коррозия стержней арматурной сетки;
- разрушение защитного слоя бетона;
- сколы бетона на глубину до 70 мм;
- трещины в защитном слое бетона плит оболочек;
- разрушение бетона в швах между плитами оболочками.

Анализ и дальнейшее инструментальное исследование показали, что имеющиеся в камерах дефекты и повреждения не представляют опасности для несущей способности конструкций и не снижают прочности бетона.

Для инструментального обследования были применены две группы методов:

- выбуривание и лабораторные испытания 12 контрольных образцов бетона (кернов) с определением фактической прочности бетона на сжатие по ГОСТ [9], [10];
- методы неразрушающего исследования.

С использованием неразрушающих методов были выполнены следующие исследования:

- неразрушающий контроль фактической прочности бетона механическими методами упругого отскока и отрыва со скалыванием в 71 месте по ГОСТ [11];
- определение глубины карбонизации (оценка защитных свойств бетона) по ГОСТ [12] с помощью пробы фенолфталеина (однопроцентный спиртовой раствор) на свежем изломе бетона в местах отрыва со скалыванием;
- неразрушающий контроль фактической прочности и трещиноватости бетона ультразвуковым методом в 50 местах согласно ГОСТ [13];

– определение расположения арматуры и толщины защитного слоя бетона магнитным методом по ГОСТ [14];

– неразрушающий контроль степени коррозии арматуры путем измерения потенциалов на поверхности бетона по [15].

Участки испытаний назначались в соответствии с требованиями [16]:

– в зонах наиболее нагруженного сечения, определяющего несущую способность конструкции, где прочность бетона имеет наибольшее значение;

– в местах, имеющих дефекты и повреждения, которые могут свидетельствовать о снижении прочности бетона (коррозионные повреждения, морозная деструкция в зоне переменного уровня воды и т. д.).

По результатам анализа проектных расчетов прочности камер шлюза [8] наиболее нагруженное сечение находится в вутовой части шлюза, так как она испытывает максимальные нагрузки во всех расчетных случаях.

Данные по количеству кернов и участков измерений прочности бетона неразрушающими методами представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Определение прочности бетона конструкций шлюза № 31  
(количество измерений)**

Контракция	Методы инструментального обследования			
	метод упругого отскока	ультразвуковой метод	метод отрыва со скалыванием	отбор кернов бетона
Нижняя камера	30	30	21	8
Верхняя камера	20	20	–	4

Выбуривание кернов из бетона конструкций шлюза выполнялось буровой установкой HILTI DD200; распиловка бетонных кернов на испытуемые образцы проводилось камнерезным станком РК 70NM 400V 4KW. Фрагменты рабочих моментов инструментального обследования представлены на рис. 2 и 3.

а)



б)



Рис. 2. Рабочие моменты выбуривания кернов бетона из железобетонных конструкций камер шлюза № 31:

а — отбор образцов бетона из вутовой части;

б — отбор образцов бетона в нижней камере



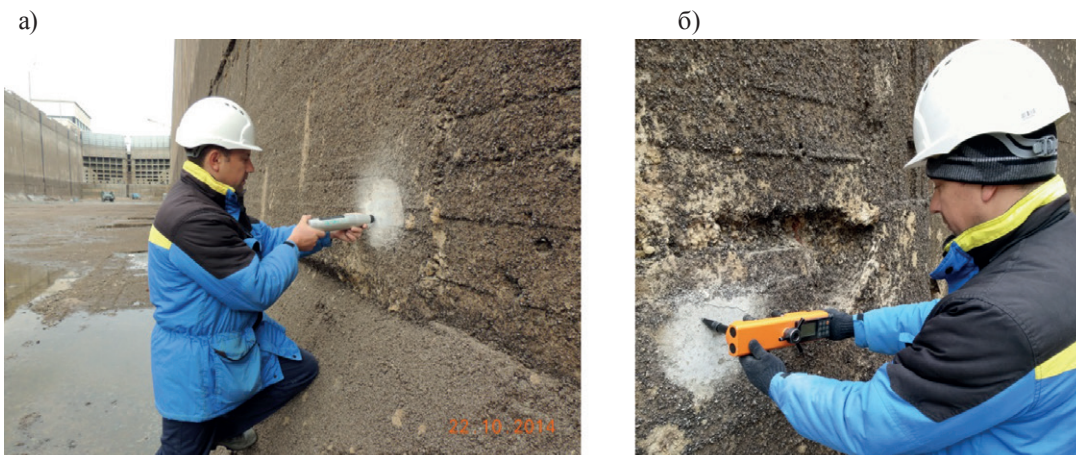


Рис. 3. Рабочие моменты инструментального обследования железобетонных конструкций камер шлюза № 31:

- а* — измерение прочности монолитного бетона неразрушающим методом упругого отскока;  
*б* — измерение прочности монолитного бетона неразрушающим методом отрыва со скалыванием

Для неразрушающего контроля применены следующие технические средства:

- Proceq ORIGINAL SCHMIDT тип N, молоток Шмидта — прибор неразрушающего контроля прочности бетона механическим методом упругого отскока;
- Оникс-ОСnew — прибор неразрушающего контроля прочности бетона механическим методом отрыва со скалыванием;
- УКС-МГ4С — ультразвуковой тестер для неразрушающего контроля прочности и сплошности бетона акустическим методом;
- CANIN+ — прибор для неразрушающего контроля степени коррозии арматуры в железобетонных конструкциях методом потенциалов;
- HILTI PS35 — металлодетектор, прибор экспресс-определения положения арматуры в железобетонных конструкциях и толщины защитного слоя бетона.

По итогам детального комплексного исследования свойств бетона конструкций шлюзов были получены следующие результаты.

**1. Определение прочности бетона.** Прочность бетона оценивалась по результатам лабораторных испытаний образцов (выбуренных кернов) и с использованием неразрушающих натуральных испытаний.

*Верхняя камера шлюза № 31*

*Испытание кернов.* Для лабораторных испытаний железобетонных строительных конструкций верхней камеры шлюза были отобраны восемь проб бетона (керны диаметром 100 мм, высотой до 400 мм). Образцы керна приведены на рис. 4.

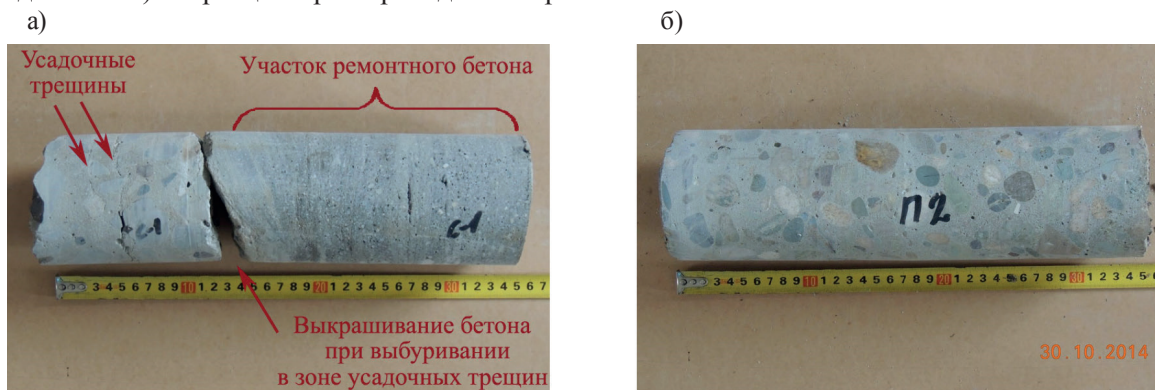


Рис. 4. Керны, отобранные из железобетонных конструкций верхней камеры шлюза № 31:

- а* — вид керна, отобранного из вутовой части правой стены верхней камеры;  
*б* — вид керна, отобранного из пазухи рымов верхней камеры

Внешний осмотр проб бетона показал:

- структура бетона характеризуется наличием однонаправленных вертикальных усадочных трещин, распределение зёрен крупного заполнителя и растворной составляющей равномерное;
- контактная зона крупного заполнителя и растворной составляющей плотная;
- крупным заполнителем является гравий и щебень не менее трех видов различных горных пород, размеры фракций — до 80 мм;
- в растворной составляющей имеются поры и каверны диаметром до 5 мм, в отдельных пробах — пустоты объёмом до 1 см<sup>3</sup>;
- контактная зона монолитного бетона с плитами-оболочками плотная, трещин нет.

*Плотность* бетона находится в пределах  $2311 \pm 140$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует тяжёлому бетону.

Характеристики однородности бетона по плотности:

- среднеквадратическое отклонение — 90,6 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент вариации — 3,9 %;
- минимальное отклонение от среднего — 0,3 кг/м<sup>3</sup> или 0,01 %;
- максимальное отклонение от среднего — 139,1 кг/м<sup>3</sup> или 6,0 %.

*Прочность на сжатие.* Средняя кубиковая прочность бетона составила  $32,2 \pm 10,6$  МПа, что соответствует классу бетона В25 или марке М350, согласно [17], при проектной марке М250. Результаты определения прочности бетона на сжатие образцов (кернов) представлены в табл. 2.

Характеристики однородности бетона по прочности:

- среднеквадратическое отклонение — 6,9 МПа;
- коэффициент вариации — 21,3 %;
- максимальное отклонение от среднего — 10,6 МПа;
- минимальное отклонение от среднего — 0,4 МПа.

Таблица 2

**Результаты определения прочности бетона на сжатие  
(верхняя камера шлюза № 31, проектная марка бетона М250)**

Маркировка образца	Фактическая кубиковая прочность бетона, МПа		Фактическая марка / класс бетона
	образца	средняя	
С1а	51,7*	–	М550/В40
С1б	33,6	33,6	М350/В25
С2а	22,2	22,4	М200/В15
С2б	22,6		
С3а	21,6	26,9	М250/В20
С3б	32,3		
С3в	20,7		
О1	55,2*	–	М550/В40
О2а	43,7*	–	М400/В30
О2б	38,0	37,95	М350/В27,5
О2в	37,9		
П1а	29,0	29,0	М300/В22,5
П2а	40,2	42,8	М400/В30
П2б	45,5		
П2в	38,0		
П3а	26,0	32,6	М350/В25
П3б	39,1		
<b>Среднее</b>		<b>32,2</b>	<b>М350/В25</b>

\* Образцы не участвовали в анализе прочности, так как содержат ремонтный бетон и бетон плит оболочек.

*Неразрушающий контроль прочности и сплошности бетона.* Измерение фактической прочности бетона строительных конструкций верхней камеры неразрушающими методами (механический метод отрыва со скалыванием, упругого отскока и ультразвуковой метод) проведено на 30 участках, общее количество измерений составило 81.

Результаты измерений представлены в табл. 3 – 5.

Таблица 3

**Результаты измерений прочности бетона механическим методом упругого отскока [11]  
 (верхняя камера шлюза № 31, проектная марка бетона М250)**

Номер участка измерения	Измеренная прочность, МПа			Фактическая марка / класс бетона
	мин.	макс.	средняя	
1	19,3	26,2	23,3	М200/В15
2	23,4	28,9	27,2	М250/В20
3	30,3	35,8	31,2	М300/В22,5
4	37,2	44,0	42,2	М400/В30
5	45,4	52,3	48,0	М450/В35
6	35,8	41,3	39,1	М400/В30
7	22,1	26,2	24,8	М200/В15
8	22,1	27,5	24,1	М200/В15
9	30,3	35,8	33,0	М350/В25
10	34,4	39,9	38,0	М350/В27,5
11	50,9	57,8	55,0	М550/В40
12	35,8	44,0	39,9	М400/В30
13	33,0	38,5	35,8	М350/В27,5
14	38,5	41,3	40,5	М400/В30
15	41,3	49,5	44,7	М400/В30
16	31,7	35,8	34,0	М350/В25
17	46,8	55,0	50,7	М450/В35
18	39,9	46,8	44,8	М400/В30
19	31,7	37,2	33,6	М350/В25
20	26,2	33,0	30,4	М300/В22,5
21	33,3	38,8	36,8	М350/В27,5
22	10,0	15,5	12,5	М100/В7,5
23	26,5	34,7	29,9	М300/В22,5
24	40,2	48,5	45,6	М450/В35
25	25,1	30,6	28,7	М250/В20
26	21,0	29,2	23,9	М200/В15
27	18,2	25,1	22,4	М200/В15
28	8,6	12,7	11,0	М100/В7,5
29	34,7	43,0	38,5	М350/В27,5
30	46,8	55,0	50,4	М450/В35
<b>Среднее</b>			<b>34,7</b>	<b>М350/В25</b>

Таблица 4

**Результаты измерений прочности бетона ультразвуковым методом [13]  
 (верхняя камера шлюза № 31, проектная марка бетона М250)**

Номер участка измерения	Скорость УЗК, м/с	Измеренная прочность, МПа	Фактическая марка / класс бетона
1	4389	31,6	M300/B22,5
2	4321	30,1	M300/B22,5
3	5231	52,3	M550/B40
4	4802	40,5	M400/B30
5	4877	42,2	M400/B30
6	4567	34,9	M350/B25
7	4448	32,5	M350/B25
8	3769	21,4	M200/B15
9	4172	27,6	M250/B20
10	4713	38,6	M400/B30
11	5167	50,6	M450/B35
12	5168	50,5	M450/B35
13	5049	46,9	M450/B35
14	4538	34,2	M350/B25
15	4649	36,9	M350/B27,5
16	5345	56,4	M550/B40
17	5216	52,0	M550/B40
18	5142	50,1	M450/B35
19	4590	35,7	M350/B27,5
20	4808	40,6	M400/B30
21	4520	34,2	M350/B25
22	3710	20,6	M200/B15
23	5256	53,2	M550/B40
24	5020	46,5	M450/B35
25	5119	49,9	M450/B35
26	4961	44,8	M400/B30
27	3914	23,4	M200/B15
28	3291	15,9	M150/B10
29	5335	56,0	M550/B40
30	4990	45,0	M450/B35
<b>Среднее</b>		<b>39,8</b>	<b>M400/B30</b>

Таблица 5

**Результаты измерений прочности бетона механическим методом отрыва со скалыванием [11]  
 (верхняя камера шлюза № 31, проектная марка бетона М250)**

№ участка измерения	Фактическая прочность, МПа	Фактическая марка / класс бетона
2	25,1	M200/B15
3	54,7	M550/B40



Таблица 5  
(Окончание)

4	41,6	M400/B30
5	46,4	M450/B35
6	34,8	M350/B25
7	28,1	M250/B20
8	26,6	M250/B20
9	33,1	M350/B25
10	36,5	M350/B27,5
11	53,3	M550/B40
12	47,5	M450/B35
13	55,7	M550/B40
14	47,0	M450/B35
15	57,5	M550/B40
16	34,3	M350/B25
17	50,2	M450/B35
18	47,8	M450/B35
19	27,5	M250/B20
20	31,3	M300/B22,5
30	57,5	M550/B40
<b>Среднее</b>	<b>40,3</b>	<b>M400/B30</b>

Средняя фактическая прочность бетона составила 38,0 МПа, что с учётом однородности соответствует классу бетона В20 или марке М250 согласно [17]. По результатам неразрушающего контроля классы В27,5 и выше получены в 56,8 % случаев, классы В15 – В25 — в 38,3 % случаев, классы ниже В15 — в 4,9 % случаев. Фактическая прочность бетона в большинстве случаев выше или соответствует проектной (проектная марка бетона М250).

Характеристики однородности по прочности:

- среднеквадратическое отклонение — 11,7 МПа;
- коэффициент вариации — 30,7 %;
- минимальное отклонение от среднего — 0,1 МПа;
- максимальное отклонение от среднего — 27,6 МПа.

Прочность бетона определялась одновременно разрушающим и тремя неразрушающими методами контроля прочности: двумя механическими (метод упругого отскока, отрыв со скалыванием) и ультразвуковым. Это подтверждает высокую надежность полученных результатов.

#### *Нижняя камера шлюза № 31*

В нижней камере шлюза прочностные свойства бетона определялись по четырем образцам (керны диаметром 100 мм, высотой до 400 мм).

*Внешний вид* образцов бетона из конструкций нижней камеры идентичен образцам, полученным в верхней камере.

*Плотность* бетона находится в пределах 2315 – 118 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует тяжёлому бетону.

Характеристики однородности бетона по плотности:

- среднеквадратическое отклонение — 72,0 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент вариации — 3,1 %;
- минимальное отклонение от среднего — 3,4 кг/м<sup>3</sup> или 0,15 %;
- максимальное отклонение от среднего — 118 кг/м<sup>3</sup> или 5,1 %.

*Прочность на сжатие.* Средняя кубиковая прочность бетона составила 25,0 – 3,8 МПа, что соответствует классу бетона В20 или проектной марке М250 согласно [16].

Характеристики однородности по прочности:

- среднее квадратическое отклонение — 3,8 МПа;
- коэффициент вариации — 15,1 %;
- максимальное отклонение от среднего — 3,8 МПа;
- минимальное отклонение от среднего — 2,6 МПа.

*Неразрушающий контроль прочности и сплошности бетона.* Измерение фактической прочности бетона строительных конструкций нижней камеры шлюза № 31 неразрушающими методами (механический метод упругого отскока и ультразвуковой метод) проведено на 20 участках, общее количество измерений — 40.

Средняя фактическая прочность бетона составила 28,2 МПа, что с учётом однородности соответствует классу бетона В20 или марке М250 согласно [17]. По результатам неразрушающего контроля классы В25 и выше получены в 20,0 % случаев, классы В22,5 – В20 — в 52,5 % случаев, класс В15 — в 27,5 % случаев. Фактическая прочность бетона в большинстве случаев выше или соответствует проектной (проектная марка бетона М250).

Характеристики однородности по прочности:

- среднее квадратическое отклонение — 5,2 МПа;
- коэффициент вариации — 18,3 %;
- минимальное отклонение от среднего — 0,1 МПа;
- максимальное отклонение от среднего — 16,8 МПа.

**2. Защитные свойства бетона и состояние арматуры.** Оценка защитных свойств бетона и степени коррозии арматуры железобетонных конструкций проводилась по степени карбонизации и толщине защитного слоя бетона. Была также выполнена диагностика активной коррозии арматуры в конструкциях. Результаты этих исследований следующие.

Бетон строительных конструкций не карбонизирован. При порах, полностью заполненных водой, скорость проникновения  $CO_2$  в бетон стремиться к нулю.

Фактическая толщина защитного слоя бетона составляет:

- конструктивной сетки — 20 мм;
- конструктивной арматуры — не менее 45 мм;
- рабочей арматуры — 200 мм.

Толщина защитного слоя бетона соответствует проектным требованиям.

Неразрушающий контроль состояния стальной арматуры проведен на участках монолитного бетона железобетонных конструкций, выполнен с использованием прибора CANIN+. Результатом работы прибора являлись эквипотенциальные карты коррозионной активности, на которых отображены потенциалы коррозии стержневой арматуры в бетоне. Пример карты потенциалов приведен на рис. 5.

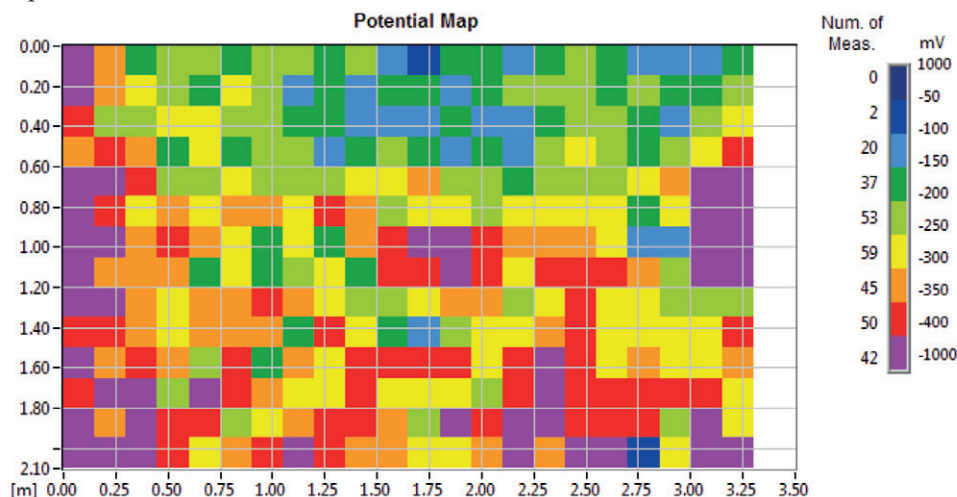


Рис. 5. Карта потенциалов железобетонных монолитных стен верхней камеры шлюза № 31 для оценки степени коррозии арматуры прибором CANIN+

Показания потенциалов находятся в больших пределах — от минус 150 мV до минус 1000 мV — и свидетельствуют:

- о наличии неравномерной коррозии арматуры внутри бетонных конструкций с вероятностью 90 %;
- о распространении коррозии от обнажённой арматуры на разрушенных участках вдоль стержней вглубь бетонного массива, выявленные усадочные трещины способствуют развитию этого процесса;
- о потере пассивности арматуры в зоне влияния усадочных трещин.

### Выводы и заключения

В строительных конструкциях верхней и нижней камер шлюза № 31 имеются следующие дефекты и повреждения:

- оголение и коррозия стержней арматурной сетки;
- разрушения защитного слоя бетона;
- сколы бетона на глубину до 70 мм;
- трещины в защитном слое бетона плит оболочек;
- разрушение бетона в швах между плитами оболочками.

Проведенные исследования и анализ их результатов показали, что выявленные дефекты и повреждения не критичны и не снижают несущую способность стен.

При визуальном обследовании отобранных кернов бетона выявлены однонаправленные усадочные трещины. Контактная зона плит оболочек и монолитного бетона плотная, трещин нет.

Средняя прочность бетона на сжатие при проектной марке М250 составила:

- верхняя камера — 37,7 МПа, что соответствует марке бетона М350 или классу В27,5;
- нижняя камера — 27,9 МПа, что соответствует марке бетона М250 или классу В20.

В большинстве случаев прочность бетона превышает проектную, пониженная прочность бетона выявлена на участках, подверженных выщелачиванию и морозной деструкции.

Бетон строительных конструкций верхней и нижней камер шлюза № 31 не карбонизирован.

Конструктивная арматура частично корродирована. На рабочей арматуре коррозии нет.

Таким образом, проведенные исследования свойств бетона показали, с одной стороны, наличие в стенах камер достаточного количества дефектов, связанных с разуплотнением и разрушением поверхностных зон бетона. Однако, с другой стороны, мероприятия по разборке бетонных поверхностей при проведении ремонта в камерах показали, что зоны слабого бетона не превышают глубины в 20 – 40 см. Глубже и в остальных зонах бетон по результатам опробования имеет прочность, превышающую проектную на 5,0 – 10 МПа, т. е. за 55 лет эксплуатации бетон конструкций лишь упрочнился.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонс Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов: пер. с румынск. / Р. Джонс, И. Фэжэоару. — М.: Стройиздат, 1974. — 292 с.
2. Васильев П. И. Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений / П. И. Васильев, Ю. И. Кононов, Я. Н. Чирков. — Киев; Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1982. — 320 с.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. — М.: АСВ, 2007. — 528 с.
4. Маилян Р. Л. Строительные конструкции: учеб. пособие / Р. Л. Маилян, Д. Р. Маилян, Ю. А. Веселов. — 4-е изд. — Ростов н/Д: Феникс, 2010. — 875 с.
5. Штенгель В. Г. Общие проблемы технического обследования неметаллических строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / В. Г. Штенгель // Инженерно-строительный журнал. — 2010. — № 7. — С. 4–9.
6. Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений / А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 4. — С. 10–15.

7. Улыбин А. В. Определение прочности бетона при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. Д. Федотов, Д. С. Тарасова // Мир строительства и недвижимости. — 2012. — № 45. — С. 2–5.
8. Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС. Технический отчет о проектировании и строительстве: в 2 т. — М.-Л.: Энергия, 1965. — Т. 1. Основные сооружения гидроузла / под ред. А. В. Михайлова. — 648 с.
9. ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции. — М.: Стандартинформ, 2005. — 11 с.
10. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. — М.: Стандартинформ, 2007. — 5 с.
11. ГОСТ 22690-88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. — М.: Издательство стандартов, 1995. — 28 с.
12. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2010. — 35 с.
13. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.
14. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. — М.: Стандартинформ, 2010. — 11 с.
15. ОДМ 218.3.001-2010. Рекомендации по диагностике активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений на автомобильных дорогах методом потенциалов полуэлемента. — М.: Росавтодор, 2011. — 35 с.
16. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. — М.: ФГУП ЦПП, 2003. — 27 с.
17. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2005. — 17 с.

## INVESTIGATION OF CONCRETE LOCK CHAMBER VOLGOGRAD HYDROUNIT

*Shipping locks of Volgograd hydrounit are operated for more than 55 years, with the concrete structures of hydraulic structures are exposed to different loads, changing over time. Test equipment installed at gateways, morally and physically obsolete, part of it is out of order, since the design and construction of locks changed and regulatory requirements governing the safe operation of locks. Detailed study of the properties of concrete lock chambers was performed to assess the real state of reinforced concrete structures. We used two groups of methods: drilling-out and laboratory tests of concrete test samples (cores) and non-destructive methods of investigation. For the upper and lower chambers gateway number 31 determines the strength and protective properties of the concrete, the degree of corrosion of the reinforcement. It was found that in most of the samples exceed the design strength of concrete, reduced strength of concrete found in areas prone to leaching and frosty destruction. Concrete building structures gateway upper and lower camera number 31 is not carbonized. Structural reinforcement partially corroded, working on fitting no corrosion. In the presence of cells in the walls of a sufficient amount of defects associated with decompression and destruction of the concrete surface zones of weak concrete area does not exceed a depth of 20 - 40 cm. Over 55 years of operation, only hardened concrete structures.*

*Keywords: shipping locks, determination of strength and continuity of the concrete, compressive strength, carbonation rate, active rebar corrosion.*

## REFERENCES

1. Dzhons, R., and I. Fjekjeoar. *Nerazrushajushhie metody ispytanij betonov*. Trans. M.: Strojizdat, 1974.
2. Vasilev, P. I., Ju. I. Kononov, and Ja. N. Chirkov. *Zhelezobetonnye konstrukcii gidrotehnicheskikh sooruzhenij*. Kiev; Doneck: Vishha shkola. Golovnoe izd-vo, 1982.
3. Bazhenov, Ju. M. *Tehnologija betona*. M.: Izd-vo ASV, 2007.
4. Mailjan, R. L., D. R. Mailjan, and Ju. A. Veselov. *Stroitelnye konstrukcii: uchebnoe posobie*. 4-th ed. Rostov n/D: Feniks, 2010.
5. Shtengel, V. G. "General problems of technical diagnosis of non-metal building structures in explotable buildings and erections." *Magazine of Civil Engineering* 7 (2010): 4–9.
6. Ulybin, A. V. "On the choice of concrete strength inspection methods of ready-built structures." *Magazine of Civil Engineering* 4 (2011): 10–15.



7. Ulybin, A. V., S. D. Fedotov, and D. S. Tarasova. "Opredelenie prochnosti betona pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenij." *Mir stroitelstva i nedvizhimosti* 45 (2012): 2–5.
8. Volzhskaja GJeS im. XXII sezda KPSS. Tehnicheskij otchet o proektirovanii i stroitel'stve: V 2 t. Tom 1. Osnovnye sooruzhenija gidrouzla. Ed. A. V. Mihajlov. M.-L.: Izd-vo «Jenergija», 1965.
9. GOST 28570-90. Concretes. Methods of strength evaluation on cores drilled from structures. M.: Standartinform, 2005.
10. GOST 12730.1-78. Concretes. Methods of determination of density. M.: Standartinform, 2007.
11. GOST 22690-88. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of nondestructive testing. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 1995.
12. GOST 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. M.: Standartinform, 2010.
13. GOST 17624-2012. Concretes. Ultrasonic method of strength determination. M.: Standartinform, 2014.
14. GOST 22904-93. Reinforced concrete structures. Magnetic method for the determination of the thickness of concrete protection layer and the location of the reinforcement. M.: Standartinform, 2010.
15. ODM 218.3.001-2010. Rekomendacii po diagnostike aktivnoj korrozii armatury v zhelezobetonnyh konstrukcijah mostovyh sooruzhenij na avtomobil'nyh dorogah metodom potencialov polujelementa. M.: Rosavtodor, 2011.
16. SP 13-102-2003. Requirements for Inspection of Load-Bearing Structural Elements of Buildings and Structures. M.: FGUP CPP, 2003.
17. GOST 26633-91. Heavy-weight and concretes. Specifications. M.: Standartinform, 2005.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Комков Игорь Владимирович* —  
Заведующий лабораторией комплексных  
обследований энергетических сооружений.  
Волгоградский филиал АО «НИИЭС»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Моргунов Константин Петрович* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*morgunovkp@gumrf.ru*  
*Семенников Алексей Викторович* —  
Руководитель группы.  
Волгоградский филиал АО «НИИЭС»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*

#### INFORVATUON ABOUT THE AUTORS

*Komkov Igor Vladimirovich* —  
Head of the Laboratory of complex  
survey of energy facilities.  
Volgograd branch JSC «NIIES»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Morgunov Konsnantin Petrovich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*morgunovkp@gumrf.ru*  
*Semennikov Aleksey Viktorovich* —  
Team leader.  
Volgograd branch JSC «NIIES»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 22 августа 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-97-103**  
**УДК 622.271.5**

**А. Ю. Чебан**

### РАЗРАБОТКА РУСЛОВЫХ И ОБВОДНЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕСКА И ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ

*Гидромеханизированная подводная разработка полезных ископаемых получила в мире довольно большое распространение, при этом наиболее значительные объемы приходятся на добычу строительных горных пород. В Российской Федерации с помощью землесосных снарядов в основном разрабатываются месторождения песка и песчано-гравийных материалов. Данные полезные ископаемые потребляются в больших объемах при ведении различных видов строительных работ, а также в качестве сырья для производства многих строительных материалов. В Приморском крае значительная часть песка и песчано-гравийных материалов добываются из русловых или обводненных месторождений. В статье отмечаются*

*преимущества подводной добычи рыхлых строительных горных пород в сравнении с открытым способом разработки. Приводятся данные по маркам и основным параметрам землесосных снарядов, применяемых на разработке русловых и обводненных месторождений в Приморском крае. Основные объекты для подводной добычи полезных ископаемых расположены в бассейне реки Раздольная на юге Приморского края. В работе представлены данные по климатическим условиям района разработки, количеству и наименованиям предприятий, ведущих подводную разработку, числу осваиваемых ими месторождений и участков, а также информация о длительности сезона добычных работ. Приводятся основные элементы системы подводной разработки строительных горных пород, определяемые горно-геологическими условиями залегания полезных ископаемых и гидрологией разрабатываемых участков. Дается информация по применяемому транспортному, перегрузочному и вспомогательному оборудованию, и последовательности формирования карт намыва полезных ископаемых. Указываются технологические отличия и особенности разработки обводненных месторождений в сравнении с русловыми месторождениями.*

*Ключевые слова: строительные горные породы, землесосный снаряд, грунтовый насос, трубопровод, карта намыва, производительность, транспортировка.*

### **Введение**

Гидромеханизованная подводная разработка полезных ископаемых получила в мире довольно большое распространение, при этом наиболее значительные объемы приходятся на добычу строительных горных пород (нерудных строительных материалов) в виде песка, песчано-гравийных материалов, гравия, известняков, мела и других горных пород [1] – [3]. Добыча нерудных строительных материалов ведется на материковых и шельфовых месторождениях. Наиболее крупные объемы подводной добычи нерудных строительных материалов приходятся на Японию, США, Китай, Россию, Великобританию и некоторые другие страны. В Российской Федерации гидромеханизованным способом в основном добываются рыхлые строительные горные породы (песок и песчано-гравийные материалы).

Песок и песчано-гравийные материалы потребляются в больших объемах при ведении различных видов строительных работ, а также в качестве сырья для производства многих строительных материалов. Строительная отрасль является одним из ускорителей экономического развития регионов, вовлекая в свою орбиту различные отрасли промышленного производства и транспорта, так или иначе связанные со строительством. Значительная часть песка и песчано-гравийных материалов, получаемых в Приморском крае, добывается из русловых или обводненных месторождений. Ресурсный потенциал подобных месторождений в крае достаточно велик и может обеспечить потребности строительной отрасли края при текущем уровне потребления на многие годы вперед.

Добыча песка и песчано-гравийных материалов из русел рек, озер и водохранилищ с помощью землесосных снарядов в сравнении с открытой разработкой имеет ряд преимуществ. В частности, при подводной добыче не требуется вывода земель сельскохозяйственного и лесного назначения под создание карьеров и других объектов горного производства, отсутствуют проблемы и затраты, связанные с постоянной откачкой воды или даже остановкой работ при интенсивных осадках, появляется возможность использования водного транспорта для доставки добытых строительных горных пород потребителям без проведения перегрузочных работ в случае их расположения вблизи водных коммуникаций, речной песок в большинстве случаев имеет высокую степень очистки, в нем практически нет посторонних включений в виде глинистых примесей и органики, что значительно повышает его функциональные свойства [4] – [6].

### **Землесосные снаряды для добычи рыхлых горных пород**

Эффективным оборудованием для подводной добычи рыхлых строительных горных пород являются землесосные снаряды, которые обеспечивают выемку горных пород, расположенных под водой, путем смешивания этих пород с водой с получением пульпы (гидросмеси), после чего

происходит всасывание и перемещение пульпы по трубопроводам к месту намыва или сброса [7]. Землесосные снаряды успешно применяются в следующих случаях: при дноуглублении рек и каналов; очистке водохранилищ, рек, каналов, отстойников от илистых отложений, песка и производственных шламов; намыве площадей, насыпей и штабелей; разработке песчано-гравийных материалов, песка и других полезных ископаемых.

В Приморском крае при разработке русловых и обводненных месторождений песка и песчано-гравийных материалов применяются землесосные снаряды марок «С-42А» и «180-60». Основные параметры данных землесосных снарядов, применяемых в крае, представлены в следующей таблице:

**Основные параметры землесосных снарядов, задействованных на разработке русловых месторождений песка и песчано-гравийных материалов Приморья**

Основные параметры	Марка землесосного снаряда	
	С-42А	180-60
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	1800	2000
Вес (без пульпопровода), т	110	150
Тип корпуса	Разборный	Неразборный
Тип разрыхлителей грунта	Гидравлические и фрезерные	Гидравлические
Длина, м	19,8	22,0
Ширина, м	8,6	9,5
Осадка, м	0,90	0,83
Диаметр пульпопровода, м	0,53	0,53
Установленная мощность электрооборудования, кВт	1080	1020

Землесосные снаряды состоят из корпуса в виде понтонов, на котором размещено рабочее оборудование и установлена палубная надстройка. Рабочее оборудование включает грунтовый насос, грунтозаборное устройство с разрыхлителями, всасывающий трубопровод, стрелу для подъема-опускания грунтозаборного устройства, лебедки для маневрирования землесосного снаряда, а также другое оборудование. Подача поднятой со дна пульпы может осуществляться в баржи или по плавучим пульпопроводам непосредственно на карты намыва. Тип грунтозаборного устройства землесосного снаряда зависит от категории разрабатываемого грунта. Грунтовый насос определяет главный параметр землесосного снаряда — производительность по пульпе, м<sup>3</sup>/ч. Использование землесосных снарядов является наиболее распространенным способом добычи и переработки больших объемов рыхлых строительных горных пород.

**Состояние русловой добычи рыхлых горных пород в Приморском крае**

Основные объекты для подводной добычи песка и песчано-гравийных материалов расположены в бассейне реки Раздольная на юге Приморского края, климат района муссонный со среднегодовой температурой воздуха +2 °С с абсолютным максимумом +37 °С и минимумом –45 °С. Среднегодовая норма осадков составляет 700 – 750 мм, средняя высота снежного покрова — 250 мм. Река Раздольная и ее притоки обычно мелководные, течение воды спокойное, питание реки происходит за счет атмосферных осадков и подземных вод, в дождливое время наблюдается быстрый подъем уровня воды и подтопление поймы реки. При значительном подъеме уровня воды по всей системе бывают сильные наводнения, подъем уровня в реке Раздольная может достигать 6 м, наибольший подъем воды в реке наблюдается в августе и сентябре.

Из русловых и обводненных месторождений добывается более половины кварцевого песка и около 40 % песчано-гравийных материалов в крае. Кварцевые пески и песчано-гравийные материалы русловых и обводненных месторождений Приморья в основном используются в транспортном

строительстве для устройства дорожного полотна, а также после отсева крупных фракций в качестве мелкого заполнителя в строительные растворы и сухие строительные смеси.

Крупнейшими предприятиями Приморского края, осуществляющими разработку русловых и обводненных месторождений полезных ископаемых, являются ООО «Гидрокомплекс» и ООО «Универсал-Сервис». Всего в Приморье подводной добычей рыхлых строительных горных пород занимается пять организаций на семи месторождениях и участках. Разработка русловых и обводненных месторождений Приморского края осуществляется в течение теплого времени года (с конца апреля до середины ноября) и составляет в среднем 190 – 200 дней, что на две-три недели больше, чем длительность добычного сезона на аналогичных месторождениях Хабаровского края и Амурской области.

Предприятия при подводной добыче строительных горных пород используют как собственную добычную, перегрузочную, транспортирующую и вспомогательную речную технику, так и арендованную. На рисунке показан землесосный снаряд «С-42А», получивший в крае наибольшее распространение.



Рис. Землесосный снаряд «С-42А»

Подобного рода землесосные снаряды представляют собой разборные конструкции, которые по частям можно транспортировать по железной дороге или на трейлере, при этом вес наиболее тяжелой из транспортируемых частей земснаряда не превышает 7,5 т. Монтаж землесосного снаряда обычно производится в холодное время года на льду водоема при естественном достижении или наморозке достаточной толщи льда для работы грузоподъемных механизмов.

Элементы системы подводной разработки строительных горных пород определяются горно-геологическими условиями залегания полезных ископаемых и гидрологией разрабатываемых участков. Добычные работы осуществляются параллельными заходками с обеспечением безопасных условий производства работ. Разработка песка или песчано-гравийных материалов ведется одним уступом на полную глубину полезной толщи и составляет 8 – 12 м, отработка забоя ведется веерным способом, минимальная ширина заходки землесосного снаряда «С-42А» при угле поворота 60 ° составляет 26 м, фронт работ обычно принимается равным 150 – 200 м, общее продвижение фронта работ за год составляет 200 – 300 м в зависимости от средней мощности полезного слоя, заложение подводного откоса обычно принимается равным 1:2. В качестве вспомогательного оборудования при ведении работ на воде используются буксирно-моторные катера БМК-150.

Транспортировка пульпы осуществляется по трубам, обычно диаметром 0,53 м, пульпопровода на карты намыва. Подача полезных ископаемых на карты намыва обычно ведется торцевым способом, при этом способе пульпопровод укладывают на поверхность и с торца участка начинают подачу пульпы, после намыва слоя толщиной 0,2 – 0,3 м в радиусе 8 – 10 м наращивают очередное звено пульпопровода с помощью крана-трубоукладчика (типа ТГ-121). Когда намываемый слой и труба пульпопровода достигают границы участка, трубы постепенно разбирают, т. е. продолжают



намыв в обратном направлении, а когда остается одно, последнее звено, его приподнимают на 0,2 – 0,3 м и начинают наращивание нового слоя в прежнем порядке. Первичное и попутное обвалование участка выполняется бульдозерами среднего класса (типа Т-130, Т-170) с использованием местного грунта. Отработанная вода с карт намыва сбрасывается с помощью деревянных или металлических водосборных колодцев с водосборным коллектором из стальных труб диаметром 0,63 м в водосточную канаву и далее — в выработанное пространство. Колодец по мере намывания песка или песчано-гравийного материала наращивают так, чтобы высота переливающегося слоя воды была не более 0,05 – 0,10 м.

При освоении обводненных месторождений строительных горных пород применяется комбинированный способ обработки: открытым способом с применением бульдозеров и экскаваторов удаляется почвенно-растительный слой и вскрышные породы (представленные супесями, глинами и суглинками), сверху перекрывающие полезное ископаемое; подводным гидромеханическим способом с использованием землесосного снаряда отрабатываются вскрытые ликвидные рыхлые строительные горные породы.

На некоторых предприятиях целью повышения качества полезных ископаемых, поставляемых потребителям, осуществляются процессы обогащения (для удаления илистых и глинистых включений) и классификации. Отгрузка песка потребителям в автотранспорт выполняется с помощью погрузчиков или экскаваторов [8] – [10].

### Выводы

1. Разработка русловых и обводненных месторождений рыхлых строительных горных пород с использованием высокопроизводительных выемочных и транспортирующих машин непрерывного действия позволяет достигать низкой себестоимости добычи полезных ископаемых и высокой рентабельности горного производства.
2. Необходимо отметить, что при разработке месторождений Приморского края задействовано менее крупное добычное и перегрузочное оборудование, чем на аналогичных предприятиях, расположенных в бассейне реки Амур в Хабаровском крае и Амурской области.
3. Подводная гидромеханизированная разработка месторождений обеспечивает снабжение строительной индустрии качественными, очищенными от посторонних включений материалами в виде кварцевого песка и песчано-гравийной смеси.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугин С. А. Геотехнологии открытой добычи минерального сырья на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями / С. А. Батугин, Н. С. Батугина, А. М. Бураков, В. Л. Гаврилов, [и др.] / отв. ред. С. М. Ткач; Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т горного дела Севера им. Н. В. Черского. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. — 307 с.
2. Шпанский О. В. Технология и комплексная механизация добычи нерудного сырья для производства строительных материалов / О. В. Шпанский, Ю. Д. Буянов. — М.: Недра, 1996. — 462 с.
3. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров / Стандарт организации СТО 52.08.31-2012, Гос. гидрологический институт. — СПб.: Изд-во «Глобус», 2012. — 140 с.
4. Чебан А. Ю. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов в средства водного транспорта / А. Ю. Чебан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 43–47.
5. Чебан А. Ю. Гидромеханизированная добыча строительных горных пород в бассейне реки Амур / А. Ю. Чебан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 73–78.
6. Ушаев М. С. Совершенствование транспортирования строительных материалов на объект по ферменному пути / М. С. Ушаев, В. Н. Ушанов, Г. А. Архипов // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 4. — С. 9–11.

7. Деревяшкин И. В. Земснаряды на карьерах, их возможности и перспектива / И. В. Деревяшкин, В. В. Чаплыгин, О. Н. Исаев // Маркшейдерия и недропользование. — 2016. — № 4 (84). — С. 39–43.
8. Алексеев А. В. Анализ структуры современных складов сыпучих грузов / А. В. Алексеев // Наука и техника транспорта. — 2013. — №3. — С. 084–087.
9. Чебан А. Ю. Устройство для перегрузки насыпных строительных материалов из автосамосвалов в железнодорожный транспорт / А. Ю. Чебан // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 2. — С. 33–36.
10. Витвицкий Е. Е. Рациональное управление перевозками грузов автомобильным транспортом как инструмент снижения стоимости городского строительства / Е. Е. Витвицкий, С. С. Войтенков // Механизация строительства. — 2015. — № 4 (850). — С. 17–20.

## DEVELOPMENT OF CHANNEL SAND DEPOSITS AND IRRIGATION AND SAND AND GRAVEL IN THE PRIMORSKY TERRITORY

*Hydromechanized underwater development of mineral resources in the world had quite a spread, with the most significant fall in the volume of production of building rocks. In the Russian Federation with the help of suction dredger is mainly developed deposits of sand and sand and gravel. These minerals are consumed in large volumes in the management of various types of construction works, and also as a feedstock for the production of many building materials. In Primorye, a significant portion of sand and sand and gravel extracted from the river bed and flooded fields. The article points out the advantages of subsea construction loose rocks compared to open pit development. The data on the grades and the basic parameters of the dredge used in the development of channel and the irrigated fields in the Primorsky Territory. The main objects for underwater mining operations are located in Razdolnaya River basin in the south of Primorye. The paper presents data on the climatic conditions of the area of development, the number and names of the leading enterprises of submarine design and reclaimed the number of fields and sectors, as well as information about the duration of the mining operations of the season. The basic elements of the system of underwater development of building rocks determined by geological conditions of occurrence of minerals and hydrology developed areas. We give information on applicable transport, handling and auxiliary equipment, and the sequence of formation of alluvium card minerals. Include the technological differences and peculiarities of the development of irrigated fields in comparison with the riverbed deposits.*

*Keywords: construction rocks, dredge, soil pump, piping, an alluvium card, productivity, transportation*

### REFERENCES

1. Batugin, S. A., N. S. Batugina, A. M. Burakov, V. L. Gavrilov, et al. *Geotehnologii otkrytoj dobychi mineralnogo syr'ya na mestorozhdenijah so slozhnymi gorno-geologicheskimi uslovijami*. Edited by Sergej Mihajlovich Tkach. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2013.
2. Shpanskij, Oleg Vasilevich, and Ju. D. Bujanov. *Tehnologija i kompleksnaja mehanizacija dobychi nerudnogo syr'ja dlja proizvodstva stroitel'nyh materialov*. M.: Nedra, 1996.
3. *Dobycha nerudnyh stroitelnyh materialov v vodnyh obektah. Uchet ruslovogo pro-cessa i rekomendacii po proektirovaniju i jekspluatacii ruslovyh karerov*. Standart organizacii STO 52.08.31-2012, Gos. gidrologicheskij institut. SPb.: Izd-vo Globus, 2012.
4. Cheban, Anton Yurievich. “Complex for handling of dry bulk construction materials in water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 43–47.
5. Cheban, Anton Yurievich. “Hydromechanized mining construction of rocks in the basin of river Amur.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 73–78.
6. Ushaev, Magomed Supyanovich, Vyacheslav Nikolaevich Ushanov, and Gennadiy Anatolievich Arkhipov. “Improving the transportation of construction materials on the subject of the way truss.” *Mechanization of construction* 77.4 (2016): 9–11.
7. Derevyashkin, I., V. Chaplygin, and O. Isaev. “Dredgers at borrow pits, capabilities and outlook.” *Mine surveying and subsurface use* 4(84) (2016): 39–43.
8. Alekseev, Anton Vladimirovich. “Analiz struktury sovremennyh skladov sypuchih грузов.” *Nauka i tehnika transporta* 3 (2013): 084–087.

9. Cheban, Anton Yu. "A device for handling of bulk building materials from dump trucks to rail." *Mechanization of construction* 77.2 (2016): 33–36.

10. Vitvitskiy, Evgeniy E., and Sergey S.Voitenkov. "Rational freight management by road transport as a tool for reducing the urban construction cost." *Mechanization of construction* 4(850) (2015): 17–20.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чебан Антон Юрьевич —  
кандидат технических наук, доцент.  
Институт горного дела ДВО РАН  
chebanay@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Cheban Anton Yurievich —  
PhD, associate professor.  
Mining Institute  
chebanay@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-103-109  
УДК 528.1

П. В. Томсон,  
А. В. Титова

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ В ПРОЕКЦИИ ГАУССА–КРЮГЕРА ИЗ ЗОНЫ В ЗОНУ

В данной статье рассматривается новый алгоритм преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса–Крюгера из одной зоны в другую зону. Как известно, 7 апреля 1946 г. Постановлением № 760 Совета Министров была введена единая система геодезических координат и высот в топографо-геодезических и картографических работах (СК-42) в СССР. Ещё до введения этой системы координат советские учёные-геодезисты решали вопрос о выборе равноугольной картографической проекции для перехода с эллипсоида вращения на плоскость, т. е. от геодезических координат к плоским прямоугольным координатам. В связи с имевшейся в то время острой необходимостью создания точных топографических карт на всю территорию страны выбор пал на поперечно-цилиндрическую равноугольную проекцию Гаусса, которую впоследствии стали называть проекцией Гаусса–Крюгера. Высокая точность картографических изображений в этой проекции достигается путём применения узких по долготе, в основном 6-градусных, зон. До сих пор на территорию Российской Федерации, правопреемника СССР, выпадает более 28 таких 6-градусных зон. При решении геодезических задач на стыке смежных координатных зон возникает необходимость преобразования плоских прямоугольных координат из зоны в зону, т. е. из одной плоской прямоугольной системы координат в другую плоскую прямоугольную систему координат. Ситуация усугубляется тем, что не существует алгоритма непосредственного перехода из одной плоской прямоугольной системы координат в другую плоскую прямоугольную систему координат, построенных в проекции Гаусса–Крюгера. Приходится обращаться к геодезической системе координат, заданной на эллипсоиде вращения и являющейся общей для двух сопоставляемых плоских прямоугольных систем координат. Попытка использования геометрического преобразования плоских прямоугольных координат в смежную зону приводит к ограничению долготного интервала, в котором задача имеет приближенное решение. При обработке геодезических материалов, связанных с протяжёнными по долготе объектами, преобразование плоских прямоугольных координат из зоны в зону через геодезические координаты ограничивается точностью алгоритмов преобразования геодезических координат в плоские прямоугольные координаты и обратно. В данной работе предлагается алгоритм преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса–Крюгера из одной зоны в другую зону, не зависящий в пределах Российской Федерации от ширины зон, пригодный для любого эллипсоида вращения, единственным аргументом в котором является долгота осевого меридиана новой зоны.

Ключевые слова: плоские прямоугольные координаты, геодезические координаты, 6-градусная зона, осевой меридиан, преобразование плоских прямоугольных координат, проекция Гаусса–Крюгера, эллипсоид вращения, поперечная проекция Меркатора, ряды Ензгагера, суммирование Кленшоу.

## Введение

В 1897 г. русский учёный в области маркшейдерии В. И. Бауман в своей диссертации призвал геодезическую общественность России к введению общих систем прямоугольных координат. В обсуждении вопроса о введении плоской прямоугольной системы координат в СССР в середине 20-х годов прошлого столетия принимали участие видные учёные: В. В. Каврайский, Н. Н. Матусевич, Н. Г. Келль, Ф. Н. Красовский, А. П. Ющенко и др. На III Геодезическом совещании (28 – 31 марта 1928 г.) было принято Постановление [1]: «О введении в СССР единообразной системы прямоугольных координат, согласно пп. 14 которого было принято следующее: *«Признать, что наиболее приемлемыми для немедленного применения в СССР являются прямоугольные координаты Гаусса–Крюгера»*. Это постановление, кроме принятия плоской прямоугольной системы координат, установило ширину зон как 6-градусных и то, что осевой меридиан должен быть неискажённым.

7 апреля 1946 г. Постановлением № 760 Совета Министров [2] в СССР была введена Единая система геодезических координат и высот в топографо-геодезических и картографических работах (СК-42). До сих пор на территорию Российской Федерации, правопреемника СССР, выпадает более 28 таких 6-градусных зон. При решении геодезических задач на стыке смежных координатных зон возникает необходимость преобразования плоских прямоугольных координат из зоны в зону, т.е. из одной плоской прямоугольной системы координат в другую плоскую прямоугольную систему координат. В публикации [3], в частности, отмечается: *«Чтобы уменьшить случаи перевычисления координат, установлена система «перекрытия зон», а именно, западная и восточные зоны взаимно перекрываются на 30' по долготе»*. На это же обстоятельство обращает внимание автор работы [4], не приводя вариантов преобразования плоских прямоугольных координат из зоны в зону. Ситуация усугубляется тем, что не существует алгоритма непосредственного перехода из одной плоской прямоугольной системы координат в другую плоскую прямоугольную систему координат, построенных в проекции Гаусса–Крюгера, кроме попытки использования геометрического приближенного преобразования плоских прямоугольных координат в смежную зону, которая приводит к ограничению долготного интервала [5]. Современные стандарты [6] – [8] вообще не содержат рекомендаций по преобразованию плоских прямоугольных координат из зоны в зону. На практике приходится обращаться к геодезической системе координат, заданной на эллипсоиде вращения и являющейся общей для двух сопоставляемых плоских прямоугольных систем координат в издании [9]. В этой же работе приводится алгоритм, основанный на использовании геодезических координат, но заключающийся в вычислении поправок к заданным плоским прямоугольным координатам с целью получения соответствующих координат в смежной зоне.

При обработке геодезических материалов, связанных с протяжёнными по долготе объектами, преобразование плоских прямоугольных координат из зоны в зону через геодезические координаты ограничивается точностью алгоритмов преобразования геодезических координат в плоские прямоугольные координаты и обратно при удалении от осевого меридиана более  $9^\circ$ . В статье [10] был поднят вопрос о преобразовании геодезических координат к плоским прямоугольным для широкой координатной зоны проекции Гаусса. В статьях [11], [12] автора данной работы приводятся алгоритмы преобразования геодезических координат к плоским прямоугольным и обратно в одной координатной зоне проекции Гаусса–Крюгера для всей территории Российской Федерации на основе разложений функций преобразования координат до членов высокого порядка, приведенных в публикации [13]. При этом авторами статьи было учтено то обстоятельство, что алгоритмы преобразования координат должны быть рассчитаны на любые эллипсоиды вращения. Так, в Российской Федерации с 01 января 2017 г. согласно данным, приведенным в публикациях [14], [15], вводится новая геодезическая система координат ГСК-2011, параметры эллипсоида вращения которой отличны от параметров референц-эллипсоида Красовского, применяемых в СК-42 и СК-95.

В данной работе предлагается алгоритм преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса–Крюгера из одной зоны в другую зону, не зависящий в пределах Российской



Федерации от ширины зон, пригодный для любого эллипсоида вращения, единственным аргументом в котором является долгота осевого меридиана новой зоны.

### Основная часть

Допустим, что предполагается преобразовать плоские прямоугольные координаты на проекции Гаусса–Крюгера  $(x, y)$  точки, заданной в координатной зоне с долготой осевого меридиана  $L_0$ , в плоские прямоугольные координаты  $(x', y')$  в другой координатной зоне с долготой осевого меридианом  $L'_0$ .

#### Вариант 1

1. Преобразуем координаты  $(x, y)$  проекции Гаусса–Крюгера в координаты  $(X, Y)$  поперечной проекции Меркатора в исходной системе координат с использованием разложений, коэффициентов и суммирования Кленшоу по Енгзагеру [13]:

$$\begin{aligned} X &= \frac{y}{R} + \sum_{i=1}^7 \left( u2_i \cdot \cos \left( 2i \cdot \frac{x}{R} \right) \operatorname{sh} \left( 2i \cdot \frac{y}{R} \right) \right); \\ Y &= \frac{x}{R} + \sum_{i=1}^7 \left( u2_i \cdot \sin \left( 2i \cdot \frac{x}{R} \right) \operatorname{ch} \left( 2i \cdot \frac{y}{R} \right) \right). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R$  — радиус шара, длина дуги меридиана которого равна длине дуги меридиана заданного эллипсоида вращения;  $u2_i$  — коэффициенты Енгзагера [13].

2. Преобразуем координаты проекции Меркатора  $(X, Y)$  в сферические координаты по Ламберту  $(\varphi, \lambda)$  с сохранением длины меридианов:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{(\sin(t)^2 + \cos(t)^2 \cdot \cos(Y)^2)}}{(\sin(Y) \cdot \cos(t))} \right]; \\ \lambda &= \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left[ \frac{(\cos(t) \cdot \cos(Y))}{\sin(t)} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\lambda = l = L - L_0$ ;  $t$  — вспомогательная величина, определяемая по формуле

$$t = 2 \operatorname{arctg} \left( \exp(X) \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

3. Преобразуем сферические координаты  $(\varphi, \lambda)$  в геодезические координаты  $(B, L)$ :

$$\begin{aligned} B &= \varphi + \sum_{i=1}^7 G2_i \cdot \sin(2i\varphi); \\ L &= L_0 + i. \end{aligned} \quad (4)$$

4. Для перехода в новую систему координат, используя сферическую долготу  $l$ , вычисляем отстояние точки по долготе  $l'$  от осевого меридиана с долготой  $L'_0$  в новой системе координат:

$$l' = (L_0 - L'_0) + l. \quad (5)$$

5. Обратным ходом по координатам  $(B, L)$  вычисляем сферические координаты по Ламберту  $(\varphi, \lambda')$  с учётом значения  $l'$ :

$$\begin{aligned} \varphi &= B + \sum_{i=1}^7 (e2_i \cdot \sin(2iB)); \\ \lambda' &= l'. \end{aligned} \quad (6)$$

6. Преобразуем новые сферические координаты  $(\varphi, \lambda')$  в новые прямоугольные координаты в поперечной проекции Меркатора  $(X', Y')$ :

$$\begin{aligned} X' &= \operatorname{Arth}(\cos(\varphi) \cdot \sin(l')); \\ Y' &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\cos(l')} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

7. Преобразуем новые координаты  $(X', Y')$  в поперечной проекции Меркатора в новые координаты  $(x', y')$  в проекции Гаусса–Крюгера:

$$\begin{aligned} x' &= \left[ Y' + \sum_{i=1}^7 (U2_i \cdot \sin(2iY') \cdot \text{ch}(2iX')) \right] \cdot R; \\ y' &= \left[ X' + \sum_{i=1}^7 (U2_i \cdot \cos(2iY') \cdot \text{sh}(2iX')) \right] \cdot R. \end{aligned} \quad (8)$$

где  $U2_i$  — коэффициенты Енгзагера [13].

### Вариант 2

В первом варианте показан пунктуальный переход от плоских прямоугольных координат в исходной координатной зоне к геодезическим координатам и от полученных геодезических координат к плоским прямоугольным координатам в новой координатной зоне. Очевидно, что этот вариант представляется весьма громоздким. Однако несложными преобразованиями можно перейти к более простому алгоритму, исключающему ряд лишних вычислительных операций. С учётом ранее принятых обозначений:

$$\begin{aligned} 1. \quad X &= \frac{y}{R} + \sum_{i=1}^7 \left( u2_i \cdot \cos\left(2i \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot \text{sh}\left(2i \cdot \frac{y}{R}\right) \right); \\ Y &= \frac{x}{R} + \sum_{i=1}^7 \left( u2_i \cdot \sin\left(2i \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot \text{ch}\left(2i \cdot \frac{y}{R}\right) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

$$2. \quad l' = (L_0 - L'_0) + \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{\cos(Y)}{\text{sh}(X)}\right). \quad (10)$$

$$\begin{aligned} 3. \quad X' &= \text{Arth} \left[ \sin(l') \sqrt{\frac{\cos(2Y) + \text{ch}(2X)}{l + \text{ch}(2X)}} \right]; \\ Y' &= \text{arctg} \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(Y)}{\cos(l') \sqrt{\cos(2Y) + \text{ch}(2X)}} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 4. \quad x' &= \left[ Y' + \sum_{i=1}^7 (U2_i \cdot \sin(2iY') \cdot \text{ch}(2iX')) \right] \cdot R; \\ y' &= \left[ X' + \sum_{i=1}^7 (U2_i \cdot \cos(2iY') \cdot \text{sh}(2iX')) \right] \cdot R. \end{aligned} \quad (12)$$

### Выводы

Представленный формулами (9) – (12) алгоритм позволяет выполнять преобразование плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса–Крюгера, заданных в координатной зоне с долготой осевого меридиана  $L_0$ , в координатную зону с долготой осевого меридиана  $L'_0$ , при этом достаточно:

- перейти в поперечную проекцию Меркатора;
- вычислить новые координаты в поперечной проекции Меркатора, предварительно поменяв долготу осевого меридиана;
- перейти в проекцию Гаусса–Крюгера.

Приведённый алгоритм позволяет решать поставленную задачу для любого эллипсоида вращения в пределах всей территории Российской Федерации с учётом того, что в геодезической литературе приводятся коэффициенты рядов разложения в функции третьего сжатия  $u2$  и  $U2$  седьмого и восьмого порядков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Келль Н. Г.* Высшая геодезия и геодезические работы: в 3 ч. — Ч. 1. Курс маркшейдерской специальности горных и геологоразведочных вузов. / Н. Г. Келль. — Л.-М.-Новосибирск: Государственное горное издание, 1932. — 492 с.
2. Постановление Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 года № 760. «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР».
3. Справочник геодезиста. — Кн. 1. — 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. — М.: Недра, 1975. — 544 с.
4. *Морозов В. П.* Курс сфероидической геодезии / В. П. Морозов. — М.: Недра, 1979. — 296 с.
5. *Буткевич А. В.* Таблицы для перевычисления плоских прямоугольных координат Гаусса из одной зоны в другую / А. В. Буткевич, С. П. Герасименко. — М.: Недра, 1969. — 46 с.
6. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 12 с.
7. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. — М.: Стандартинформ, 2009. — 16 с.
8. ГОСТ 32453-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.
9. *Томсон П. В.* Системы координат. Методы преобразования координат / П. В. Томсон, Г. В. Макаров. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. — 62 с.
10. *Баландин В. Н.* Преобразование геодезических координат к плоским прямоугольным для широкой координатной зоны проекции Гаусса / В. Н. Баландин, А. И. Ефанов, И. В. Меньшиков, Ю. Г. Фирсов // Геодезия и картография. — 2014. — № 8. — С. 21–23.
11. *Томсон П. В.* Преобразование геодезических координат к плоским прямоугольным в одной координатной зоне проекции Гаусса–Крюгера для всей территории Российской Федерации / П. В. Томсон // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 250–254.
12. *Томсон П. В.* Преобразование геодезических координат к плоским прямоугольным в одной координатной зоне проекции Гаусса–Крюгера для всей территории Российской Федерации / П. В. Томсон // Сборник материалов международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во «Политехника», 2015. — С. 303–305.
13. *Poder K.* Some Conformal Mappings and Transformations for Geodesy and Topographic Cartography / K. Poder, K. Engsgaer. — København: Kort & Matrikelstyrelsen, 1998. — 63 p.
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. «О единых государственных системах координат» // Собр. законодательства РФ, 07.01.2013, ст. 58.
15. *Томсон П. В.* Об установлении единых государственных систем координат ГСК-2011, ПЗ-90.11 / П. В. Томсон // Сб. науч. тр. профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 138–140.

## DESIGN OF ALGORITHM TRANSFORMATIONS OF PLANE RECTANGULAR COORDINATES IN THE GAUSS-KRÜGER PROJECTION FROM ZONE TO ZONE

*This article discusses a new algorithm to convert flat rectangular coordinates in Gauss-Kruger projection from one zone to another zone. As you know, April 7, 1946 year by decision No. 760 of the Council of Ministers has introduced a unified geodetic coordinate and heights in topographic-geodetic and cartographic works (SC-42) in the USSR. Even before the introduction of the system of coordinates by Soviet scientists-surveyors decided the question of choosing well-coal cartographic projection to go with ellipsoid of rotation in a plane, i.e. from geodetic coordinates to flat rectangular coordinates. In connection with the available at that time-the need for creating precise topographical maps throughout the country, the choice fell on cross-cylindrical conformal of Gauss projection, which subsequently became known as the Gauss-Krüger projection. High accuracy of the map images in this projection is achieved by applying longitudinal narrow, mostly 6-degree, zones. Still on the territory of the Russian Federation, the successor of the USSR, falls more than 28 such 6-degree zone. In addressing the surveying*

task at the junction of the related coordinate zones there is a need to convert a flat rectangular coordinates from zone to zone, i.e. from one flat rectangular system of coordinates to another flat rectangular coordinate system. The situation is exacerbated by the fact that there is no algorithm to go directly from one flat rectangular system of coordinates to another flat rectangular coordinate system, built in Gauss-Kruger projection. Having to ask the geodetic system coordination, given ellipsoid of rotation, and common to the two mapped flat rectangular coordinate systems. Attempted use of geometric transformation flat rectangular coordinates in an adjacent zone restricts longitude interval, which is the approximate solution. When processing of geodetic materials of extremely long of longitude objects, transforming flat rectangular coordinates from zone to zone through geodetic coordinates is limited by the accuracy of the algorithms change the geodetic coordinates-in flat rectangular coordinates and vice versa. This paper proposes an algorithm to convert a flat rectangular coordinates in Gauss-Kruger projection from one zone to another zone, not subject to the provisions within the Russian Federation of the width of the zones fit for any ellipsoid of rotation, the only argument which is the longitude axis Meridian new zone.

*Keywords:* flat rectangular coordinates, geodetic coordinates, 6-degree area, axial Meridian, the conversion of flat rectangular coordinates, Gauss Kruger projection, ellipsoid of rotation, Transverse Mercator, Engzager series, summation Clenshaw.

## REFERENCES

1. Kell, N. G. *Vysshaja geodezija i geodezicheskie raboty. Chast 1. Kurs markshejderskoj special'nosti gornyh i geologo-razvedochnyh Vtuzov.* Leningrad-Moskva-Novosibirsk: Gosudarstvennoe gornoe izdanie, 1932.
2. USSR Council of Ministers Resolution from 7 April 1946 № 760. O vvedenii edinoj sistemy geodezicheskikh koordinat i vysot na territorii SSSR.
3. *Spravochnik geodezista. Kniga 1. Vtoroe izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe.* Edited by V. D. Bolshakov, G. P. Levchuk. M.: Nedra, 1975.
4. Morozov, V. P. *Kurs sferoidicheskoj geodezii.* M.: Nedra, 1979.
5. Butkevich, A. V., and S. P. Gerasimenko. *Tablicy dlja perevychislenija ploskih prjamougolnyh koordinat Gaussa iz odnoj zony v druguju.* M.: Nedra, 1969.
6. Russian Federation. GOST R 51794-2001. Apparatura radionavigacionnaja globalnoj navigacionnoj sputnikovoj sistemy i globalnoj sistemy pozicionirovanija. Sistemy koordinat. Metody preobrazovanija koordinat. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2001.
7. Russian Federation. GOST R 51794-2008. Globalnye navigacionnye sputnikovyje sistemy. Sistemy koordinat. Metody preobrazovanij koordinat opredeljaemyh toček. M.: Standartinform, 2009.
8. Russian Federation. GOST 32453-2013. Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovanij koordinat opredeljaemyh toček. M.: Standartinform, 2014.
9. Tomson, P. V., and G. V. Makarov. *Sistemy koordinat. Metody preobrazovanija koordinat.* SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2010.
10. Balandin, V. N., A. I. Efanov, I. V. Men'shikov, and Ju. G. Firsov. "Transformation of geodetic coordinates to flat rectangular ones for wide coordinate zone of Gauss projection." *Geodesy and Cartography* 8 (2014): 21–23.
11. Tomson, P. V. "Conversion of geodetic coordinates to rectangular coordinates in a flat zone of gauss-kruger projection for the entire territory of the Russian Federation." *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferencii.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. Vol. 2. 250–254.
12. Tomson, P. V. "Preobrazovanie geodezicheskikh koordinat k ploskim prjamougolnym v odnoj koordinatnoj zone proekcii Gaussa-Krjugera dlja vsej territorii Rossijskoj Federacii." *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii.* SPb.: Izd. «Politehnika», 2015: 303–305.
13. Poder, K., and K. Engsager. *Some Conformal Mappings and Transformations for Geodesy and Topographic Cartography.* København: Kort & Matrikelstyrelsen, 1998.
14. Russian Federation. Government Resolution from 28 Dec. 2012 № 1463. O edinyh gosudarstvennyh sistemah koordinat.
15. Tomson, P. V. "On the establishment of the unified state system of coordinates SSC-2011 and PE-90.11." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2014: 138–140.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Томсон Петр Васильевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*peter-thomson@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru*  
*Титова Анастасия Вячеславовна* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Томсон Петр Васильевич*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*heylady1991@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Thomson Peter Vasil'evich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*peter-thomson@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru*  
*Titova Anastasia Vjacheslavovna* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Thomson Peter Vasil'evich*.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*heylady1991@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 18 сентября 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117**  
**УДК 528.47**

**В. В. Ключев**

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕСНЕННОСТИ  
АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ**

*Статья посвящена проблеме разработки количественных показателей и методик формализованной оценки безопасности акватории Северного морского пути (СМП), принципы которой сформулированы в документах Международной морской организации и Полярном кодексе. Рассмотрены особенности полярного судоходства и определены основные источники риска навигационных происшествий в арктических морях. Приведены результаты анализа методов оценки риска навигационных происшествий, основанных на использовании мировой и региональной статистики морских происшествий. Оценена репрезентативность статистики навигационных происшествий, относящаяся к морям арктического бассейна. Установлена взаимосвязь между частотой навигационных происшествий и «стесненностью» акватории. Термин «стесненность» акватории, который обычно используется применительно к плаванию судов в узкостях и на мелководье, предложено использовать в качестве обобщенной характеристики всей акватории СМП и отдельных ее частей. Для определения степени «стесненности» акватории предложено использовать метод, основанный на теории геометрических вероятностей. Приведены примеры эффективного использования теории геометрических вероятностей при решении практических задач гидрографии и дешифровки изображений. Утверждается, что использование теории геометрических вероятностей позволяет задачу количественной оценки «стесненности» акватории свести к задаче о пересечении прямых линий с кривыми на плоскости. В качестве количественной меры «стесненности» акватории автор предложил использовать вероятность пересечения маршрутов судна с навигационными опасностями. Приводятся основные формулы и соотношения, позволяющие рассчитать искомую вероятность аналитически для двух вариантов направления судовых потоков, включающих в себя изотропное множество маршрутов и анизотропное. В заключении дана общая оценка предложенного метода и определены направления его совершенствования.*

*Ключевые слова: «стесненность» акватории, количественная оценка, геометрическая вероятность, навигационная опасность.*

**Введение**

Актуальность темы определяется тем, что в 2017 г. вступает в силу Полярный кодекс [1], в основу которого заложены принципы формальной оценки безопасности (ФОБ), изложенные во Временном руководстве по применению ФОБ, которое в 1997 г. было разработано и одобрено Комитетами морской безопасности и защиты морской окружающей среды при Международной

морской организации (ИМО) [2]. Суть концепции ФОб состоит в априорной оценке рисков морских навигационных и экологических происшествий и разработке мероприятий, направленных на снижение этих рисков. Как правило, при оценке рисков навигационных происшествий используется мировая или региональная статистика аварий, которая позволяет выделить некоторые общие причины аварий по их видам, частоте и условиям, и использовать полученные данные в качестве исходных априорных оценок при разработке ФОб.

К акватории СМП традиционный метод априорных оценок вероятностей навигационных происшествий может быть применен только частично, так как условия арктического судоходства и его риски в значительной степени отличаются от условий судоходства и соответствующих рисков на неарктической акватории Мирового океана. Имеющаяся статистика навигационных происшествий на акватории СМП [3] также не может быть признана репрезентативной для действующих и перспективных круглогодичных арктических транспортных проектов [4] – [10], так как она была, в основном, сформирована в условиях крайне низкой интенсивности судоходства, исключительно для летнего периода навигации и для судов, как правило, с незначительной осадкой и не имеющих ледовых усилений.

### **Постановка задачи исследования**

При отсутствии достоверных статистических данных априорная оценка вероятности может выполняться на основе общих предположений о неблагоприятных событиях. Установлено [11], что навигационные происшествия чаще происходят на «стесненных» участках акваторий. При этом степень «стесненности» акватории определяется размерами и количеством ее участков, опасных для судоходства. Следует отметить, что термин «стесненная акватория» обычно используется применительно к плаванию судов в узкостях и на мелководье [12], где извилистость фарватера и близость к надводным и подводным навигационным опасностям существенно влияют на маневренные характеристики судна.

Результаты гидрографического исследования морей Арктики [13] – [15] показывают, что акватория СМП преимущественно мелководна, изобилует большим количеством подводных навигационных опасностей, к которым относятся отмели, банки, подводные камни и скалы, и поэтому может характеризоваться как «стесненная». Сравнительную оценку степени «стесненности» акватории СМП и отдельных ее частей, которую требуется выполнять для определения потенциально опасных в навигационном отношении районов и проведения комплексных мероприятий, направленных на снижение рисков происшествий [1], целесообразно выполнять, используя некоторые обобщенные количественные показатели акватории. Очевидно, что методика расчета таких показателей и сами показатели, должны быть обоснованными, реализуемыми на практике и объективными.

Количественную оценку степени «стесненности» отдельных частей акватории СМП предлагается выполнить методами, разработанными в теории геометрических вероятностей [16] и отвечающими перечисленным требованиям. В качестве примера использования теории геометрических вероятностей при решении практических задач следует отметить работы [17] – [20], посвященные исследованиям измерительных сетей, используемых при выполнении съемки подводного рельефа и поиске подводных объектов, а также работы [21] и [22], посвященные распознаванию сканированных изображений. Использование теории геометрических вероятностей позволяет задачу количественной оценки «стесненности» акватории свести к задаче о пересечении прямых линий с кривыми на плоскости. При этом в качестве количественной меры «стесненности» акватории  $M_{CA}$  принята вероятность пересечения прямых линий (путь судна) с кривыми (контуры навигационных опасностей)  $P_o$ .

### **Разработка и обоснование метода количественной оценки показателя «стесненность» акватории**

Локальные поднятия дна, представляющие опасность для судна с осадкой  $d$ , зададим в виде

$$R_{oi}^d = R_{oi} [x, y, z < z_{np}(d)], \quad (1)$$

где нижний индекс «о» обозначает «опасность»; индекс  $i$  — номер опасности;  $x, y$  — плановые координаты локального поднятия;  $z$  — глубины во внутренней области локального поднятия дна;  $z_{np}(d)$  — предельные проходные глубины для судна с осадкой  $d$ .

Маршруты судна зададим множеством линий в виде

$$G = \{G(d)\}. \quad (2)$$

Учет осадки  $d$  в моделях (1) и (2) является принципиальным, так как от ее величины зависят проходные глубины и размеры той части локальных поднятий дна, которая должна быть принята как опасная.

Вероятность  $P_o$  пересечения маршрутов судна  $G$  с опасностью  $R_{oi}^d$  представляет собой меру нежелательного события  $M_{CA}[G \cap R_{oi}^d \neq 0]$ , что записывается в виде выражения:

$$P_o = P[G \cap R_{oi}^d \neq 0] = M_{CA}[G \cap R_{oi}^d]. \quad (3)$$

Вероятность безопасного плавания  $P_s$  определяется условием, при котором ни один из маршрутов  $G$  не пересечет опасность  $R_{oi}^d$ . Это условие устанавливается зависимостью

$$P_s = P[G \cap R_{oi}^d = 0]. \quad (4)$$

События, заданные условиями (3) и (4), составляют полную группу событий, т. е.

$$P_o + P_s = 1.$$

Алгоритмы вычисления вероятностей (3) и (4) зависят от выбора направления маршрутов  $G$ , для которых выполняется оценка «стесненности» акватории. Можно выделить два основных способа задания направлений маршрутов: изотропное и анизотропное. На рис. 1 схематично представлены оба способа направления маршрутов. При изотропном способе маршруты располагаются по всем возможным направлениям (рис. 1, а). При анизотропном — выделяются приоритетное направление маршрутов, например, восток – запад (рис. 1, б). При анизотропном способе направления маршрутов, маршруты, отличные от заданных по направлению, считаются запретными.

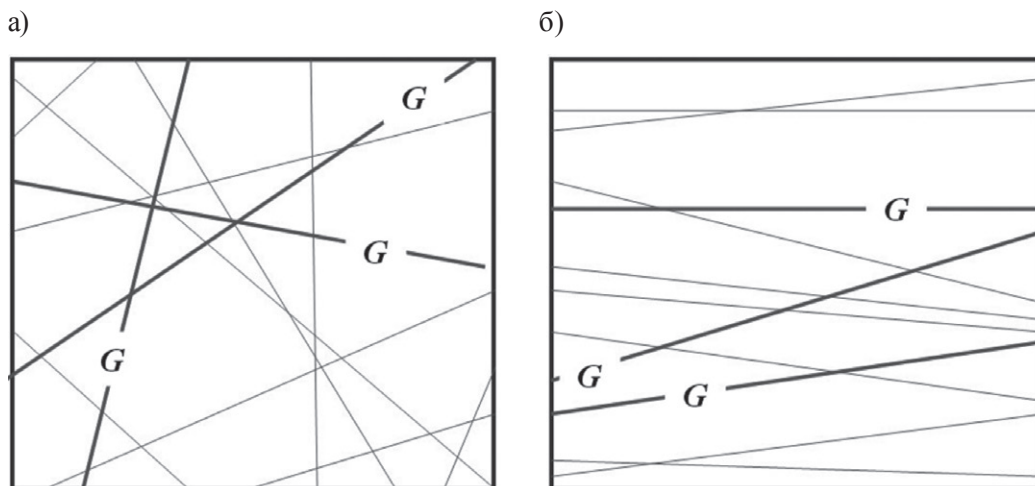


Рис. 1. Схемы маршрутов:  
а — изотропная; б — анизотропная

### Изотропное множество маршрутов

Рассмотрим часть акватории (рис. 2, а), ограниченную квадратом площадью  $S$  и периметром  $L(S)$ . Будем считать, что на акватории находится одно локальное поднятие дна  $R_{oi}^d$ , где  $i = 1$ .

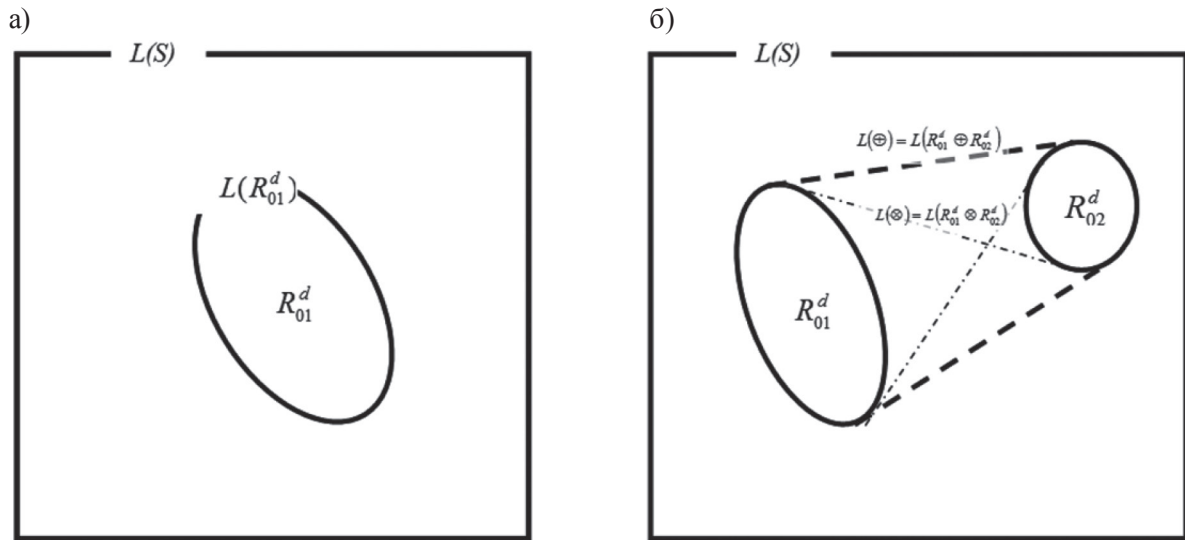


Рис. 2. Схемы акваторий с опасными локальными поднятиями дна:  
а — одно локальное поднятие  $R_{0i}^d$ ; б — два локальных поднятия  $R_{01}^d$  и  $R_{02}^d$

Если допустить, что маршруты  $G$  могут пересекать выделенную часть акватории по любому направлению, что соответствует изотропному множеству прямых линий, то вероятность нежелательного события (3), равная мере стесненности акватории  $M_{CA}^1$ , может быть вычислена по формуле

$$P_o = M_{CA}^1 = \frac{L(R_{01}^d)}{L(S)}, \quad (5)$$

где  $L(R_{01}^d)$  — периметр контура локального поднятия  $R_{01}^d$ ; верхний индекс «1» указывает на количество локальных поднятий на акватории.

Из выражения (5) следует, что вероятность нежелательного события не зависит от положения локального поднятия  $R_{01}^d$  внутри выделенной части акватории.

Рассмотрим более общий случай, когда на выделенной части акватории находится два опасных поднятия  $R_{01}^d$  и  $R_{02}^d$  (рис. 2, б), удаленных друг от друга так, что между ними может быть проложен безопасный маршрут.

Поднятия  $R_{01}^d$  и  $R_{02}^d$  объединим общим контуром, периметр которого обозначим символом  $L(\oplus) = L(R_{01}^d \oplus R_{02}^d)$ . На рис. 2, б общий контур обозначен штриховой линией. Вероятность того, что маршруты при их изотропном расположении пересекут общий контур, может быть вычислена по формуле

$$P_o = \frac{L(\oplus)}{L(S)}. \quad (6)$$

Вероятность того, что ни один из маршрутов не пересечет общий контур, будет равна

$$P_s = 1 - P_o. \quad (7)$$

Выражение (7) получено на том основании, что вероятности  $P_o$  и  $P_s$  образуют полную группу случайных событий.

Маршруты, проходящие через общий контур, делятся на четыре группы:

- $G \cap R_{01}^d \neq \emptyset$  — маршруты, пересекающие поднятие  $R_{01}^d$  (неблагоприятное событие);
- $G \cap R_{02}^d \neq \emptyset$  — маршруты, пересекающие поднятие  $R_{02}^d$  (неблагоприятное событие);
- $G \cap (R_{01}^d, R_{02}^d) \neq \emptyset$  — маршруты, одновременно пересекающие оба поднятия (неблагоприятное событие);



–  $G \cap (R_{o1}^d, R_{o2}^d) = 0$  — маршруты, проходящие между поднятиями  $R_{o1}^d$  и  $R_{o2}^d$  (благоприятное событие).

Из перечисленных групп маршрутов, четвертая группа характеризует безопасное плавание, тогда как первые три определяют степень стесненности акватории.

Для определения вероятности каждого из перечисленных четырех событий требуется измерить длину «скрученного» контура, охватывающего поднятия  $R_{o1}^d$  и  $R_{o2}^d$ . Длину такого контура обозначим символом  $L(\otimes) = L(R_{o1}^d \otimes R_{o2}^d)$ . На рис. 2, б «скрученный» контур обозначен штрихпунктирной линией.

С учетом введённых обозначений, вероятности каждого из перечисленных четырех событий вычисляются по следующим формулам:

$$P(G \cap R_{o1}^d \neq 0) = \frac{L(\oplus) - L(\otimes) + L(R_{o1}^d)}{L(S)}, \quad (8)$$

$$P(G \cap R_{o2}^d \neq 0) = \frac{L(\oplus) - L(\otimes) + L(R_{o2}^d)}{L(S)}, \quad (9)$$

$$P(G \cap (R_{o1}^d, R_{o2}^d) \neq 0) = \frac{L(\otimes) - L(\oplus)}{L(S)}, \quad (10)$$

$$P(G \cap (R_{o1}^d, R_{o2}^d) = 0) = \frac{L(\otimes) - L(R_{o1}^d) - L(R_{o2}^d)}{L(S)}. \quad (11)$$

Сумма вероятностей, рассчитанных по формулам (8) – (11), равна отношению  $L(\oplus)/L(S)$ , что соответствует вероятности, рассчитанной по формуле (6).

Количественная оценка «стесненности» акватории при изотропном расположении маршрутов на основании формул (6) – (11) для двух локальных разнесенных опасных поднятиях, равная вероятности пересечения хотя бы одной из опасностей, определяется по формуле

$$M_{CA}^2 = \frac{L(R_{o1}^d) + L(R_{o2}^d)}{L(S)}. \quad (12)$$

Обобщая полученный результат на  $n$  опасных поднятий дна при изотропном расположении маршрутов, получим выражение для количественной оценки «стесненности» акватории в виде

$$M_{CA}^n = \frac{\sum_{i=1}^n L(R_{oi}^d)}{L(S)}. \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что показатель «стесненности» акватории при отсутствии какого-либо преимущественного направления выбранных маршрутов определяется соотношением размеров акватории и опасностей.

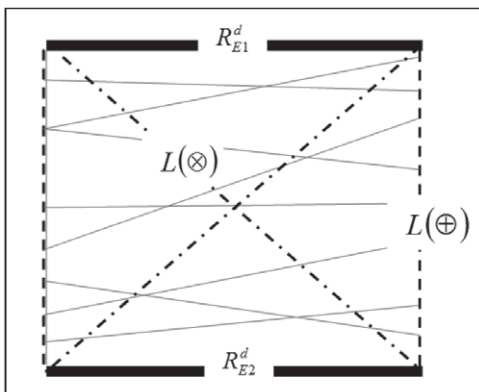


Рис. 3. Схема акватории с «запрещенными» границами

### Анизотропное множество маршрутов

Рассмотрим часть акватории (рис. 3), ограниченную прямоугольником площадью  $S$  с периметром  $L(S)$ .

Будем считать, что на акватории нет локальных поднятий дна. Маршруты принадлежат множеству прямых линий, которые одновременно пересекают правую и левую вертикальные рамки района в любой их точке. При этом ни один из них не может пересекать ни верхнюю горизонтальную рамку, ни нижнюю. Каждая из горизонтальных рамок, по аналогии с (1), может трактоваться как некоторый опасный объект, поэтому для их описания используем запись

$$R_{Ei}^d = R_{Ei} \left[ x, y, z < z_{np}(d) \right], \quad (14)$$

где нижний индекс «E» обозначает границу запретной области; индекс «i» — номер рамки, которую запрещено пересекать.

Замена объекта вида (1) на объект (14) позволяет задачу вычисления показателя «стесненности» акватории для анизотропного множества маршрутов свести к задаче вычисления показателя «стесненности» для изотропного множества маршрутов, рассмотренную ранее.

Полное множество маршрутов  $G$ , пересекающих выделенную часть акватории, делится на четыре группы:

- $G \cap R_{E1}^d \neq 0$  — маршруты, пересекающие рамку  $R_{E1}^d$ ;
- $G \cap R_{E2}^d \neq 0$  — маршруты, пересекающие рамку  $R_{E2}^d$ ;
- $G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) \neq 0$  — маршруты, одновременно пересекающие обе горизонтальные рамки;
- $G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) = 0$  — маршруты, проходящие между рамками  $R_{E1}^d$  и  $R_{E2}^d$ .

Из перечисленных групп маршрутов четвертая группа характеризует безопасное плавание, тогда как первые три определяют степень стесненности акватории. Вероятности каждой из перечисленных четырех групп рассчитываются по формулам:

$$P(G \cap R_{E1}^d \neq 0) = \frac{L(\oplus) - L(\otimes) + L(R_{E1}^d)}{L(\oplus)}, \quad (15)$$

$$P(G \cap R_{E2}^d \neq 0) = \frac{L(\oplus) - L(\otimes) + L(R_{E2}^d)}{L(\oplus)}, \quad (16)$$

$$P(G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) \neq 0) = \frac{L(\otimes) - L(\oplus)}{L(\oplus)}, \quad (17)$$

$$P(G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) = 0) = \frac{L(\otimes) - L(R_{E1}^d) - L(R_{E2}^d)}{L(\oplus)}. \quad (18)$$

В формулах (15), (16) и (18) слагаемые  $L(R_{E1}^d)$  и  $L(R_{E2}^d)$ , представляющие собой периметры отрезков прямых линий, равны удвоенной длине каждого из отрезков.

Исходя из того, что события, связанные с пересечением маршрутами всех четырех границ выделенного района, составляют полную группу

$$P(G \cap R_{E1}^d \neq 0) + P(G \cap R_{E2}^d \neq 0) + P(G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) \neq 0) + P(G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) = 0) = 1, \quad (19)$$

показатель «стесненности» акватории примет вид

$$M_{CA}^2 = 1 - P(G \cap (R_{E1}^d, R_{E2}^d) = 0). \quad (20)$$

С учетом выражения (18) получим расчетную формулу для показателя акватории, стесненной двумя границами:

$$M_{CA}^2 = 1 - \frac{L(\otimes) - L(R_{E1}^d) - L(R_{E2}^d)}{L(\oplus)}. \quad (21)$$

Анализ формулы (21) показывает, что при анизотропном выборе маршрутов показатель «стесненности» акватории зависит не только от соотношения размеров акватории и опасностей, но и от их взаимного расположения.

Показатель «стесненности» акватории при прочих равных условиях всегда имеет большее численное значение для районов, где выделено приоритетное направление движения судов, по сравнению с районами, где приоритетное направление движения не установлено.

### Выводы

1. Количественный показатель «стесненности» акватории может использоваться в ФОб полярного судоходства.
2. Использование теории геометрических вероятностей позволяет получить количественный показатель «стесненности» акватории, имеющий очевидное геометрическое толкование событий, приводящих к столкновению с опасностями.
3. Алгоритм расчёта показателей «стесненности» акватории достаточно прост в реализации, так как основан на измерениях длин линий на навигационных морских картах и вычислении их отношений. Алгоритм характеризуется достаточной простотой.
4. «Стесненность» акватории, по-видимому, должна оцениваться некоторым набором количественных показателей, так как зависит от основных размерений судов, установленных направлений их движения, границ акватории и других факторов. Вопрос о структуре таких показателей нуждается в дополнительном обосновании.
5. Использованный в настоящей работе подход к оценке «стесненности» акватории может быть распространен на динамические объекты, влияющие на риск навигационных происшествий в арктических морях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полярный Кодекс. ИМО. Резолюции MSC/385(94), MEPC.264 (68). Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). — СПб.: ЦНИИМФ, 2016. — 232 с.
2. IMO Maritime Safety Committee: 'Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment' («Временное Руководство по применению формальной оценки безопасности»), MSC Circular 829. — London, 1997.
3. Проблемы Северного морского пути / под ред. А. Г. Гранберга, В. И. Пересыпкина. — М.: Наука, 2006. — 580 с.
4. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovu-dok.html> (дата обращения: 15.04.2016).
5. Куватов В. И. Потенциал Северного морского пути арктической зоны России. Факторы и стратегия развития / В. И. Куватов, Д. В. Козьмовский, Н. В. Шаталова // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 6 (25). — С. 20.
6. 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.
7. Давыденко А. А. Северный морской путь — комплексный инфраструктурный проект / А. А. Давыденко // Транспортное дело России. — 2010. — № 3. — С. 3–4.
8. Горшков А. Г. Экономические вопросы развития Северного морского пути / А. Г. Горшков // Морские информационно-управляющие системы. — 2014. — № 1 (4). — С. 4–15.
9. Zhao H. Study on Economic Evaluation of Northern Sea Route: Taking Voyage of Yong Sheng as an Example / H. Zhao, H. Hu // Transportation Research Board 95th Annual Meeting. — 2016. — № 16-6420.
10. Збаращенко В. С. Арктическая контейнерная линия Мурманск – Петропавловск – Мурманск / В. С. Збаращенко // Материалы Второй междунар. конф. «Транспорт и логистика в Арктике-2016». — 2016. — С. 61–67.
11. Некрасов С. Н. Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 98–100.
12. Пламмер К. Дж. Маневрирование судов в узкостях: пер. с англ. / К. Дж. Пламмер. — Л.: Судостроение, 1986. — 80 с.
13. Решетняк С. В. Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.
14. ФГУП «Гидрографическое предприятие»: официальный сайт. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 26.07.2016).

15. Баталин Г. А. Навигационно-гидрографическое обеспечение мореплавания в арктическом регионе / Г. А. Баталин, С. В. Решетняк // Морской флот. — 2008. — № 3. — С. 34–38.
16. Сантало Л. Интегральная геометрия и геометрические вероятности: пер. с англ. / Л. Сантало. — М.: Наука, 1983. — 358 с.
17. Амельченко С. Г. Применение вероятностных методов в оценке свойств подводного рельефа / С. Г. Амельченко, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 4. — С. 30–31.
18. Решетняк С. В. Ранжирование трасс Севморпути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3. — С. 55–57.
19. Лутков С. А. Оценка вероятного пропуска опасной глубины по данным навигационных карт арктических морей / С. А. Лутков, С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Навигация и гидрография. — 2013. — № 36. — С. 69–78.
20. Решетняк С. В. Формализованное представление условий, приводящих к авариям судов / С. В. Решетняк, С. Г. Амельченко // Геодезия и картография. — 2007. — № 12. — С. 36–42.
21. Федотов Н. Г. Триpletные признаки распознавания сложноструктурированных, семантически насыщенных изображений / Н. Г. Федотов, А. С. Кольчугин, О. А. Смолькин, С. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2007. — № 1. — С. 43–53.
22. Федотов Н. Г. Анализ свойств признаков распознавания, основанных на стохастической геометрии, при различных вариантах сканирования изображений / Н. Г. Федотов, А. В. Моисеев, Л. А. Шульга, А. С. Кольчугин // Математические методы распознавания образов: сб. докладов XII Всероссийской конф., ноябрь 2005 г. — М.: МАКС Пресс, 2005. — С. 472–475.

## QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CONSTRAINT OF THE NORTHERN SEA ROUTE

*Article is devoted to a problem of development of quantitative indices and techniques of the formalized safety assessment (FSA) of the water area of the Northern Sea Route (NSR) which principles are formulated in documents of the International Maritime Organization and the Polar code. Features of polar navigation are considered and the main sources of risk of navigation incidents in the Arctic seas are determined. Analysis results of evaluation methods of risk of the navigation incidents based on use of world and regional statistics of sea incidents are given. The representativeness of statistics of navigation incidents relating to the seas of the Arctic basin is estimated. The interrelation between the frequency of navigation incidents and “constraint” of the water area is established. It is offered to use the term “constraint” of the water area which is usually used in relation to navigation of vessels in the uzkostyakh and on shoal as the generalized characteristic of all water area of SMP and its separate parts. For determination of degree of “constraint” of the water area it is offered to use, based on the theory of geometrical probabilities. Examples of effective use of the theory of geometrical probabilities in case of the solution of practical tasks of hydrography and decoding of images are given. Affirms that use of the theory of geometrical probabilities allows reducing a task of a quantitative assessment of “constraint” of the water area to a task about crossing of straight lines with curves on the plane. As a quantitative measure of “constraint” of the water area the author has suggested to use probability of crossing of routes of the vessel with navigational hazards. The basic formulas and ratios allowing to calculate required probability analytically for two options of the direction of the ship flows including an isotropic set of routes and anisotropic are given in work. In the conclusion of article overall assessment of the offered method is given and the directions of its enhancement are determined.*

*Keywords: “constraint” of the water area, quantitative assessment, geometrical probability, navigational hazard*

### REFERENCES

1. International code for ships operating in polar waters (Polar code). SPb.: AO «CNIIMF», 2016.
2. IMO Maritime Safety Committee: ‘Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment’, MSC Circular 829. London, 1997.
3. *Problemy Severnogo morskogo puti*. Edited by A. G. Granberg, V. I. Peresyepkin. M.: Nauka, 2006.



4. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Utverzhden Prezidentom RF 18 sentjabrja 2008 goda.
5. Kuvatov, Valery Il'ich, Dmitry Vasil'evich Kozmovsky, and Natalya Viktorovna Shatalova. "The potential of the Northern Sea Route in the Arctic zone of Russia. Factors and strategy development." *On-line journal "Naukovedenie"* 6(25) (2014): 20.
6. 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." *Arktika: jekologija i jekonomika* 4(16) (2014): 108–114.
7. Davydenko, A. A. "Severnij morskoy put — kompleksnyj infrastrukturnyj proekt." *Transportnoe delo Rossii* 3 (2010): 3–4.
8. Gorshkov, A. G. "Jekonomicheskie voprosy razvitija Severnogo morskogo puti." *Morskie informacionno-upravljajushhie sistemy* 1(4) (2014): 4–15.
9. Zhao, Hui, and Hao Hu. "Study on Economic Evaluation of Northern Sea Route: Taking Voyage of Yong Sheng as an Example." *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*. No. 16-6420. 2016.
10. Zbarashhenko, V. S. "Arkticheskaja kontejnernaja linija Murmansk – Petropavlovsk – Murmansk." *Vtoraja mezhdunarodnaja konferencija «Transport i logistika v Arktike - 2016»*. M., 2016: 61–67.
11. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. "Assessment and prediction of dangerous navigational situations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 2 (2013): 98–100.
12. Plammer, K. Dzh. *Manevrirovanie sudov v uzkostjah*. Trans. L.: Sudostroenie, 1986.
13. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic seas underwater relief of Russia." *Geodesy and Cartography* 4 (2006): 57–60.
14. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatje». Web. 26 July 2016 <<http://www.hydro-state.ru/>>.
15. Batalin, G., and S. Reshetnyak. "The navigational and hydrographic support for shipping in the Arctic region." *Marine Fleet* 3 (2008): 34–38.
16. Santalo, L. *Integralnaja geometrija i geometricheskie verojatnosti*. Trans. M.: Nauka, 1983.
17. Amelchenko, S. G., and A. L. Tezikov. "Application of probabilistic methods in evaluation of the qualities of the underwater relief." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2007): 30–31.
18. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of north sea-route on the criterion of hydrographical support." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 55–57.
19. Lutkov, S. A., S. V. Reshetnyak, and A. L. Tesikov. "Evaluation of Probable Missing the Dangerous Depth, Using the Navigation Charts Data of the Arctic Seas." *Navigation and Hydrography* 36 (2013): 69–78.
20. Reshetnyak, S. V., and S. G. Amelchenko. "Formalized conception of conditions, causing the shipwrecks." *Geodesy and Cartography* 12 (2007): 36–42.
21. Fedotov, N. G., A. S. Kolchugin, O. A. Smolkin, and S. V. Romanov. "Triplet matching characteristics of complex structured semantically saturated images." *University proceedings. Volga region. Technical sciences* 1 (2007): 43–53.
22. Fedotov, N. G., A. V. Moiseev, L. A. Shulga, and A. S. Kolchugin. "Analiz svojstv priznakov raspoznavanija, osnovannyh na stohasticheskoj geometrii, pri razlichnyh variantah skanirovanija izobrazhenij." *Matematicheskie metody raspoznavanija obrazov: sbornik dokladov XII Vserossijskoj kon-ferencii, nojabr' 2005 g.* M.: MAKS Press, 2005: 472–475.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Виталий Владимирович  
 Минтранс России  
[klyuevvv@mintrans.ru](mailto:klyuevvv@mintrans.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kljuev Vitaly Vladimirovich  
 The Ministry of Transport of the Russian Federation  
[klyuevvv@mintrans.ru](mailto:klyuevvv@mintrans.ru)

Статья поступила в редакцию 8 августа 2016 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАВОДКОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Целью исследования в данной статье является корректировка нормативной документации, связанной с назначением запаса отметки гребня бетонных плотин относительно форсированного подпорного уровня. В современном своде правил (СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные») запасы назначаются только исходя из класса гидротехнического сооружения. Основной идеей статьи является дифференцирование запасов отметки гребня плотин не только по классу, но и по паводкам, аккумуляция и пропуск которых возможны на этих гидроузлах. Для обоснования этой идеи в статье анализируются наиболее крупные паводки последних лет, прошедших на территории Российской Федерации: это — наводнение на р. Зея в 2007 г., наводнение на р. Амур в 2013 г., наводнение 2014 г. в бассейне Верхней Оби. Приводится анализ запасов гидроузлов согласно современной нормативной документации. Для понимания истории возникновения этих запасов рассматриваются также устаревшие редакции норм и правил проектирования бетонных и железобетонных плотин. Рассмотрены гидрографы рек территории бывшего Советского Союза. Анализируется показатель отношения площади водохранилища к его объёму. Предлагается, кроме запасов отметки гребня по классу, ввести дополнительную дифференцированную систему запасов отметки гребня плотины, основанную на отношении площади водохранилища к его объёму. Делается вывод о возможности применения такой системы в новой редакции строительных норм и правил, а также о необходимости обсуждения этого вопроса другими специалистами в области гидротехнического строительства.

Ключевые слова: паводок, водохранилище, нормативная документация, запасы гребня плотины.

### Введение

Наводнение является одним из наиболее опасных стихийных явлений, характеризующихся повторяемостью той или иной обеспеченности. Широкое затопление территории может привести как к большому материальному ущербу, так и к человеческим жертвам. Среди множества причин возникновения этого катастрофического явления стоит выделить последствия паводка.

В последнее время наблюдается тренд увеличения количества сверхрасчётных паводков. При этом важны возможности гидроузлов как в аккумуляции паводкового стока, так и в его пропуске. Одним из путей решения проблемы пропуска паводка является строительство аварийного берегового водосброса, способного обеспечить высокую пропускную способность и безопасный режим наполнения водохранилища. Из существующих сейчас подобных сооружений в нашей стране можно назвать береговой водосброс Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 1) [1].



Рис. 1. Вид на Саяно-Шушенскую ГЭС и береговой водосброс с нижнего бьефа

Конструктивно паводковый водосброс Саяно-Шушенской ГЭС состоит из водоприёмного сооружения, двух безнапорных тоннелей, пятиступенчатого перепада и отводящего канала. Водоприёмное сооружение предназначено для забора воды в водосброс и включает в себя водослив практического профиля с отметкой порога 524,0 м и забральную стенку. Максимальная пропускная способность берегового водосброса составляет 4000 м<sup>3</sup>/с.

Для пропуска сверхрасчётных паводков широкое применение в Европе получила система затворов Hydroplus [2], расположенных на гребне сооружения или в сухом канале. Система выполнена в виде поворотных затворов (рис. 2). Во время заполнения водохранилища до уровней ниже критических, затвор находится в устойчивом положении (см. рис. 2, *Поз. 1*), удерживая своей массой лёгкие колебания уровней. При нерасчётных паводках, начинает расти уровень воды, постепенно достигая верха затвора, где находится входное отверстие. Как только вода попадает в отверстие, увеличивается взвешивающее давление (*Поз. 2*), а горизонтальная составляющая гидростатического давления начинает переворачивать затвор (*Поз. 3*), тем самым позволяя пропустить через него паводковый расход.

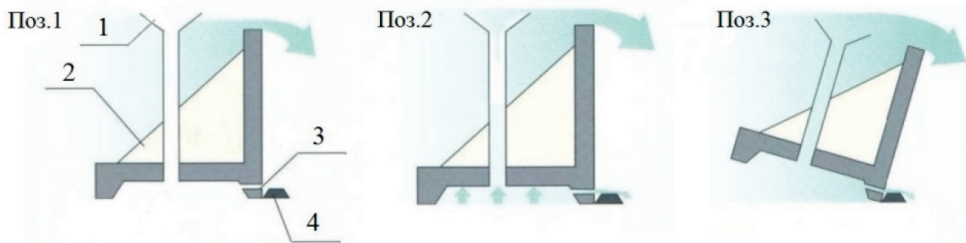


Рис. 2. Принцип работы системы Hydroplus Fusegate:  
 1 — входное отверстие; 2 — балласт; 3 — дренаж; 4 — опорная балка

Существует множество других систем для пропуска экстремального паводкового расхода: системы, содержащие напорные трубопроводы, системы, использующие схемы поверхностного размыва участка плотины для контролируемого прорана [3], [4]. Но, кроме этого, более рациональным для гидроузлов была бы возможность также аккумулировать паводок. Этому может способствовать создание в бассейнах рек системы порогов и временных водохранилищ (рис. 3) [5]. На реках формируются каменные пороги, позволяющие создавать временные водохранилища для аккумуляции паводка. Конструкция порога позволяет задерживать паводковый расход, а в межпаводковый сезон пропускать меженный расход воды. Удержание временными водохранилищами части паводкового расхода поможет основному гидроузлу принять именно тот объём паводка, который тот способен удержать.

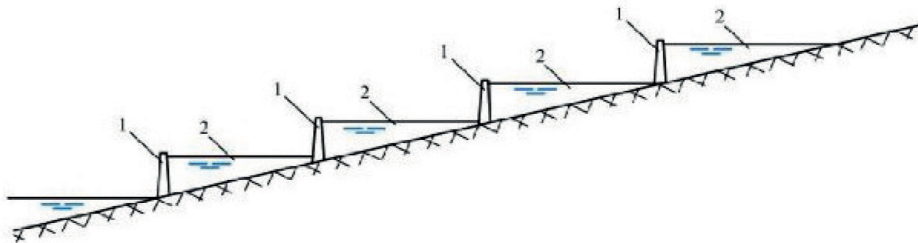


Рис. 3. Схема разбивки русла на пороги: 1 — пороги; 2 — временные водохранилища

Однако эти и другие технические решения нужно применять вместе с пересмотром нормативной литературы. Рост количества выдающихся паводков приводит к тому, что гидроузлам проблематично удержать сверхрасчётные расходы. Эти самые паводки не учитываются в своде правил по проектированию бетонных и железобетонных плотин. Запасы назначаются только по классу сооружения. Задачей данной статьи является анализ влияния сверхрасчётных паводков на

гидроузлы, а также предложение по изменению запасов плотин водохранилищ. Для того чтобы проанализировать влияние паводков, рассмотрим наводнения последних лет.

### Основная часть

Одно из крупнейших паводковых наводнений произошло в 2007 г. на р. Зея [6], [7]. Летом 2007 г. прошёл паводок, близкий к 1 % обеспеченности. В соответствии с Правилами использования водных ресурсов (ПИВР), режим наполнения Зейского водохранилища строго регламентирован. К началу половодья водохранилище срабатывается до уровня сработки 310,0 м. Далее происходит наполнение водохранилища до отметки нормального подпорного уровня (НПУ) — 315,0 м. Наполнение осуществляется при расходах воды гидроэлектростанцией от 640 до 1300 м<sup>3</sup>/с. Наполнение водохранилища выше отметки НПУ происходит при расходах 1300 м<sup>3</sup>/с.

По мнению некоторых специалистов, процессы переформирования и деформации русла в нижнем бьефе привели к уменьшению пропускной способности нижнего бьефа, а низкая энергозагруженность привела к расходам через ГЭС ниже рекомендуемых. Это не позволило эксплуатировать гидроузел в соответствии с правилами, и, как следствие, вызвало проблемы со сработкой водохранилища к половодью до уровня 310,0 м. Летом 2007 г. фактический приток оказался выше расчётного (рис. 4, табл. 1).

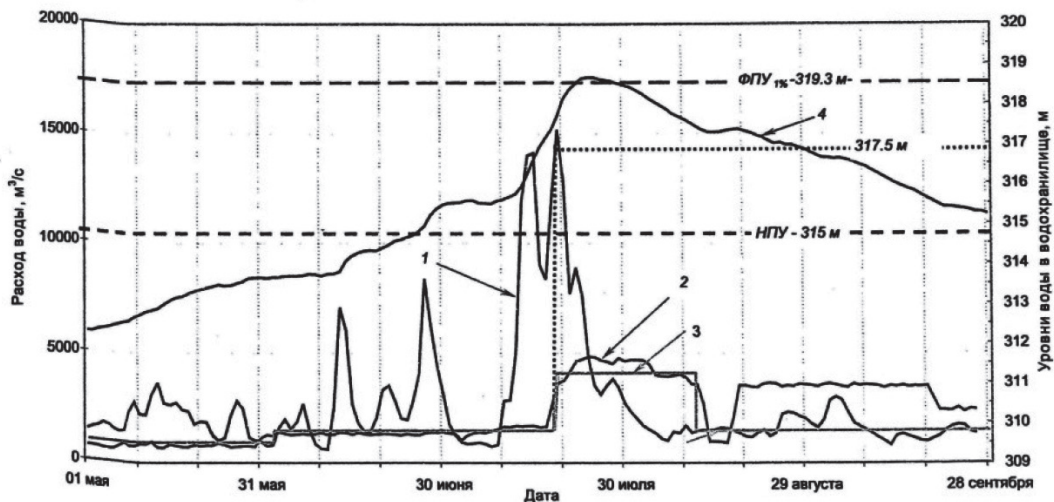


Рис. 4. Графики притока (1), сбросов воды (2 — фактические; 3 — по ПИВР) и уровней воды (4) в 2007 г.

Таблица 1

#### Прогнозируемые и фактические расходы притока на р. Зея в 2007 г.

Период	Норма, м <sup>3</sup> /с	Прогнозируемый расход, м <sup>3</sup> /с	Фактический расход, м <sup>3</sup> /с
Май, июнь	1138	1100–1300	1671
Июль	1670	1900	5490
Июль – сентябрь	1713	1500–2000	7800

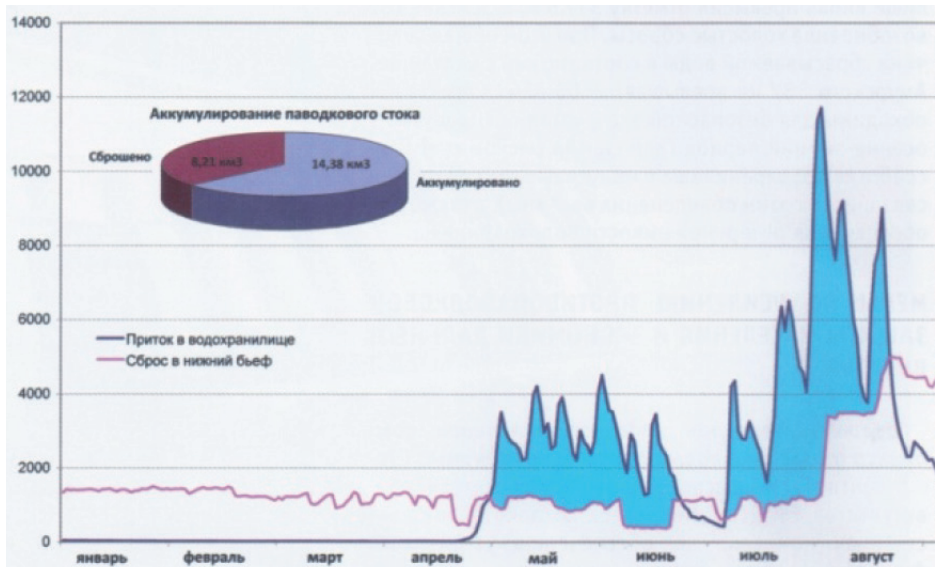
Паводок на р. Зея поставил под угрозу затопления более 15 населённых пунктов, общая численность жителей которых составляла 36 тыс. чел. Были подтоплены населённые пункты: Овсянка, Заречная слобода, Александровка, Алексеевка, Зея. Под угрозой затопления оказались сёла: Бомнак, Умлекан, Рублёвка, Берёзовка и др. Только в первые дни бедствия из опасной зоны было эвакуировано свыше 400 чел. Отсутствие в течение более 35 лет крупных наводнений создало иллюзию паводковой безопасности на р. Зее, а отклонения от правил использования водных ресурсов привели к необоснованно поднятым во время прохождения паводка сбросным расходам



до 3000 м<sup>3</sup>/с. В итоге Зейский гидроузел задержал паводок, но при соблюдении правил наполнения и сброски водохранилища масштабы затопления нижнего бьефа могли быть много меньше.

Рассмотрим наводнение на Амуре 2013 г. [8] – [10]. В 2013 г. Амурская область, Хабаровский край и Еврейская автономная область стали зоной интенсивных осадков. Согласно данным Росгидромета, начиная с июля, в Амурской области выпало осадков выше годовой нормы, а в других областях — 3,0 – 3,5 месячных нормы. Эти осадки вызвали заметный приток в водохранилища р. Зеи и р. Буреи. Был побит исторический рекорд — последний раз такой крупный паводок был зарегистрирован более 120 лет назад. Анализ гидрологической ситуации показал, что с июля по август в Зейском водохранилище прошли две волны паводка. Первая волна достигла своего пика 1 августа с расходом 11700 м<sup>3</sup>/с. В середине августа приточность сократилась до 3750 м<sup>3</sup>/с, а концу месяца снова поднялась до 9000 м<sup>3</sup>/с. Приток воды в Бурейское водохранилище также оказался крайне высоким, приточность в пике составила 9000 м<sup>3</sup>/с. Во время наводнения было подтоплено 126 населённых пунктов и 15 муниципальных образований в Амурской области, 77 населённых пунктов и 9 муниципальных образований в Хабаровском крае. Всего было затоплено более 8 млн км<sup>2</sup> территории, подтоплены около 13,5 тыс. жилых домов. Зейский и Бурейский гидроузлы смогли задержать значительную часть паводка (рис. 5): Зейское водохранилище приняло 14,2 км<sup>3</sup> из 22,7 км<sup>3</sup>, Бурейское водохранилище удержало 4,9 км<sup>3</sup> из притока 8,01 км<sup>3</sup>.

а)



б)

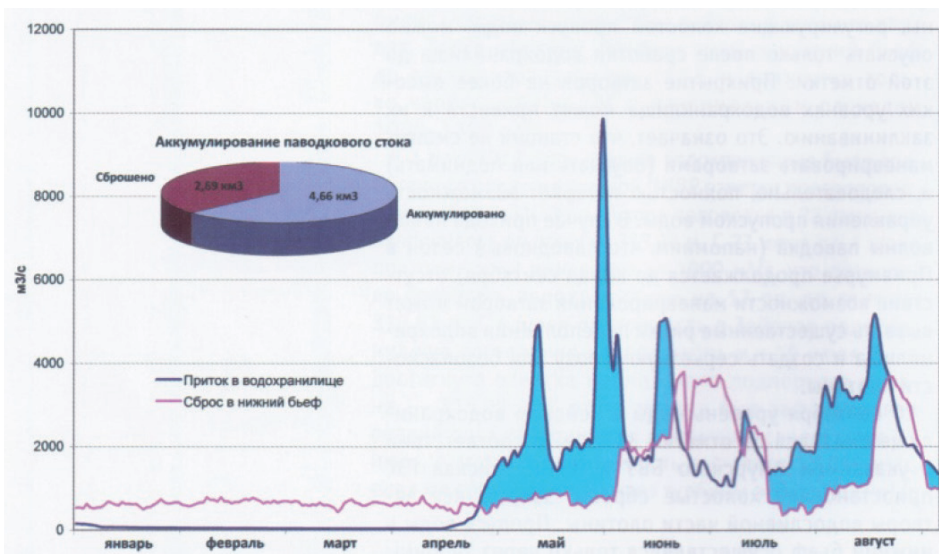


Рис. 5. Режимы работы Зейской (а) и Бурейской ГЭС (б) во время паводка 2013 г.

Причинами наводнения стали, в первую очередь, аномальные осадки, выпавшие в верховьях р. Зеи и р. Буреи. Но общий сток этих двух рек составляет 15 % от общего стока р. Амур, поэтому, несмотря на значительную паводковую аккумуляцию, на большую часть наводнения гидроузлы влияния не оказали. К причинам столь катастрофического наводнения относится также высокая насыщенность почвогрунтов водой. Снежная зима и поздняя весна привели к насыщению почво-грунтов и снижению их впитывающей способности. Недостаток ежедневных данных о расходах и малая продолжительность рядов наблюдений за стоком снизили достоверность оценки повторяемости максимального стока.

Рассмотрим наводнение 2014 г. в бассейне Верхней Оби [11]. В связи с аномальными осадками в предгорьях Алтая с мая по июнь 2014 г., в Алтайском крае произошло крупное наводнение. Сформированный осадками дождевой паводок прошёл по бассейну Верхней Оби. Несмотря на то, что река Обь является равнинной рекой, её гидрологический режим формируется, в основном, в горах. Первая волна половодья обусловлена таянием снегов на равнинной части водосбора, и значительный приток формируется благодаря притокам. Вторая волна половодья формируется при таянии горных снегов и ледников и проходит преимущественно в июне, июле. Прогноз гидрологического режима является основой для подготовки вероятных сценариев затопления. В зимние месяцы 2013 – 2014 гг. наблюдалось незначительное выпадение снега, в предгорьях Алтая также выпало не более 70 % нормы осадков. Поэтому первая волна половодья прошла мягко и незаметно, это стало причиной прогнозов и о мягком прохождении второй волны. Наступил дождевой паводок с осадками выше нормы в два-три раза, но, несмотря на это крупных разрушений и затоплений, подобных дальневосточным, не произошло.

Анализируя эти наводнения можно подытожить основные причины осложненного пропуска паводков:

- 1) несоблюдение правил использования водных ресурсов при наполнении водохранилища, приводящее к уменьшению паводковых запасов водохранилища;
- 2) сложное прогнозирование аномальных паводков. На рис. 6 представлены кривые, показывающие вероятность того, что максимальный расход заданной повторяемости будет зарегистрирован на гидротехническом сооружении в течение срока эксплуатации хотя бы один раз. Графики показывают, что, даже имея большой объём статистических данных, долгосрочное прогнозирование проблематично и неточно;
- 3) малое количество пунктов краткосрочного прогнозирования притока на водохранилищах.

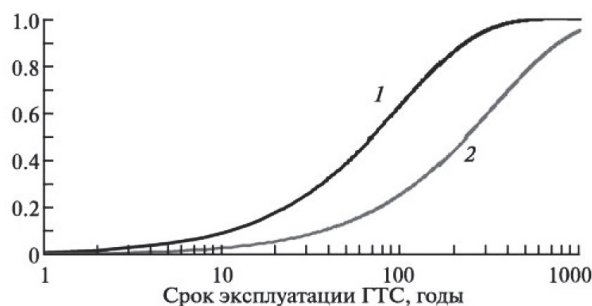


Рис. 6. Вероятность регистрации расчётного расхода во время эксплуатации ГТС:  
1 — кривая лог-распределение Пирсона III типа; 2 — кривая Крицкого-Менкеля

Проанализируем описанные паводки с точки зрения назначения запасов гребня плотины. Рассмотрим нормативную документацию, регламентирующую запасы гребня бетонных плотин. Согласно СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные» [12], отметка гребня плотины определяется по формуле

$$\text{Отм. гр.} = \text{ФПУ} + a, \quad (1)$$

где  $a$  — запас по гребню, зависящий от класса гидротехнического сооружения: для плотин I класса — 0,8 м; для II класса — 0,7 м; для III и IV классов — 0,4 м.

Таким образом, отметка гребня плотины гидроузла зависит только от класса сооружения и форсированного уровня воды. Но отметка форсированного уровня рассчитывается по кривой обеспеченности расхода, которая не замкнута по своей ординате (рис. 7).

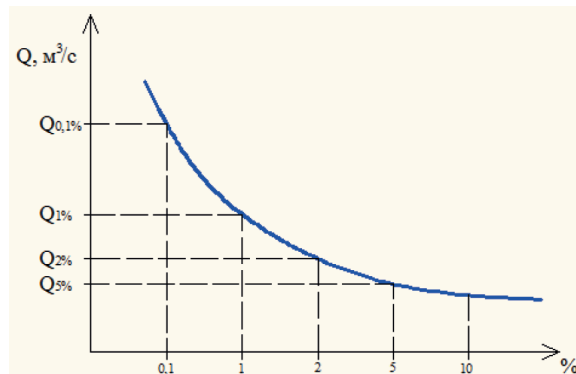


Рис. 7. Элемент кривой обеспеченности расхода

Этот незамкнутый участок кривой обеспеченности показывает, что каким бы обширным ни был объём статистических данных по режиму стока реки, невозможно предугадать максимально возможный паводок.

Для понимания возникновения запасов гребня плотины проанализируем прошлые издания строительных норм и правил (СНиП), содержащих рекомендации по назначению запасов отметки гребня. Рассмотрим СНиП 2.06.06-85 «Плотины бетонные и железобетонные» [13]. Согласно данному нормативному документу, превышение гребня рекомендуется назначать по схеме аналогичной описанной в СНиП 2.06.05-84 «Плотины из грунтовых материалов» [14]. Рекомендованная величина запаса возвышения гребня плотины «а», составляет: для плотин I класса 0,8 м; для II класса — 0,6 м; для III и IV классов — 0,4 м. Согласно СНиП 2.06.05-84 «Плотины из грунтовых материалов», отметку гребня плотины следует назначать на основе расчета возвышения его над расчетным уровнем воды. Возвышение гребня плотины надлежит определять для двух случаев стояния уровня воды в верхнем бьефе:

- а) при нормальном подпорном уровне (НПУ) или при более высоком уровне, соответствующем пропуску максимального паводка, входящего в основное сочетание нагрузок и воздействий;
- б) при форсированном подпорном уровне (ФПУ), при пропуске максимального паводка, относимого к особым сочетаниям нагрузок и воздействий.

Возвышение гребня плотины  $h_s$ , в обоих случаях определяется по формуле

$$h_s = \Delta h_{set} + h_{run} 1 \% + a, \quad (2)$$

где  $\Delta h_{set}$  — ветровой нагон воды в верхнем бьефе;  $h_{run} 1 \%$  — высота наката ветровых волн обеспеченностью 1 %;  $a$  — запас возвышения гребня плотины.

Аналогичный алгоритм определения превышения отметки гребня рекомендован и в более ранней версии: СНиП II-2054-77 «Плотины бетонные и железобетонные» [15] отсылает к СНиП II-53-73 «Плотины из грунтовых материалов» [16]. Это связано с тем, что первые строительные нормы и правила предусматривали единые запасы, этого было достаточно, так как изначально гидроузлы создавались на равнинных реках, чьи берега и колебания расхода вне половодья колебались с малой амплитудой. Это привело к возникновению запаса на нагон волны. Однако эти запасы оказались недостаточными, когда началось строительство ГЭС в узких каньонах: Зейский, Бурейский, Саяно-Шушенский гидроузлы. Колебания уровней при заполнении и сработке водохранилища достигают десятков метров.

В современном СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные» отсутствует запас по ветровому нагону, предписанный ранее, это связано с малым нагоном волны при больших глубинах водохранилища, а превышение гребня назначается, как и в предшествующих нормативных

документах, только исходя из класса сооружений и отметки форсированного подпорного уровня. Как уже было сказано, графики вероятности регистрации расчётного расхода во время эксплуатации ГТС (см. рис. 6) показывают неточность долгосрочного прогнозирования уровней. А кривая обеспеченности расхода также опирается только на статистический объём данных и не может отобразить максимальные паводки. Следовательно, рассчитываемый по данной кривой форсированный уровень не может быть единственным расчётным параметром для отметки гребня гидроузла.

Рассмотрим два водохранилища с одинаковыми отметками, относящихся к одному классу капитальности, но с разными кривыми ёмкости водохранилища (рис. 8).

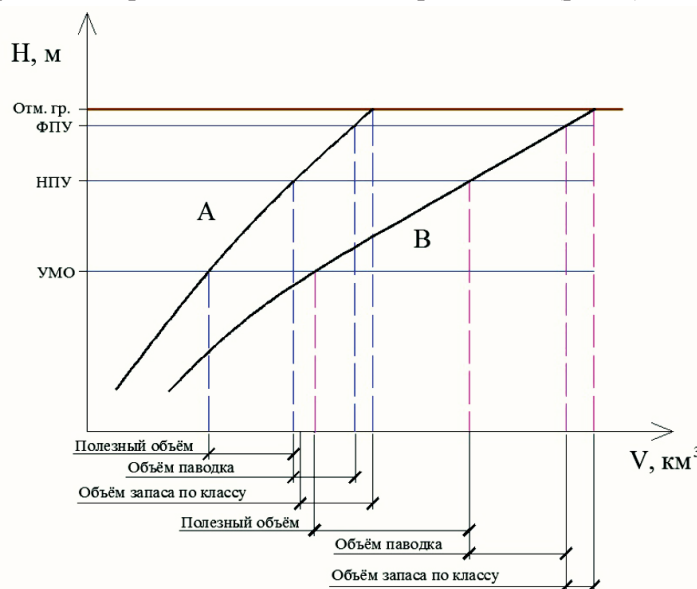


Рис. 8. Сравнение запасов водохранилищ одного класса

При одинаковых уровнях воды водохранилища А и В имеют различные полезные ёмкости, различные объёмы паводкового запаса и разные объёмы воды между ФПУ и отметкой гребня, несмотря на один и тот же запас по классу. Кривая ёмкости типа А соответствует водохранилищу в узком каньоне, какими являются, например, водохранилища Зеи, Буреи. Кривая ёмкости типа В соответствует водохранилищу с широкой площадью зеркала. Для водохранилищ типа А более опасен нерасчётный паводок, потому что их объём до гребня много меньше, чем у типа В.

Не менее важен также и тип гидрографа реки (рис. 9) [17]. Так, например, наиболее опасными, с точки зрения паводка, являются гидрографы Дальневосточного и Тянь-Шаньского типов. Поэтому для паводковой безопасности гидроузлов возможно добавить запас по паводку, который будет зависеть от типа водохранилища и типа гидрографа реки.

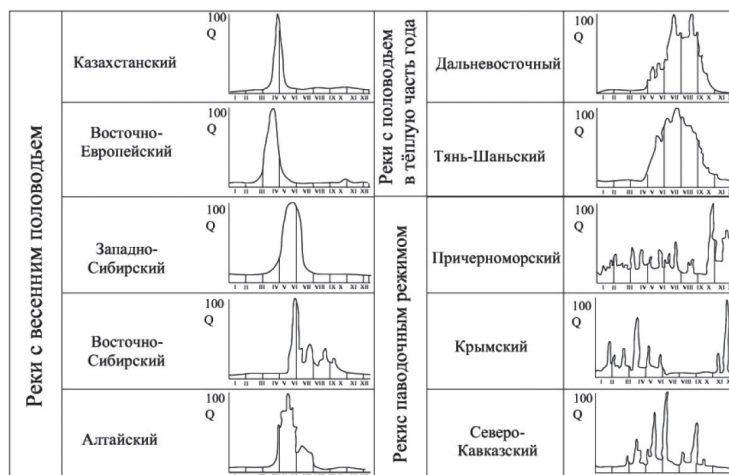


Рис. 9. Типы гидрографов рек постсоветского пространства



Рассмотрим данные некоторых водохранилищ разных районов Российской Федерации. Как показано на рис. 8, увеличение объёма водохранилища при одном и том же превышении уровня зависит от типа водохранилища, а, следовательно, от его площади, поэтому рассмотрим полезный объём водохранилища (полезным является объём водохранилища между уровнем мёртвого объёма и нормальным подпорным уровнем). Также рассмотрим площадь водохранилища при нормальном подпорном уровне. Возьмём за коэффициент  $K_1$  отношение площади зеркала водохранилища к его объёму

$$K_1 = \frac{S_z}{V_w}, \quad (3)$$

где  $S_z$  — площадь водохранилища при нормальном подпорном уровне, км<sup>2</sup>;  $V_w$  — полезный объём водохранилища, км<sup>3</sup> (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристики некоторых водохранилищ России**

Район	Водохранилище	Объём водохранилища, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала при НПУ, км <sup>2</sup>	$K_1$
		полный	полезный		
Западно-Сибирский район	Новосибирское	8,80	4,40	1070,00	243
	Крапивинское	11,60	6,70	670,00	100
	Беловское	0,06	0,02	14,00	700
Восточно-Сибирский район	Красноярское	73,30	30,40	2000,00	66
	Хантайское	23,52	17,3	1561	90
	Иркутское	47,65	46,45	32966	710
	Братское	169,3	48,2	5470	113
	Усть-Илимское	59,4	2,77	1873	676
	Мамаканское	0,2	0,11	11	100
	Саянское	29,13	14,67	633	43
	Курейское	13,4	10,1	747	74
Дальневосточный район	Вилуйское	35,88	17,83	2170	122
	Зейское	68,42	32,12	2419	75
	Колымское	14,56	6,51	441	68
	Бурейское	22,5	11,5	800	70
Поволжский район	Куйбышевское	58	43,6	6450	148
	Саратовское	12,37	1,75	1831	1046
	Вологоградское	31,45	8,25	3117	378
Северо-Кавказский район	Цимлянское	23,86	11,54	2702	234
	Пролетарское	2,03	0,76	798	1050
	Веселовское	0,89	0,06	246	4100

Наиболее безопасными по паводку являются водохранилища с большим коэффициентом  $K_1$ : Веселовское, Пролетарское (из малых); Саратовское, Куйбышевское, Иркутское, Новосибирское. Условно можно сказать, что при  $K_1 > 100$  водохранилище более паводкобезопасное. Соответственно, водохранилища с  $K_1 < 100$  более опасны с точки зрения паводка — Красноярское, Саянское, Зейское, Бурейское. Это подтверждается последними катастрофическими паводками.

Таким образом, можно предположить, что в нормативную документацию, регламентирующую запасы гребня плотины, нужно внести запасы по типу гидрографа реки и запас, зависящий от коэффициента  $K_1$ .

### Выводы

1. В последнее время наблюдается тренд увеличения количества сверхрасчётных паводков. Наблюдения за паводками на Дальнем Востоке показали, что гидроузлам становится всё труднее справляться с аномальными паводковыми расходами. Долгосрочный прогноз многолетних расходов воды даже при большом объёме данных остаётся неточным. Разные статистические модели дают разные вероятности наблюдения максимального расчётного расхода в течение срока эксплуатации ГТС.

2. Возможно, стоит пересмотреть раздел СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные», посвящённый назначению запасов гребня плотины. На сегодняшний момент, как и предыдущих редакциях, запас гребня назначается от отметки форсированного уровня воды и запаса по классу сооружения. Многолетние прогнозы расходов остаются неточными, поэтому оставлять в качестве единственного расчётного параметра форсированный подпорный уровень небезопасно.

Запасы по классу сооружения не учитывают вид водохранилища, и гидрограф реки. Уровненный режим реки с весенним половодьем, реки с половодьем в тёплое время года, а также реки с паводочным режимом имеет различную паводковую опасность. Анализ отношения площади водохранилища к его полезному объёму показал, что водохранилища с отношением показателей более 100 менее паводкоопасны, а водохранилища с данным отношением менее 100 являются более опасными по паводку.

3. Предлагается дифференцировать запасы отметки гребня бетонных плотин, учитывая не только класс сооружения, но также тип гидрографа реки, и коэффициент  $K_1$ .

4. Вопрос возможной корректировки СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные» требует также обсуждения среди специалистов в области гидротехнического строительства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефименко А. И.* Водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС / А. И. Ефименко, Г. Л. Рубинштейн. — СПб: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2008. — 509 с.
2. *Лунаци М. Э.* Затворы системы «Гидроплюс», как фактор повышения безопасности и экономичности гидроузлов / М. Э. Лунаци, Г. Ф. Онопченко, В. Б. Родионов // Безопасность энергетических сооружений. — 1998. — № 2–3. — С. 89–99.
3. *Колосов М. А.* Разработка конструкции водосброса для судоходных гидроузлов / М. А. Колосов, А. А. Коношенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 71–78.
4. *Коношенков А. А.* Разработка расчётной модели разрушения грунтовой перемычки в аварийном водосбросе / А. А. Коношенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 94–104.
5. *Колосов М. А.* Защита от дождевых паводков посредством устройства русловых порогов / М. А. Колосов, Н. В. Селезнёва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 85–94.
6. *Арсеньев Г. С.* Современные проблемы регулирования экстремальных паводков водохранилищами гидроэлектростанций / Г. С. Арсеньев // Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета. — 2009. — № 10. — С. 13–20.
7. *Лапин Г. Г.* Пропуск паводков 2006 и 2007 гг. через сооружения Зейского гидроузла / Г. Г. Лапин, А. Н. Жиркевич // Гидротехническое строительство. — 2008. — № 10. — С. 1–11.
8. Зейская ГЭС и Бурейская ГЭС в пропуске аномального паводка в Амурской области в 2013 году // Гидротехника. XXI век. — 2013. — № 3. — С. 12–17.

9. Гайдайчук Е. И. Анализ катастрофического наводнения в бассейне реки Амур / Е. И. Гайдайчук, А. М. Слободчиков, М. Н. Шевцов // Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. — 2013. — № 1. — С. 302–305.

10. Данилов-Данильян В. И. Экстраординарное наводнение в бассейне реки Амур / В. И. Данилов-Данильян, А. Н. Гельфан // Вестник Российской академии наук. — 2014. — Т. 84. — № 9. — С. 817. DOI: 10.7868/S0869587314090060.

11. Васильев О. Ф. Экстремальный дождевой паводок 2014 г. в бассейне Верхней Оби: условия формирования, прогнозирование и натурные наблюдения / О. Ф. Васильев, А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, А. В. Дьяченко, А. А. Коломейцев // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всерос. научн. конф. с междунар. участием: в 2 т. (25 – 29 авг. 2014 г., Барнаул). — Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2014. — С. 9–16.

12. СП 40.13330.2012. Плотины бетонные и железобетонные. — М.: ООО «Аналитик», 2012. — 66 с.

13. СНиП 2.06.06-85. Плотины бетонные и железобетонные. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. — 60 с.

14. СНиП 2.06.05-84. Плотины из грунтовых материалов. — М.: АПП ЦИТП, 1991. — 56 с.

15. СНиП 2054-77. Плотины бетонные и железобетонные. — М.: Стройиздат, 1978. — 44 с.

16. СНиП II-53-73. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Стройиздат, 1974. — 30 с.

17. Авакян А. Б. Водохранилища гидроэлектростанций СССР / А. Б. Авакян, В. А. Шарاپов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1977. — 398 с.

## RESEARCH OF FLOOD SAFETY OF RESERVOIRS

*The reason of this research is correcting of the regulatory documents that is connected with the calculation of concrete dam crest level allowance depending on the highest water level. In the present regulatory documents (40.13330.2012 Concrete and reinforced concrete dams) allowance calculations depend on hydraulic structure's grade. The main idea of the article is the differentiation the dam crest levels not only by grades but also by floods that are possible to accumulate and dump on these hydroelectric complexes. To substantiate this idea the article analyzes the largest floods that happened in the Russian Federation in recent years: the flood on r. Zeya in 2007, the flood on r. Amur in 2013, the flood on Upper Ob river-basin in 2014. The analysis of stocks of water-engineering systems is provided according to present regulatory documents. To understand the history of these allowances, outdated versions of regulatory documents and rules of designing concrete and reinforced concrete dams are regarded. Former Soviet Union rivers' hydrographs are observed. The ratio of the reservoir area to its volume is analyzed. It is proposed in addition to dam crest level allowance by it's grade to introduce an additional differentiated system of to dam crest level allowance, depending on the ratio of the reservoir area to its volume. The conclusion is made about the possibility of using such a system in the new edition of building norms and rules, as well as the need to discuss this matter with the other experts of hydraulic engineering.*

*Keywords: flood, reservoir, regulatory documents, dam crest level allowance.*

## REFERENCES

1. Efimenko, A. I., and G. L. Rubinshtejn. *Vodosbrosnye sooruzhenija Sajano-Shushenskoj GJeS*. SPb: «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2008.

2. Lunaci, M. Je., G. F. Onipchenko, and V. B. Rodionov. “Zatvory sistemy «Gidropljus», kak faktor povyshenija bezopasnosti i jekonomichnosti gidrouzlov.” *Bezopasnost jenergeticheskijh sooruzhenij*. M.: OAO «NIIJeS», 1998. № 2–3. 89–99.

3. Kolosov, Mihail Aleksandrovich, and Aleksandr Alekseevich Konoshenkov. “Engineering spillway construction for navigable hydrosystem.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 71–78.

4. Konoshenkov, Aleksandr Alekseevich. “Formulation of calculation model of ground cofferdams destruction in the emergency spillway.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 94–104.

5. Kolosov, Mihail Aleksandrovich, and Natalija Valerevna Selezneva. “Rainfall floods protection by the channel rapid structure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 85–94.

6. Arsenyev, G. S. "Modern problems of the extreme flash floods regulation by the hydropower plant reservoirs." *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University* 10 (2009): 13–20.
7. Lapin, G. G., and A. N. Zhirkevich. "Passage of the 2006 and 2007 spring floods through structures at the Zeya hydroproject." *Power Technology and Engineering* 42.6 (2008): 323–330. DOI: 10.1007/s10749-009-0063-x.
8. "Zejskaja GJeS i Burejskaja GJeS v propuske anomalnogo pавodka v Amurskoj oblasti v 2013 godu." *Gidrotehnika. XXI vek* 3 (2013): 12–17.
9. Gaydaychuk, E. I., A. M. Slobodchikov, and M. N. Schevtsov. "Analysis of major flooding in the Amur river basin." *Dalnij vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* 1 (2013): 302–305.
10. Danilov-Danil'yan, V. I., and A. N. Gel'fan. "On the rostrum of the RAS presidium." *Herald of the Russian Academy of Sciences* 84.5 (2014): 335–343. DOI: 10.1134/S1019331614050013.
11. Vasilev, O. F., A. T. Zinovev, K. B. Koshelev, A. V. Djachenko, and A. A. Kolomejcev. "Jekstremalnyj dozhdevoj pавodok 2014 g. v bassejne Verhnej Obi: uslovija formirovaniya, prognozirovanie i naturnye nabljudeniya." *Vodnye i jekologicheskie problemy Sibiri i Centralnoj Azii. T.I: tr. Vseros. nauchn. konf. s mezhdunarodn. Uchastiem: v 2 t. (25-29 avg. 2014 g., Barnaul.)*. Barnaul: IVJeP SO RAN, 2014: 9–16.
12. Russian Federation. Set of rules. 40.13330.2012. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: ООО «Analitik», 2012.
13. USSR. Sanitary standards and rules. 2.06.06-85. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: CИTP Gosstroja SSSR, 1986.
14. USSR. Sanitary standards and rules. 2.06.05-84. Plotiny iz gruntovyh materialov. M.: APP CИTP, 1991.
15. USSR. Sanitary standards and rules. 2054-77. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: Strojizdat, 1978.
16. USSR. Sanitary standards and rules. II-53-73. Plotiny iz gruntovyh materialov. M.: Strojizdat, 1974.
17. Avakjan, A. B., and V. A. Sharapov. *Vodohranilishha gidrojelektrostantsij SSSR*. 3d ed. M.: Jenergija, 1977.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коношенков Александр Алексеевич — аспирант.  
Научный руководитель:  
Колосов Михаил Александрович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
[a.konoshenkov@yandex.ru](mailto:a.konoshenkov@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konoshenkov Aleksandr Alekseevich — postgraduate.  
Supervisor:  
Kolosov Mihail Aleksandrovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
[a.konoshenkov@yandex.ru](mailto:a.konoshenkov@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 23 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-128-133  
УДК 626

Я. С. Смирнов-Туманов,  
Н. М. Панченко

### РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ

Статья посвящена описанию процесса создания лабораторной установки — прибора Дарси. Данный прибор необходим для того, чтобы получить возможность проведения более детальных исследований в области изучения фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси. Изучение фильтрационных свойств смеси, которая представляет собой не единую субстанцию, а состоит из комбинации двух различных смесей, представляет особый интерес, так как лабораторные испытания по выяснению коэффициента фильтрации такой смеси ранее не проводились. Результаты эксперимента, т. е. вычисление коэффициента фильтрации комбинированной щебеночно-песчаной смеси дает возможность практического их применения при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции



*грунтовых гидротехнических сооружений. Рассмотрены некоторые существующие способы определения коэффициента фильтрации проницаемого грунта. Проанализирована эффективность и возможность применения каждого из существующих способов для определения фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси. Для достижения поставленной цели выбран лабораторный метод определения фильтрационных свойств с помощью прибора Дарси как метод, дающий наиболее точные и достоверные ответы на поставленные вопросы. Изложена история прибора Дарси и приведен линейный закон фильтрации в качестве основной функциональной зависимости, описывающей фильтрационный процесс. Представлена конструкция лабораторной установки, сделано описание конструктивных узлов и элементов, описана технология проведения эксперимента, приведены практические рекомендации по планированию и проведению подобных экспериментов.*

*Ключевые слова: коэффициент фильтрации, пористость, метод Дарси, комбинированная смесь, щебень, песок.*

### Введение

Точные значения пористости и коэффициента фильтрации применяются при расчётах фильтрации через грунтовые сооружения, при определении дебета скважины, при проектировании дренажных и водопонижающих систем, а также в горной, нефтегазовой и других отраслях науки и техники. Для решения задач, связанных с фильтрацией, необходимо обладать точными знаниями о пористости и коэффициенте фильтрации грунта. Если для простых грунтов (пески и щебни различных крупности) значения пористости и коэффициента фильтрации известны, то в случае комбинированного грунта (равномерная смесь песка и щебня в различных пропорциях), вопрос остается открытым. Одной из задач исследования является получение точной непрерывной численной оценки фильтрационных свойств смеси в зависимости от комбинации пропорций компонентов.

Таким образом, представляет интерес функциональная зависимость фильтрационных свойств смеси от пропорций. Возможно скомбинировать пропорции смеси таким образом, что коэффициент фильтрации полученной смеси будет на много порядков ниже, чем щебня и песка в отдельности. Методике данного исследования и посвящена настоящая статья.

Существует множество универсальных и авторских методик определения фильтрационных свойств, но любая из этих методик относится к одному из четырех способов: полевому, теоретическому, натурному и лабораторному [1], [2].

**Полевой способ** отличается высокой производительностью (в день исследованию подвергается несколько десятков проб) и отсутствием потребности в высокоточных габаритных приборах для исследования. Отрицательным аспектом полевого способа является большая погрешность полученных результатов.

**Теоретический способ** широко применяется при недостаточности полевых данных [3]. Необходимо знать лишь некоторые (род грунта, объемный вес, гранулометрический состав) свойства грунта, чтобы вычислить коэффициент фильтрации. Однако данный способ дает лишь оценочное представление фильтрационных свойствах грунта, реальные же показатели могут отличаться на порядок.

**Натурный способ** определения фильтрационных свойств грунта применяется на реальных сооружениях, подверженных фильтрационному процессу. Успешность такого исследования и достоверность результатов во многом зависят от программы испытаний, правильности и точности применяемой аппаратуры, и являются уникальными, а не массовыми [4], [5].

**Лабораторный метод** дает возможность провести систематические и комплексные измерения с высокой точностью и высокой степенью достоверности полученных результатов.

### Изложение метода исследования

Исследование производится с помощью прибора Дарси. Принцип работы этого прибора заключается в использовании цилиндрического сосуда, заполненного исследуемой смесью, через

который при постоянной разнице напоров пропускается вода. С помощью пьезометров определяется давление в различных по высоте сечениях фильтрующей смеси. В процессе проведения эксперимента меняется состав смеси, замеряются показания пьезометров и определяется расход воды по ГОСТам 25584-90 и 5180-84 ([6], [7]).

Ввиду того, что режим течения жидкости в порах ламинарный, потери напора пропорциональны скорости ее движения в первой степени. Эта зависимость впервые была установлена французским инженером Анри Филибером Гаспаром Дарси при исследованиях им движения воды в песчаных фильтрах и получила название закон Дарси, или линейный закон фильтрации.

Исторически закон был получен экспериментально, но он может быть получен также с помощью осреднения уравнений Навье–Стокса, описывающих течение в масштабе пор (в настоящее время имеются доказательства для пористых сред с периодической и случайной микроструктурой). Этот закон выражает зависимость скорости фильтрации флюида от градиента напора [8]:

$$\vec{u} = -k \cdot \vec{I},$$

где  $\vec{u}$  — скорость фильтрации;  $k$  — коэффициент фильтрации;  $\vec{I}$  — градиент напора.

Область применимости закона Дарси ограничена фильтрацией жидкости, подчиняющейся закону вязкого трения Ньютона (закону Навье–Стокса) [9], [10]. Для ньютоновских жидкостей область применения закона Дарси ограничивается малой скоростью фильтрации. При больших скоростях зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации нелинейна (хорошее совпадение с экспериментальными данными дает квадратичная зависимость — закон фильтрации Форхгеймера).

### Описание лабораторной установки

Приведенная на рисунке (с. ...) лабораторная установка спроектирована специально для описываемого эксперимента. Фильтрационная колонна представляет собой пластиковую трубу  $d = 200$  мм и высотой 2 м. В нижнюю часть трубы вставляется концевая заглушка с вмонтированным в нее сливным вентилям. Многооборотный вентиль предпочтительнее шарового, так как позволяет «тоньше» регулировать расход воды. Устья пьезометров представляют собой сантехнические штуцеры, вмонтированные через резиновое уплотнение в заранее устроенные отверстия с шагом 0,4 м. При пяти пьезометрах интервал наблюдения составляет 1,6 м. Расстояния 0,2 м ниже пьезометра № 5 и 0,2 м выше пьезометра № 1 являются технологическими запасами. Трубки пьезометров представляют собой гибкие шланги  $d = 12$  мм, жестко закрепленные на деревянном пьезометрическом стенде с соблюдением прямолинейности. На переднюю стенку пьезометрического стенда нанесена масштабная координатная сетка, позволяющая снимать показания пьезометров с точностью до 1 мм.

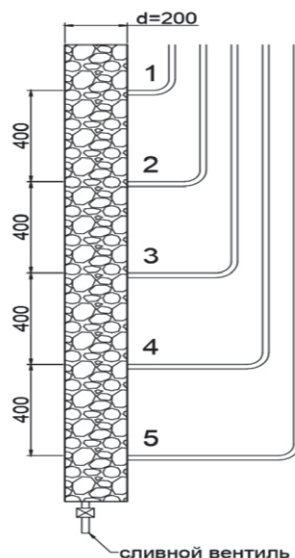


Схема установки: 1 – 5 — устья пьезометров

Целью работы является создание лабораторной установки, которая позволит исследовать фильтрационные свойства различных комбинированных щебеночно-песчаных смесей и в дальнейшем получить функциональную зависимость «коэффициент фильтрации – процентное соотношение» и «пористость – процентное соотношение». Исследование ведется дискретным методом с шагом дискретизации 20 %. Щебень выбирается фракции 5 – 20 мм, песок — средней крупности. Исследованию подвергаются шесть смесей, приведенных в следующей таблице:

Номер смеси	Содержание щебня, %	Содержание песка, %
1	100	0
2	80	20
3	60	40
4	40	60
5	20	80
6	0	100

При определении коэффициента фильтрации выходными данными являются показания пьезометров (определяются с помощью фотофиксации в режиме реального времени) и фильтрационный расход, измеряемый весовым методом — под сливной вентиль подставляется тара и с помощью секундомера вычисляется время наполнения тары. Далее тара взвешивается на лабораторных весах, что позволяет вычислить вес отобранной за известное время жидкости. После этого дважды измеряется температура жидкости лабораторным термометром, что позволяет с помощью общеизвестных закономерностей вычислить плотность жидкости. Зная плотность, подсчитывается объем жидкости в таре, который, будучи отнесенным к фиксируемому времени наполнения, представляет собой фильтрационный расход.

Определение пористости производится объемным методом. Тара известного объема заполняется исследуемой смесью. Далее тара вместе со смесью медленно, чтобы не происходило изменений структуры грунта, заполняется до краев водой, после чего определяется вес добавленной жидкости на лабораторных весах. Далее производятся известные манипуляции по пересчету веса жидкости в объем и соотносятся известный объем смеси с вычисленным объемом пор, что и представляет собой пористость.

Для каждой смеси производится вычисление пяти коэффициентов фильтрации (при пяти разных расходах и пяти разных потерях), затем результат осредняется, а также выполняется вычисление трех коэффициентов пористости, причем проба берется из верхней, средней части и нижней части части трубы, затем результат осредняется.

### Обсуждение основных результатов

Смеси № 1 и 6 представляют собой чистый щебень и чистый песок соответственно. Смеси № 2 и 3 готовятся путем добавления песка в смесь № 1 и в смесь № 2 соответственно. К дальнейшему использованию отработанная смесь № 3 не годится. Необходимо готовить смеси № 5 и 4 путем добавлением щебня в смесь № 6 и 5 соответственно. Таким образом, используется два комплекта смесей (это необходимо учитывать в случае планирования подобного эксперимента).

Полученные зависимости фильтрационных свойств от пропорций смеси помогут выбрать необходимое соотношение инертных материалов для обеспечения заданного коэффициента фильтрации, а также прогнозировать фильтрационные свойства комбинированных грунтов с известными пропорциями. Полученные результаты будут представлены отдельным материалом после проведения эксперимента по описанной методике получения функциональных зависимостей: «коэффициент фильтрации – процентное соотношение» и «пористость – процентное соотношение».

## Вывод

Построенная лабораторная установка позволяет проводить исследования фильтрационных свойств по методу Дарси, следующим этапом работ будет являться проведение серии экспериментов, получение и обработка экспериментальных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасанов С. Т. Метод определения коэффициента фильтрации в слоистых грунтах / С. Т. Гасанов, Ф. Г. Габибов // Геотехника. — 2015. — № 2. — С. 10–15.
2. Касперов Г. И. Методика лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов для оценки безопасности при эксплуатации шламохранилищ / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2015. — № 2 (22). — С. 68–72.
3. Левкевич В. Е. Методика лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов / В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, В. А. Цедик // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2015. — Т. 1. — № 1 (6). — С. 123–125.
4. Безволев С. Г. Оптимальная методика определения коэффициентов фильтрации и консолидации глинистых грунтов / С. Г. Безволев // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 1991. — № 4. — С. 113–122.
5. Андреев В. Г. Факторы, влияющие на коэффициент фильтрации / В. Г. Андреев, А. А. Славянский, И. О. Ворошило, И. О. Ворошило // Сахар. — 2002. — № 2. — С. 47–49.
6. ГОСТ 25584-90. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 17 с.
7. ГОСТ 5180-84. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2005. — 21 с.
8. Высоцкий Л. И. Рекомендации по использованию формул для коэффициента Дарси при расчете распределения осреднённых скоростей / Л. И. Высоцкий // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. — 2014. — № 4 (16). — С. 204–212.
9. Хасанов М. К. Элементы теории фильтрации / М. К. Хасанов. — Уфа: Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. обр. «Башкирский гос. ун-т», 2008. — 58 с.
10. Гладков С. О. О законе Дарси в условиях сохранения энтальпии / С. О. Гладков // Письма в журнал технической физики. — 2002. — Т. 28. — № 20. — С. 50–57.

## THE DEVELOPMENT OF LABORATORY INSTALLATION TO STUDY THE FILTRATION PROPERTIES OF THE COMBINED SAND-GRAVEL MIXTURE

*The article describes the creation process of the laboratory setup - device Darcy. This device is necessary in order to obtain the possibility of conducting more detailed studies in the study of filtration properties of the combined sand-gravel mixture. The study of filtration properties of the mixture, which is not a single substance, but consists of a combination of two different compounds, is of particular interest, as laboratory tests to determine the filtration coefficient of this mixture were not carried out before. The results of the experiment, i.e. calculation of the filtration coefficient of the combined sand-gravel mixtures gives the possibility of their practical application in the design, construction, operation and reconstruction of hydraulic structures groundwater.*

*The article discusses some of the existing methods for determining the filtration coefficient of permeable soil. Analyzed the effectiveness and the applicability of each of the existing methods for determining the filtration properties of the combined sand-gravel mixture. To achieve this goal a laboratory method of determining the filtration properties using the device of Darcy as a method of giving the most accurate and reliable answers to questions. Further information on the history of the instrument, and given Darcy's linear law of filtration as the main functional dependence describing the filtration process. The design of the laboratory setup made description of structural nodes and elements, there is the technology of the experiment, and gives practical advice on planning and conducting such experiments.*

*Keywords: filtration coefficient, porosity, Darcy's method, combined mixture, crushed stone, sand.*



## REFERENCES

1. Gasanov, S. T., and F. O. Gabibov. "The Method Of Finding The Coefficient Of Filtration Of Schistose The Problem Of Finding The Coefficient Of Filtration In Schistose Ground." *Geotekhnika* 2 (2015): 10–15.
2. Kasperav, Heorhi, Viktor Levkevich, Siarhei Pastukhou, Mikhail Kukshinov, Aliaksandr Buzuk, Dmitry Mikanovich, and Valery Kabiak. "The technique of laboratory tests to determine the filtration coefficient of sandy soils to assess the safety in the operation of sludge storage tanks." *Herald of the University of Civil Protection of the MES of Belarus* 2(22) (2015): 68–72.
3. Levkevich, V. E., D. S. Mikanovich, and V. A. Cedik. "Metodika laboratornyh issledovaniy po opredeleniju koeficienta filtracii peschanyh gruntov." *Sovremennye tehnologii obespechenija grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij* 1.1(6) (2015): 123–125.
4. Bezvolev, S. G. "Optimalnaja metodika opredelenija koeficientov filtracii i konso-lidacii glinistyh gruntov." *Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija* 4 (1991): 113–122.
5. Andreev, V. G., A. A. Slavjanskij, I. O. Voroshilo, and I. O. Voroshilo. "Fakторы, vlijajushhie na koeficient filtracii." *Sahar* 2 (2002): 47–49.
6. Russian Federation. State Standard 25584-90. Jelektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija koeficienta filtracii. M.: Izdatelstvo standartov, 1993.
7. Russian Federation. State Standard 5180-84. Jelektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fizicheskikh harakteristik. M.: Standartinform, 2005.
8. Vysotskiy, Lev Ilich. "Guidance for the use of formulas for Darcy coefficient calculating the distribution of averaged velocities." *Scientific Journal of Russian Research Institute of Land Improvement Problems* 4(16) (2014): 204–212.
9. Hasanov, M. K. *Jelementy teorii filtracii*. Ufa: Federalnoe agentstvo po obrazovaniju, Gos. obrazovatelnoe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovanija "Bashkirskij gos. un-t", 2008.
10. Gladkov, S. O. "O zakone Darsi v uslovijah sohraneniya jentalpii." *Technical Physics Letters* 28.20 (2002): 50–57.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Смирнов-Туманов Ярослав Сергеевич* — аспирант.  
 Научный руководитель:  
*Колосов Михаил Александрович* —  
 доктор технических наук, профессор.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С.О. Макарова»  
*istmeister@gmail.com*  
*Панченко Наталья Михайловна* —  
 кандидат технических наук.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Smirnov-Tumanov Jaroslav Sergeevich* —  
 postgraduate.  
 Supervisor:  
*Kolosov Mikhail Aleksandrovich* —  
 Dr. of Technical Sciences, professor.  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
*istmeister@gmail.com*  
*Panchenko Natalia Mikhailovna* — PhD.  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.*

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-134-144  
УДК 629.123.56

**И. И. Костылев,  
Д. В. Коняев**

## БУНКЕРОВКА КАК ФАКТОР СДЕРЖИВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА НА СУДАХ

*В статье рассматривается вопрос о бункеровке судов сжиженным природным газом, используемым в качестве судового топлива. Отмечается, что экономическая и экологическая составляющие предопределяют расширение применения газа в качестве топлива на судах. Морское судоходство наносит большой вред окружающей среде. Суда сжигают тяжелое топливо и выделяют большое количество частиц сажи, оксиды серы и оксиды азота, которые опасны как для здоровья, так и для окружающей среды. При этом негативный баланс оксида углерода составляет приблизительно 1 млрд т или 4,5 % мирового выброса двуоксида углерода. Борьба за нулевые выбросы идет по всем направлениям. С 2015 г. ограничено содержание серы в судовом топливе. В 2016 г. для новых судов ограничено содержание оксидов азота. Использование сжиженного природного газа в качестве топлива главных судовых двигателей, а также для производства электроэнергии с целью обеспечения нужд на судах во время стоянки в портах позволяет сдерживать рост загрязнения и выполнять ужесточающиеся экологические ограничения Международной морской организации (ИМО), действующей под эгидой ООН. Экологический аспект перехода на использование сжиженного природного газа является определяющим при выборе конкретного пути выполнения требований конвенции MARPOL. Экономические преимущества сжиженного газа позволяют в приемлемые сроки окупить затраты на приспособление судна к работе на СПГ, технологическое оборудование и стоимость бункеровки. Достаточно серьезной проблемой является вопрос создания инфраструктуры по бункеровочным операциям. Делается вывод по предпочтительности использования судов-бункеровщиков как более мобильные и безопасные средства для доставки газового топлива от береговых хранилищ или судов-накопителей. Приводятся примеры строительства специальных судов и терминалов.*

*Ключевые слова: СПГ, суда-газовозы, природный газ, бункеровка судов, СПГ терминалы и суда, судно-бункеровщик, газотопливное судно, криозаправщик, MARPOL, экология, выбросы, индекс конструктивной энергетической эффективности.*

### Введение

Начало тенденции, связанной с экономией, с одной стороны, и с появлением на промышленном рынке большого объема природного газа — с другой, относится к 80-м гг. XX в. В сжатом до 5 – 7 бар состоянии он под названием компримированного газа использовался как топливо в четырехтактных дизелях наряду с запальным нефтяным топливом. В наше время мировое дизелестроение в большей его части, включая и дизелестроительные заводы, выпускающие мощные малооборотные крейцкопфные дизели, отработывают и поставляют на рынок конструкции для работы на двойном топливе. Авангардной в этом направлении была и остается компания Вяртсиля, которая выпустила уже сотни двухтопливных двигателей.

Вопросы топливоиспользования всегда находятся в центре внимания разработчиков судовой энергетики, а с внедрением в индустрию судоходства газозавозов применение газа в качестве топлива стало весьма популярным. При транспортировке природного газа в жидком состоянии неизбежным является образование пара, утилизация которого может идти путем его реконденсации и возвращения в груз или подачи к двигателям и котлам в качестве топлива (второе решение более экономично и экологически оправданно). Перевод судовой энергетики на газ для судов, не являющихся газозавозами, тоже уже является практически решенным вопросом. Однако, если сам процесс

сжигания отработан фирмами-строителями дизелей и котлов, то размещение бункера на судне и получение газового топлива на борт судна еще находится в процессе внедрения и разработки.

### Газ как судовое топливо и его бункеровка

Применение природного газа для бункеровки судов имеет достаточно давнюю историю. Еще в середине 30-х гг. XX в. в СССР было зафиксировано первое в истории водного транспорта массовое использование газового топлива на речных буксирах. К 1 января 1941 г. в СССР на газе работал целый флот. Более 450 речных судов разного назначения были оборудованы газогенераторными установками МСВ-84 для серийного тракторного двигателя ЧТЗ-С-60 мощностью до 120 л. с. [1]. Начиная с 80-х гг. XX в. в ряде стран осуществлялись отдельные проекты по газификации морских и речных судов компримированным природным газом (КПГ). Первым из таких судов принято считать каботажное грузовое судно AccoladeII дедвейтом 8140 т, построенное в Австралии в 1982 г. с газодизельной силовой установкой. В 1985 и 1988 гг. в Ванкувере (Канада) начали работать паромы «Klatawa» и «Kulleet», перевозившие по 146 пассажиров и 26 автомобилей. Природный газ хранился в пятидесяти стальных баллонах общим объемом вместимостью 14,7 м<sup>3</sup> под давлением 250 атм. Бункеровка паромов осуществлялась от городской распределительной сети через трехступенчатый компрессор.

В Норфолке (Вирджиния, США) в 1995 г. начал работать паром «Elisabeth River I», рассчитанный на перевозку 149 пассажиров, особенностью которого было то, что газодизельная силовая установка приводила в действие кормовой колесный движитель. В Нидерландах перевели на КПГ речные прогулочные суда «Mondriaan» и «Escher» в 1994 г., а затем в 2000 г. — суда «Rembrandt» и «VanGogh». Начиная с 90-х гг. XX в. в Италии периодически демонстрируют скоростные катера на КПГ. В Российской Федерации вернулись к теме использования метана на судах после длительного перерыва только в середине 90-х г. XX в.

В 1994 – 1997 гг. в Санкт-Петербурге и Москве были успешно проведены эксплуатационные испытания газодизельных пассажирских теплоходов проектов Р-35 «Нева» и Р-51 «Москва». Главные двигатели типа ЗДб опытных теплоходов работали по газодизельному циклу. Запальная доза дизельного топлива составляла 30 %, что по тем временам на механических системах управления подачей топлива считалось приемлемым. Однако существенного экологического преимущества такие системы не давали. Газовые баллоны размещались на палубе надстройки в районе 57 – 61 шпангоутов по правому и левому борту в двух контейнерах по шестнадцать 50-литровых баллонов с общим запасом газа, рассчитанных на 20 ч работы. Каждая группа баллонов использовалась для питания одного двигателя. В разработке этих проектов принимали активное участие сотрудники Инженерного центра судостроения — правопреемника ЦКТБ Минречфлота РСФСР.

Газовая арматура располагалась вне машинного отделения. Система газового топлива обеспечивала автоматический перевод работы главных двигателей с газового топлива на дизельное и ручной перевод работы главных двигателей с дизельного топлива на газовое. Для обеспечения работы двигателя на дизельном и газодизельном топливе также предусматривалась система управления аварийно-предупредительной сигнализацией и защиты. Опытная эксплуатация судов-газовозов показала, что использование природного газа в качестве моторного топлива на судах внутреннего водного транспорта возможно и целесообразно.

С развитием освоения газовых месторождений и транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) танкерным флотом неизбежно образующийся пар при испарении груза стали использовать в качестве топлива. Транспортировка газа морским транспортом предопределяла внедрение такой технологии, как альтернатива реконденсации. Однако в последние годы использование газозовов и, соответственно, спрос на установки, работающие на газовом топливе, является достаточно нестабильным.

По информации газеты «Морские вести России» в 2012 г. стоимость фрахта танкеров-газовозов составляла 155 тыс. долл. в сутки, а в середине 2016 г. она снизилась до 25 тыс. долл. Причины здесь могут быть самые различные — это и перераспределение рынка экспорта и импорта, и из-

менение ранее запланированных направлений транспортировки углеводородов и, как следствие, появление избыточных мощностей. Число простаивающих газозовов, по предварительным прогнозам специалистов, сохранится и в 2017 г. [2].

Безусловно, логично отметить, что рассматривая использование газового топлива на судах, речь идет, прежде всего, о газозовах, где отсутствует необходимость наличия специальных емкостей для бункерных запасов. Газ идет из грузовых танков в виде выпара, т. е. испаряющейся части газа. Однако по прогнозным данным к концу 2018 г. мировые мощности по производству СПГ возрастут на 45 %, и будет задействован флот газозовов, включая вновь строящиеся суда [2]. Таким образом, доля газа в общем объеме топлива, сжигаемого в судовых установках, увеличится. Кроме экономических аспектов в данном случае очень важны и экологические. Теплотехнические аспекты процесса сжигания газа в судовых установках (двигатели, котлы) хорошо анализируются и преимущество газа не вызывает сомнения [3], [4]. Однако при этом остается нерешенным вопрос о том, где хранить на судне и где брать газовое топливо.

Бывшие всегда актуальными проблемы энергосбережения (по существу, экономия топлива) и защиты окружающей среды от вредных выбросов с судов за последнее десятилетие еще более обострились в связи с неустойчивостью мирового нефтяного рынка и ужесточением требований природоохранных организаций, включая новые положения ИМО в соответствующих разделах Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78, Прил. VI, Классы II и III). Особое внимание ИМО уделяет разработке стандарта EEDI (Energy Efficiency Design Index) как в его общем определении, так и в толкованиях его составных частей, их характеристик вместе с методами и техническими средствами количественного определения в различных случаях конструкционного исполнения судов, их размерений и назначения [5]. Например, еще во второй половине 2011 г. постановлением ИМО была создана рабочая группа под председательством японского представителя Mr. Koishida Yoshida, в которую вошли специалисты от правительств 26 стран, в том числе и от Российской Федерации, для обсуждения и принятия норм и способов оценки соответствия им на судах мирового флота и, в частности, норм выброса с них в атмосферу GHG (Greenhouse Gas — в основном углекислый газ с отдельной оценкой  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ ).

Следует отметить сложность самого понятия «энергетическая эффективность судна». В первоначальном и общем представлении оно может быть выражено отношением чистой полученной выручки за контрактный рейс к денежной сумме всех понесенных в нем затрат. Поскольку условия транспортировки могут быть различны, то для начальной («построечной») оценки уровня EEDI могут быть определены при некоторых «стандартных» условиях. Однако это немного и лишь формально упростит задачу. В данном случае собственно энергетическая эффективность судна в нормальных условиях его хода определяется простой формулой для безразмерной величины на шкале:

$$EEDI_{\text{усл}} = \frac{Rv}{g_{e(c)} P_{e\Sigma} Q_n^p},$$

где  $R$ , кН — буксировочное усилие;  $v$ , м/с — скорость хода;  $g_{e(c)}$ , кг/(Вт·с) — удельный секундный расход топлива на все энергопроизводящие установки, работающие на исследуемом номинальном режиме общей мощностью  $P_{e\Sigma}$ ;  $Q_n^p$ , Дж/кг — низшая теплотворная способность топлива.

Приведенная формула легко используется для учета в знаменателе подробного состава судовой энергетической установки с конкретными значениями трех множителей для каждого агрегата, в том числе с учетом его относительного времени работы, нагрузки и вида топлива. Решением этих проблем по-настоящему занимаются все судоходные компании. Но главным образом и наиболее эффективно в настоящее время они решаются на уровне судостроения при его государственном регулировании с активным участием в нем передовых классификационных обществ (ABS, DNV, Lloyd и др.) во главе с МАКО (Международная ассоциация классификационных обществ). При этом следует отметить, что первое направление новаций в области топливоиспользования (снижения его расхода) касается всего мирового флота, второе — природоохранное направление — в значительно большей степени относится к двигателям судов внутреннего и прибрежного



плавания. Сближает их в настоящее время одно: в обоих случаях наиболее эффективным способом решения проблемы является интенсивное внедрение природного газа в качестве основного топлива в судовой энергетике. Нет необходимости говорить о целесообразности применения газового топлива на других типах судов, не являющихся газовозами. Применение газового топлива способствует выполнению ужесточающихся требований по экологии, а также дает возможность снизить затраты на топливо [6]. Опыт эксплуатации газовозов, на которых используется газ как топливо, убедительно подтверждает целесообразность такого подхода [7].

Основными проблемами увеличения масштабов использования газа на судах являются вопросы организации бункеровки и прежде всего использование емкостей хранения газа на судах и бункеровочных терминалах. В настоящее время уже существуют и используются системы хранения запаса СПГ в танках (баллонах) специальной конструкции, максимально удобным образом вписывающиеся в обводы судна без ущерба для его вместимости. Чаще всего применяются контейнеры-цистерны. На рис. 1 приведен внешний вид находящегося в эксплуатации круизного лайнера с расположением баллонов большой емкости в кормовой части судна.



Рис. 1. Расположение контейнеров-цистерн с газовым топливом

Технических трудностей с применением газового топлива на судах, а также нормативных ограничений в Правилах Российского морского регистра и Российского речного регистра по применению газового топлива на судах в настоящее время нет. Главным препятствием на пути широкого применения газа в качестве топлива на морских судах является отсутствие инфраструктуры по бункеровке судов газовым топливом. Это особенно важно для судов с короткими переходами. Поэтому возникла объективная острая потребность в судах-бункеровщиках СПГ. Кроме того, с учетом роста потребления и популярности СПГ существует потребность в фидерных перевозках относительно небольших (по меркам рынка) партий СПГ и на судах, способных круглогодично выполнять такие перевозки между местными портами в пределах Европы.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день в мире имеется в эксплуатации бункеровщик СПГ — шведский «Sea Gas», работающий в порту Стокгольма, а фидерные газовозы СПГ емкостью менее 100000 м<sup>3</sup> можно считать единичными [8]. Для остальных бассейнов (в первую очередь для Дальневосточного) требуется судно, пригодное для использования в качестве как бункеровщика СПГ, так и фидерного газовоза СПГ. Назначением такого судна помимо бункеровки газотопливных судов, могут быть перевозки небольших партий СПГ как для нужд местной и региональной газификации, так и в порядке региональной торговли экспортными энергоносителями на рынках Японии, КНР и Южной Кореи.

Уместно отметить, что эту задачу по Дальневосточному бассейну уже решают компании «Газпром» и «Mitsui». Председатель правления ПАО «Газпром» А. Миллер и директор-представитель, председатель Совета директоров «Mitsui & Co., Ltd» М. Иидзима в период работы Восточного экономического форума во Владивостоке в августе 2016 г. подписали Меморандум

о взаимопонимании. Документ отражает намерения сторон по совместному проведению технико-экономического и маркетингового анализа бункеровки морского транспорта сжиженным природным газом на территории Дальнего Востока России и Азиатско-Тихоокеанского региона. Такой высокий уровень рассмотрения проблемы бункеровки подчеркивает исключительную важность вопроса [9].

Наиболее развитой инфраструктурой для бункеровки судов, использующих СПГ, исторически обладает Норвегия. Несколько бункеровочных терминалов СПГ планируется к открытию в Швеции, Финляндии, Германии, Голландии, Бельгии, Великобритании, а также на Средиземном Море во Франции, Испании, и Греции. Вне Европы бункеровка СПГ осуществляется в США, Китае, Сингапуре, Южной Корее.

Существующие прогнозы спроса и предложения СПГ даже на ближайшее будущее весьма противоречивы и могут существенно различаться. Главной причиной, возможно, является то, что такие сегменты рынка сжиженного метана, как автономная газификация, заправка автомобилей и бункеровка судов, пока еще только формируются, имеют нестабильный характер и невысокую степень предсказуемости. Кроме того, для достоверных прогнозов порой просто не хватает исходной информации.

По сводной оценке нескольких специализированных организаций, минимальный и максимальный сценарии развития спроса СПГ отличаются в разы. Тем не менее имеются основания полагать, что к 2025 г. сегмент бункеровочного топлива в общем объеме газомоторного рынка составит около 25 млрд м<sup>3</sup>. К основным игрокам рынка СПГ в качестве судового топлива, кроме политиков и инвесторов, следует относить владельцев морских и речных судов, транспортные компании, судостроителей, портовые власти, девелоперов инфраструктуры, поставщиков криогенной техники и оборудования. По различным оценкам, общий спрос морского и речного транспорта на бункеровочный СПГ в Европе к 2030 г. может оцениваться в 20 – 27 млрд м<sup>3</sup> в год, в том числе в бассейнах Балтийского и Северного моря в 10 – 14 млрд м<sup>3</sup> в год. Опыт эксплуатации судов с паротурбинными установками не оставляет сомнений, что перспективы использования газа на судах весьма убедительны [10].

По мнению экспертов Классификационного общества DNV GL, в более приближенной перспективе (в 2020 г.) мировой флот судов-контейнеровозов типа Emma Maersk вместимостью 15 000 TEU может составить 1000 единиц. Мощность силовой установки этих судов равна 80 000 кВт, скорость 25 уз, расход топлива (с содержанием серы от 2,5 до 4,5 %, что подпадает под ограничения): часовой — 14 т, суточный — 300 т, годовой ≈ 97 тыс. т (около 70 тыс. т СПГ). Таким образом, глобальная годовая потребность 1000 подобных судов может составить 70 млн т СПГ в год. Поставки СПГ могут производиться с берегового терминала или с бункеровочных судов. Это могут быть баржа или небольшой танкер. Какой метод поставки СПГ будет развиваться в порту и зависит от того, является ли источник СПГ локальным по отношению к порту или находится на расстоянии.

Вопросы безопасности операций, таких как одновременные грузовые операции и другие виды опасной деятельности, которые происходят на причале или стоянке во время бункеровки, также оказывают влияние на решение вопроса о том, будет ли поставка бункера СПГ осуществляться с берега или с судна-бункеровщика, пришвартованного к судну, находящемуся у причала или на якорной стоянке. Вся сеть снабжения СПГ: от источника газа до судна, может включать в себя множество методов транспортировки. Безусловно, технология бункеровки будет различной в зависимости от способа доставки газа. В случае использования стационарных сооружений обеспечивается подсоединение бункеровочной линии судна непосредственно к трубопроводам на причале. СПГ в данном случае хранится в резервуаре, расположенном в порту или поблизости от него.

Автомобильные цистерны позволяют бункеровать судно с причала не оборудованного терминалом СПГ. Подсоединение автоцистерны на причале к судну производится шлангами. Альтернативой может быть использование стандартных танк-контейнеров вместо топливных танков суд-

на. После расходования топливные танк-контейнеры заменяются на заправленные. Заправленные танк-контейнеры могут быть доставлены на судно автомобильным или железнодорожным транспортом, а израсходованные танк-контейнеры возвращены для заправки. Такая процедура может сократить общую продолжительность бункеровки.

Преимуществом использования судна-бункеровщика СПГ, пришвартованного к борту принимающего судна, находящегося в порту или на якорной стоянке, является изоляция бункерных операций от грузовых причалов, что снижает их влияние на грузовые операции в порту и уменьшает последствия возможных аварий, связанных с использованием СПГ. Типичное судно-бункеровщик СПГ имеет больший район снабжения топливом, чем баржа-бункеровщик, и большую вместимость. Суда-бункеровщики СПГ имеют конструкцию и эксплуатируются в соответствии с требованиями Международного газового кодекса и Классификационного общества, предъявляемыми к судам-газовозам.

Рассматривая инфраструктуру бункеровки, следует иметь в виду, что в некоторых случаях будут рациональными более простые варианты. Существующие технологии бункеровки СПГ в основном сводятся к применению автомобильных цистерн. Эта технология давно отработана, она позволяет принимать оптимальные логистические решения, обеспечивает заправку судна сжиженным метаном в нужное время, удобном для клиента месте и требуемом количестве. Кроме того, эта же заправочная техника может использоваться в интересах автомобильного транспорта и объектов автономной газификации.

Автомобильные метановозы позволяют максимально адаптировать эксплуатацию как под нужды потребителя, так и под потребности поставщика. В ожидании следующей бункеровки автомобиль может доставлять СПГ другим потребителям. В этих целях используются передвижные криозаправщики. Для бункеровки судов с автоцистерн отсутствует необходимость строить специальные терминалы (причалы), достаточно иметь удовлетворительный по нагрузкам и габаритам причальный пирс (рис. 2).



Рис. 2. Бункеровка судна с использованием автоцистерн

Баржи-бункеровщики начинают применяться в различных портах мира. Однако они жестко привязаны к району эксплуатации и потребителям. Хотя бункеровочные суда и обладают определенной автономностью, они все же ориентированы на ограниченное количество потребителей. В случае, например, с бункеровщиком «Sea Gas» в Стокгольме это ограничение не имеет особого значения, поскольку такой клиент, как паром «Viking Grace», ежедневно забирает 60 т СПГ. Создаются и новые перспективные системы. Так, компания «Crowley Maritime Corp.» — дочернее общество корпорации «Jensen Maritime» (США) — объявила о разработке двух новых концепций барж для бункеровки СПГ. В первом случае по заказу потребителя на палубе существующей баржи временно устанавливаются модули с емкостями для СПГ и при необходимости для других

жидких углеводородов. Такая концепция интересна для потребителей с непродолжительным периодом использования СПГ. Во втором случае речь идет о строительстве специальной бункеровочной баржи, объем СПГ на борту которой может определяться на основе потребностей конкретного покупателя топлива.

Судоходные компании пока ещё не определились со своими предпочтениями, по какой схеме бункероваться: с барж, со стационарного берегового пункта или автоцистерны. Опыт показывает, что баржи-бункеровщики являются наиболее удобным средством доставки СПГ особенно в тех портах, где инфраструктура СПГ отсутствует. В то же время свои преимущества имеют и другие варианты. Например, технологические решения компании «Crowley Maritime Corp.» предполагают внедрение новых бизнес-моделей более комфортной и экономичной бункеровки судов сжиженным метаном. Так, компания «Crowley Maritime Corp.» оказывает широкий спектр технологических услуг в области транспортировки и заправки СПГ не только баржами, но и автоцистернами в США, на Аляске и в странах Карибского бассейна. Финская компания «Wartsila» также создала самоходное судно-бункеровщик вместимостью 6,5 тыс. м<sup>3</sup>, способное доставлять СПГ на бункеруемое судно от берегового терминала. Эта операция может проводиться одновременно с разгрузкой танкера СПГ. Иберийская газомоторная ассоциация «GASNAM» подготовила проект технического регламента бункеровочных операций. В апреле 2016 г. он был представлен Европейской экономической комиссии ООН, после чего началась процедура экспертного обсуждения. Аналогичный документ на основе рекомендаций DNV GL разработан в США. В марте 2015 г. Служба береговой охраны США опубликовала «Письмо о политике в области бункеровки, подготовки персонала и береговых сооружений». Поскольку стационарных бункеровочных сооружений в США пока нет, а суда на СПГ уже появляются, единственной возможностью заправки остается использование только автомобильных цистерн или малых морских барж. В связи с этим возникают некоторые риски, которые пока никак не отражены в американском праве. Главной задачей сегодня называют расчет вероятных последствий в аварийных ситуациях при осуществлении заправки судов СПГ. Для этого компания «DNV» использует в своих моделях статистические данные, полученные в течение последних 30 лет.

Системы приема и хранения СПГ на судах, средства обеспечения безопасности и др. имеют определённые конструктивные особенности, отражающие специфические условия эксплуатации. Одним из важных показателей системы является *время бункеровки*, которое зачастую весьма ограничено расписанием коммерческой работы. Так, например, для морского парома «Viking Grace», курсирующего по линии Стокгольм – Турку, была разработана специальная скоростная система, обеспечивающая прием 60 т СПГ в час. Бункеровка осуществляется в Стокгольме по схеме «судно – судно».

Компания «Cryoport» — одна из многих, кто в последнее время начинает развивать корпоративный бизнес в направлении применения сжиженного метана для всех возможных покупателей этого топлива в сегменте среднего и малого бизнеса: автономная газификация, заправка автомобильного и бункеровка водного транспорта. Компания «Cryoport» комплектует бортовые системы хранения СПГ с емкостями вместимостью 40, 60, 100 и 130 м<sup>3</sup>. Внедрением использования СПГ на главных судовых двигателях занимается широкопрофильная компания «Crowley Maritime Corporation» (США). С 2015 г. в компании функционирует специальная Группа по СПГ, отвечающая за реализацию корпоративной экологической стратегии EcoStewardship©. Так, на первых двух грузовых судах нового типа (El Coqui (Эль Ко-ки) и Taino (Тай-ноу) — комбинированный контейнеровоз / паром (ConRo — combination container and roll-on/roll-off) — компания «Crowley» устанавливает двухтопливные двигатели на СПГ (масса двигателя — 759 т, высота и длина — по 12,49 м, ширина — 4,48 м). Скорость судна — 22 уз (40,7 км/ч), грузовая вместимость — 2400 TEU. Судно приспособлено для перевозки контейнеров длиной 53 фута (16,15 м) и шириной 102 дюйма (2,59 м). На закрытых палубах судно может перевозить до 400 автомобилей.

Для обеспечения бесперебойного газоснабжения своих судов компания «Crowley» рассматривает варианты создания собственного бункеровочного флота. Эксперты компании высоко



оценивают экологические преимущества газовых двигателей по сравнению с традиционными: полное отсутствие в отработавших газах оксидов серы ( $SO_x$ ), 92 %-е сокращение оксидов азота ( $NO_x$ ), 32 %-е сокращение двуокси углерода ( $CO_2$ ), коррозионная нейтральность. Суда «El Coqui» и «Taino» будут курсировать между Джексонвилем и Пуэрто Рико на линии, находящейся под управлением США. Следовательно, они подпадают под действие федерального Закона Джоунса (Jones Act), который, в частности, предусматривает, что все товары, транспортируемые по воде между портами США, должны перевозиться на судах под флагом США, принадлежащих гражданам США, построенных в США и с экипажами, укомплектованными постоянно проживающими в США гражданами.

На верфи «Arctech Helsinki Shipyard», Хельсинки (принадлежит Объединенной судостроительной корпорации) завершается строительство первого в мире ледокола, работающего на СПГ. Заказчик корабля — Финское транспортное агентство (Finnish Transport Agency). Ледопроницаемость судна — 1,6 м на скорости 6 уз (11 км/ч), ширина прокладываемого канала во льду толщиной 1,2 м — 25 м при той же скорости. Максимальная скорость хода на открытой воде — 16 уз (29,6 км/ч). Кроме основной функции ледокол будет использоваться для буксировки и при ликвидации разливов нефти. Ледокол оснащен силовыми газодизельными установками Wartsila для привода генераторов: одна 8-цилиндровая машина Wartsila 20DF, две 9-цилиндровых Wartsila 34DF и две 12-цилиндровых Wartsila 34DF37. На Выборгской верфи, расположенной в Северо-Западном регионе России (входит в Объединенную судостроительную корпорацию), также ведется строительство двух портовых ледоколов проекта Aker ARC 124 на СПГ. На каждом судне планируется установить по два шестнадцатцилиндровых (Wartsila-32), два восьмицилиндровых (Wartsila-31) и одному шестицилиндровому (Wartsila-20) двигателю.

В направлении развития бункеровочных баз в морской индустрии создаются специализированные терминалы. Так, например, Фонд объединения Европы выделил балтийским топливным предприятиям во главе с литовской «Klaipėdas Nafta» 15 млн евро субсидии на строительство мобильного терминала СПГ и развитие сети бункеровки в Балтийском море. В ходе проекта должно быть построено небольшое судно, которое будет обслуживать страны Балтийского моря на базе терминала в Клайпеде. Предполагается, что мобильное устройство могло бы обслуживать суда в Литве, Швеции, Эстонии и Германии. Еще в 2014 г. в Клайпеду пришло судно-хранилище СПГ, которое будет являться частью нового терминала. С июля 2016 г. начал работу терминал Scangas (дочерняя компания «Gasum») в г. Пори (Финляндия). Основное назначение его состоит в обеспечении финского энергетического рынка по трубопроводам. Однако предусматривается, что помимо поставок промышленным потребителям, на терминале будут заправляться суда СПГ бункеровщиков или на рейде «судно-судно» (борт-в борт).

Представляет интерес в рамках рассматриваемой темы создание международного общества для продвижения газа в качестве судового топлива. Совет директоров Международного общества операторов газовозов и терминалов (SIGTTO) принял решение создать общество, продвигающее газ в качестве судового топлива (SGMF), в форме неправительственной организации. Создание такого отраслевого органа является важным шагом в деле укрепления безопасности и получения опыта в области использования СПГ в качестве судового топлива. Членство в SGMF доступно для всех заинтересованных сторон, участвующих в бункеровках СПГ, т. е. судовладельцев, операторов бункерных судов, портовых администраций и регулирующих органов.

Следует отметить, что при рассмотрении вопроса о бункеровке СПГ судов приходится учитывать ряд аспектов, связанных с повышенной опасностью СПГ и его паров. В частности, необходимо предусматривать значительные по площади зоны отчуждения, что во многих случаях делает размещение стационарного бункеровочного терминала СПГ невозможным либо проблематичным, особенно в условиях активной хозяйственной деятельности на территории порта. При использовании судна-бункеровщика зоной отчуждения может быть акватория, что гораздо более приемлемо. При этом бункеровщик необязательно должен быть самоход-

ным — в ряде случаев достаточно, чтобы он постоянно находился в заданной точке акватории (например, стоял на якоре), бункеруемое судно может подойти к нему для швартовки и бункеровки самостоятельно.

Использование бункеровщиков СПГ, в отличие от аналогичных по назначению бункеровщиков жидким нефтяным топливом, выявляет серьезную проблему, определяемую, с одной стороны, практикой работы судна-бункеровщика, а с другой — свойствами СПГ как груза. Поскольку в настоящее время количество двухтопливных судов крайне невелико по сравнению с количеством судов, работающих на традиционных сортах жидкого топлива, вероятность появления нуждающихся в бункеровке двухтопливных судов в акватории, обслуживаемой бункеровщиком СПГ, весьма невелика и труднопредсказуема. Поэтому существует высокая вероятность того, что бункеровщик СПГ будет ждать встречи с нуждающимся в нем газотопливным судном очень долго. СПГ при атмосферном давлении кипит при температуре  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому даже применение самых эффективных видов теплоизоляции не позволяет обеспечить его длительного хранения без образования выпара. В результате образования выпара повышается давление в емкости, в которой хранится СПГ. Основные типы применяемых для хранения СПГ емкостей не рассчитаны на избыточное давление более 0,25 бар, поэтому выпар приходится отводить для поддержания приемлемого давления. Сбрасывать выпар в атмосферу опасно, так как образуется облако потенциально взрывоопасной газозооной смеси. Выпар либо сжигают в факельных установках, либо используют в качестве топлива в судовой энергоустановке бункеровщика СПГ (как и на газовозах СПГ), либо повторно сжижают в имеющейся на борту реконденсационной установке.

Представляется привлекательной такая схема работы бункеровщика СПГ, при которой он не хранится на борту судна в ожидании будущего использования, а принимается на борт непосредственно перед предстоящей бункеровкой, после получения предварительной заявки на выполнение такой операции. Однако для этого требуется принять СПГ на борт бункеровщика либо с береговой бункеровочной базы, либо с терминала СПГ, обслуживающего линейные газовозы СПГ, либо непосредственно с линейного газовоза СПГ, либо из авто- или железнодорожных цистерн. При проведении таких операций возникают разного уровня сложности. Кроме того, любая перегрузка СПГ сопровождается потерями части газа, объём которых увеличивается с ростом числа перегрузочных операций.

### Заключение

В данной ситуации Россия, обладая третью мировых запасов природного газа, просто не имеет права упустить свои шансы занять достойное место на мировом рынке СПГ, а значит, должна предпринять для этого все необходимые действия. Для России с ее большой протяженностью внутренних водных путей очень важен вопрос доставки газа речным транспортом в отдаленные районы, где нет газопроводов. Для этого уже существуют проекты газовозов, но нужна обеспеченность необходимыми перевалочными и бункеровочными базами в акваториях рек. В европейских странах такой опыт есть [11].

Для экономии жидкого топлива на судах предложены технологии по уменьшению расхода топлива. Единственным новым видом топлива, применение которого оказывает существенное влияние на экологические показатели судовых двигателей, является природный газ. Промышленность производит все элементы, необходимые для перехода на газовое топливо на судах различного водоизмещения: двигатели, работающие на газовом топливе, криогенные ёмкости для хранения сжиженного газа, приборы-газоанализаторы. Всё это оборудование не только производится, но и уже имеет одобрение Российского морского регистра судоходства. При возникновении экономической целесообразности использование газа займёт своё место на судах. Главным препятствием на пути применения СПГ на морских судах является отсутствие инфраструктуры по бункеровке судов СПГ. Технических трудностей и нормативных ограничений по применению на судах этого вида топлива в настоящее время нет.

С позиции выбора вариантов доставки бункера на судах, не являющихся газовозами, наиболее предпочтительным представляется использование судов-бункеровщиков. В этом случае будет обеспечена большая мобильность с учетом лучших экономических и экологических условий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пронин Е. Н.* Использование сжиженного природного газа на водном транспорте / Е. Н. Пронин. — СПб., 2016. — 48 с.
2. Фрахт для СПГ-танкеров предельно снизился // *Морские вести России*. — 2016. — № 8. — С. 1.
3. *Костылев И. И.* Теплотехнический аспект морских перевозок сжиженного газа / И. И. Костылев, М. К. Овсянников, Е. Г. Орлова, Н. Е. Сивцов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2002. — 118 с.
4. *Костылев И. И.* Морская транспортировка сжиженного газа: учеб.-теор. изд. / И. И. Костылев, М. К. Овсянников. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 304 с.
5. *Шурпяк В. К.* О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания / В. К. Шурпяк, В. В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С. 191–212.
6. *Халилов Н. А.* Опыт эксплуатации двухтопливных дизелей / Н. А. Халилов, Н. А. Страхова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 2. — С. 124–127.
7. *Крестьянцев А.* Снабжение потребителей энергоносителями в замерзающих морях РФ: комплексный подход / А. Крестьянцев, А. Луцкевич // *Морской флот*. — 2016. — № 3. — С. 38–46.
8. *Крестьянцев А.* Бункеровка СПГ: в поисках оптимального решения / А. Крестьянцев // *Морской флот*. — 2013. — № 2. — С. 36–39.
9. «Газпром» и Mitsui подписали меморандум по исследованиям в области СПГ-бункеровки [Электронный ресурс]: PortNews. — Режим доступа: portnews.ru/top\_news/print/225594 (дата обращения — 22.08.16).
10. *Семенюк А. В.* Эксплуатационные режимы паротурбинной установки морского газовоза / А. В. Семенюк, С. А. Гармаш, Л. А. Семенюк // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2013. — Т. 1. — № 1 (19). — С. 45–47.
11. *Хлюпин Л. А.* Причальные устройства для заправки судов сжиженным природным газом / Л. А. Хлюпин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 125–128.

### BUNKERING OPERATIONS AS A RESTRAINING FACTOR IN NATURAL GAS USE FOR VESSEL FUELING

*The article reviews the ships bunkering with liquid natural gas (LNG), used as a ship fuel. It is noted that the economic and environmental components predetermine extension of LNG use as fuel on ships. Maritime traffic causes great harm to the environment. Marine vessels burn heavy fuel and produce large quantities of soot, sulfur oxides and nitrogen oxides, which are dangerous for health and for the environment. In addition to these the negative carbon dioxide balance - about a billion tons, or 4.5% of global carbon dioxide emissions. The struggle for zero emissions goes in all directions. From 2015, the sulfur content of marine fuel has been limited. In 2016 - limited the content of nitrogen oxides for the new vessels. The use of LNG as a fuel for marine main engines, as well as to generate electricity to meet the needs on the ship during the port stay - allows to constrain the growth of pollution and implement stricter ecological limitation of the International Maritime Organization (IMO), acting under the auspices of the UN. The ecological aspect of the transition to the use of liquefied natural gas is decisive in choosing the way of the MARPOL Convention requirements implementation. The economic advantages of LPG use allow within a reasonable time to recoup the costs of vessel adaptation to LNG fuel, new technological equipment acquiring and the cost of bunkering. Suffice serious problem is the question of the infrastructure creation for LNG bunkering operations. The conclusion made is that the use of bunker ships being a preferred method of safe and mobile delivery of the LNG fuel from the shore terminals and offshore storage vessels to the LNG fueled ship. Brought examples of the special vessels and terminals construction.*

*Keywords: LNG, gas carrier, natural gas, ship bunkering operations, LNG bunkering terminals and vessels, bunker ship, gas fueled ship, MARPOL, ecology, emissions, Energy Efficiency Design Index.*

## REFERENCES

1. Pronin, E. N. *Ispolzovanie szhizhennogo prirodnogo gaza na vodnom transporte*. SPb., 2016.
2. "Fraht dlja SPG-tankerov predelno snizilsja." *Morskije vesti Rossii* 8 (2016): 1.
3. Kostylev, I. I., M. K. Ovsjannikov, E. G. Orlova, and N. E. Sivcov. *Teplotehnicheskij aspekt morskikh perevozok szhizhennogo gaza*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2002.
4. Kostylev, I. I., and M. K. Ovsjannikov. *Morskaja transportirovka szhizhennogo gaza: ucheb.-teoret. izd.* SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009.
5. Shurpjak, V. K., and V. V. Grishkin. "O konstruktivnom kojefficiente jenergeticheskoi jeffektivnosti sudov ledovogo plavanija." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 36 (2013): 191–212.
6. Khalilov, Nuriy Akkievich, and Nina Andreevna Strakhova. "Operation experience of ship dual-fuel diesels." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2011): 124–127.
7. Krestjancev, A., and A. Luckevich. "Snabzhenie potrebitelej jenergonositeljami v zamerzajushhij morjah RF: kompleksnyj podhod." *Morskoj flot* 3 (2016): 38–46.
8. Krestjancev, A. "Bunkerovka SPG: v poiskah optimalnogo reshenija." *Morskoj flot* 2 (2013): 36–39.
9. «Gazprom» i Mitsui podpisali memorandum po issledovanijam v oblasti SPG-bunkerovki. Web. 22 Aug. 2016 <portnews.ru/top\_news/print/225594>.
10. Semenjuk, A. V., S. A. Garmash, and L. A. Semenjuk. "Jekspluatacionnye rezhimy paroturbinnogo ustanovki morskogo gazovoza." *Morskije intellektualnye tehnologii* 1.1(19) (2013): 45–47.
11. Hljupin, L. A. "Mooring facilities for refueling of vessels liquefied natural gas." *Vestnik Gosudarstvenno universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 125–128.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Костылев Иван Иванович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*kostylevii@gumrf.ru*  
*Коняев Дмитрий Викторович* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_tckvu@gumrf.ru*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kostylev Ivan Ivanovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kostylevii@gumrf.ru*  
*Konjaev Dmitrij Viktorovich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_tckvu@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 23 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150  
УДК 629.12.002 + 620.9

**А. В. Вольнцев,**  
**А. Н. Соболенко**

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена возможность использования теплового насоса и теплообменного аппарата в системе отопления судна. Эффективное замещение в топливном балансе систем судового теплоснабжения ископаемых видов топлива на практически неисчерпаемые ресурсы низкопотенциального тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием теплонасосной установки является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды. Показан принцип работы теплонасосной установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного двигателя. Особенностью использования теплового насоса является то, что источник вторичной теплоты имеет более



*высокую температуру, чем потребитель. Энергетическая эффективность главных судовых установок может быть повышена более полной утилизацией вторичных энергоресурсов за счет применения тепловых насосов. Проведен анализ возможности обеспечения теплом судовых потребителей на ходовом режиме судна при использовании теплонасосной установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного двигателя. Предложенный вариант применения теплонасосной установки в качестве альтернативного источника получения тепла на судне позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту дизеля, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды, во-вторых, отказаться от работы вспомогательного котла на ходовом и, возможно, стояночном режимах судна, а, следовательно, сэкономить невозобновляемые источники энергии. Доказано, что внедрение теплонасосных систем теплохолодоснабжения является весьма эффективным инструментом энергосбережения для судов морского флота, позволяющим не только обеспечить экономию энергоресурсов у потребителя, но и существенным образом снизить нагрузку на централизованную систему энергосбережения судна, а также сократить выбросы в окружающую атмосферу продуктов сгорания традиционного органического топлива.*

*Ключевые слова: тепловой насос, хладагент, главный двигатель, низкопотенциальная теплота, отходы теплоты.*

## Введение

В условиях наметившейся переориентации теплоэнергетического хозяйства страны на развитие низкотемпературных централизованных и смешанных систем теплоснабжения роль тепловых насосов возрастает, что требует разработки новых научно обоснованных подходов к их широкому применению в различных областях. Эффективное замещение в топливном балансе систем судового теплоснабжения ископаемых видов топлива на практически неисчерпаемые ресурсы низкопотенциального тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием теплового насоса является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды. Тепловая мощность действующего в мире парка тепловых насосов различного типа оценивается в 250 ГВт с годовой выработкой теплоты 1,0 млрд Гкал, что соответствует замещению органического топлива в объеме до 80 млн т в год. По прогнозам Мирового энергетического комитета, к 2020 г. 75 % всех систем теплоснабжения в развитых странах будут использовать тепловой насос. В России установленная мощность тепловых насосов с конца 80-х гг. XX в. по настоящее время не превышает 65 МВт, что явно не соответствует потенциальным возможностям применения этой технологии в условиях наметившейся ориентации национальной экономики на энергосбережение [1].

Обрабатывающие суда и значительная часть добывающих судов для переработки морепродуктов оснащены мощными вспомогательными котлами и электростанциями и только немногие из них имеют утилизационные котлы. Так, количество добывающих судов водоизмещением более 1000 т, оборудованных утилизационными паровыми котлами, в настоящее время составляет всего около 2 % от общего их числа. Кроме того, из-за высокой энерговооруженности добывающих судов возникают затруднения с размещением утилизационных котлов на ограниченной площади машинно-котельных отделений. При использовании теплового насоса возможен отказ от работы вспомогательной котельной установки на ходовом и, возможно, стояночном режимах судна, а, следовательно, есть возможность снизить загрязнение окружающей среды токсичными компонентами и сэкономить невозобновляемые источники энергии [2].

Утилизация вторичных тепловых ресурсов судового главного двигателя традиционно является одной из основных технологий повышения эффективности комплексного использования топлива для судовых энергетических установок. Теоретические исследования и разработки систем повторного использования теплоты главного двигателя (ГД), в первую очередь судовых дизельных установок, были успешно реализованы на большом числе морских судов. Однако на сегодняшний день ситуация с утилизацией теплоты судовых дизельных установок на промышленном и морском транспорте качественно изменилась. Повышение коэффициента полезного действия ГД (КПД современных малооборотных судовых ГД составляет 48 – 51 %), и снижение удельного расхода то-

плива современных судовых дизелей сопровождается перераспределением статей их теплового баланса (в частности, уменьшением потерь с выпускными газами и снижением температуры при одновременном возрастании доли теплоты, отводимой в охладителе наддувочного воздуха [3]). Эти факторы в совокупности резко снижают эффективность традиционных схем утилизации теплоты. Становится затруднительным одновременное обеспечение паром как подогревателей различных сред на судне (перечень основных потребителей тепловой энергии и требуемые ее температурные уровни приведены в таблице), так и утилизационного турбогенератора, что приводит к необходимости ввода в работу вспомогательного парового котла.

#### Температурные уровни греющих и нагреваемых сред для судового оборудования

Потребитель теплоты	Температура подогреваемой среды, °С	Температура греющей среды, °С	Греющая среда	Давление пара, МПа
1. Подогреватель тяжёлого топлива ГД	150	170 ... 180	Пар	0,8
2. Система отопления, зимнего кондиционирования, подогревателя воздуха	20 ... 40	70 ... 140	Вода, пар	До 0,4
3. Хозяйственно-бытовые нужды	–	70 ... 140	Вода, пар	До 0,4
4. Абсорбционно-холодильные установки	–	80 ... 140	Вода, пар	До 0,4
5. Подогрев груза для судов типа танкер (нефть)	40 ... 70	80 ... 140	Вода, пар	До 0,4
6. Система обогрева цистерн топлива, масла, пропаривания кингстонных ящиков, подогреватели воды	50 ... 80	80 ... 110	Вода, пар	До 0,2
7. Опреснители воды	–	55 ... 70	Вода	–

#### Основная часть

Вспомогательные судовые паровые котлы служат для обеспечения паром вспомогательных механизмов, отопления помещений, где в качестве ГД установлены двигатели внутреннего сгорания. Вариантом решения этой проблемы может рассматриваться применение на судах теплонасосных паропроизводящих установок для выработки водяного пара, у которых источником потребляемой теплоты низкого потенциала (в испарителе) являлись бы вторичные тепловые ресурсы ГД. Это позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды и, во-вторых, отказаться от работы вспомогательного котла на ходовом режиме судна, а, следовательно, экономить невозобновляемые источники энергии (котельное топливо) [4].

Направление утилизации вторичных тепловых ресурсов судовой дизельной установки для производства водяного пара посредством использования теплонасосной паропроизводящей установки в научно-технической литературе ранее уже рассматривалось [5]. Представлена схема работы теплонасосной установки (ТНУ) теплоутилизующего контура на низкокипящих рабочих телах (рис. 1) для получения водяного пара давлением 0,2 МПа и выше за счет теплоты наддувочного воздуха и охлаждающей воды ГД. Теплообменники *И1* и *И2* здесь являются испарителями теплового насоса, а образование водяного пара происходит в конденсаторах (*Кд*). При этом возможна компрессорная (см. рис. 1, *а*) или комбинированная эжекторно-компрессорная ТНУ (см. рис. 1, *б*). В первом случае в качестве рабочего тела ТНУ использовались высококипящие жидкости (например, хладон R114), во втором — хладон R22, так как R114 и R22 попадают под ограничения, накладываемые Монреальским протоколом [6]. Требования по защите окружающей среды и

энергетической безопасности мотивируют к использованию низкотемпературного тепла. Это позволит уменьшить зависимость от добываемого топлива. Для более эффективной работы ТНУ предлагается использовать хладоны R-410A, R-407C, R-134a, R-1336mzz (Z), которые используются в водогрейных тепловых насосах. Хладон R-1336mzz (Z) (МЕТИЛАЛЬ) является негорючим, он стабилен при высоких значениях температуры, несмотря на его ненасыщенную химическую структуру, возможно, из-за стабилизации двойной связи в результате сильной электроотрицательности группы CF<sub>3</sub> [7].

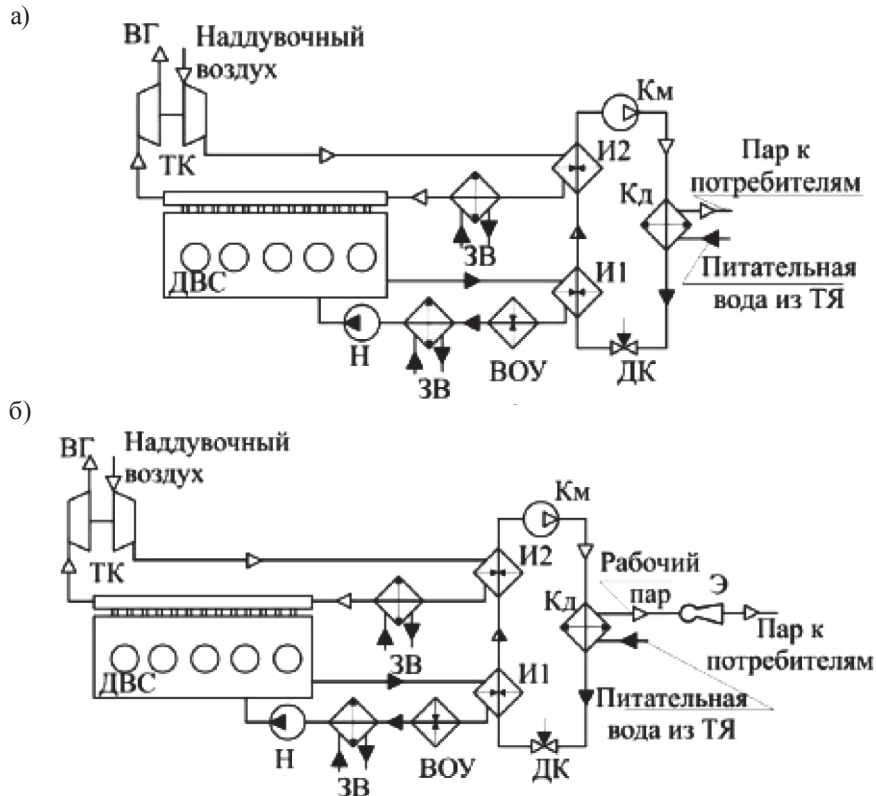


Рис. 1. Схемы теплоутилизирующих контуров для получения водяного пара:  
 а — компрессорный контур; б — комбинированный эжекторно-компрессорный контур;  
 ВГ — выхлопные газы; ТК — турбокомпрессор; ЗВ — забортная вода; И1, И2 — испарители;  
 Км — компрессор теплового насоса; Кд — конденсатор; ТЯ — теплый ящик; Э — эжектор;  
 ДК — дроссельный клапан; ВОУ — водоопреснительная установка;  
 Н — насос; ДВС — двигатель внутреннего сгорания

Целью исследования является определение целесообразных путей и технической возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей в ходовом режиме при использовании теплонасосной паропроизводящей установки. Выбор параметров работы теплонасосной установки определяется, с одной стороны, параметрами охлаждающей воды двигателя внутреннего сгорания, являющейся источником низкопотенциального тепла, а с другой — наличием на судне потребителей пара, в первую очередь, подогревателей груза. Анализ параметров пятидесяти двух судовых потребителей тепловой энергии показывает, что они могут быть разделены на три основные группы: первая группа — судовые потребители, использующие водяной пар низкого (0,3 МПа), вторая группа — судовые потребители, использующие водяной пар среднего (0,5 МПа) и третья группа — судовые потребители, использующие водяной пар высокого (до 0,9 МПа) давления [8]. Первоначально рассматривалась работа теплонасосной установки с получением пара всех трех параметров. Однако, учитывая возможность термического разложения хладонов, являющихся рабочим телом теплонасосной установки, а также с целью упрощения установки окончательно была принята схема (рис. 2). При этом предполагалось, что водяной

пар давлением 0,9 МПа вырабатывается в традиционном утилизирующем водяном котле (рис. 2) за счет теплоты отводимых газов главного судового двигателя [9].

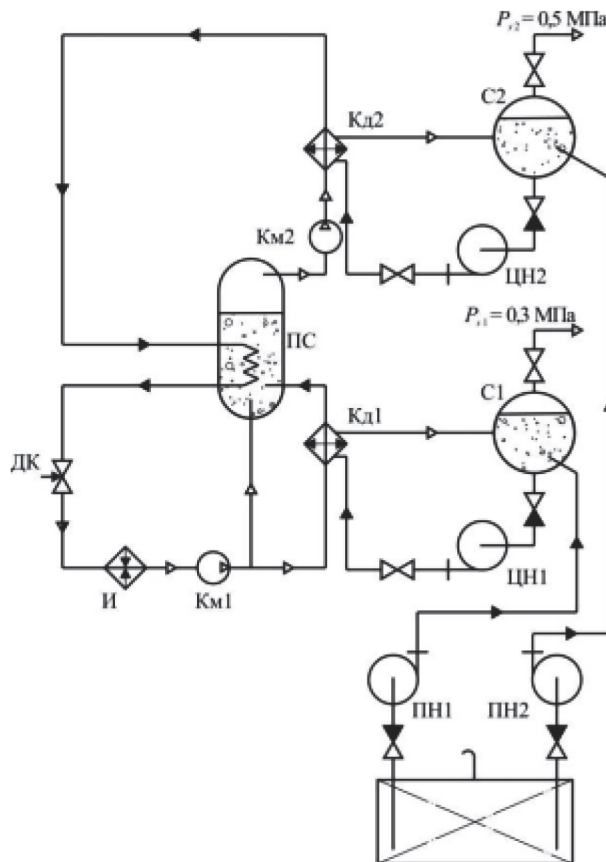


Рис. 2. Принципиальная схема теплонасосной паропроизводящей установки двух давлений с использованием водяного котла (цифры 1 и 2 в конце обозначений соответствуют аппаратам первой и второй ступени): ДК — дроссельный клапан; И — испаритель; Кд — конденсатор; Км — компрессор; ПН — водяной питательный насос; ПС — промежуточный сосуд; С — сепаратор водяного пара; ЦН — водяной циркуляционный насос

Наибольший температурный потенциал среди источников низкопотенциального тепла имеет пресная вода, охлаждающая втулки цилиндров. Это делает её наиболее предпочтительным источником низкопотенциального тепла для работы теплонасосной установки. Схема совместного подключения к этой системе водоопреснительной установки и теплонасосной установки для утилизации теплоты приведена на рис. 3 [10].

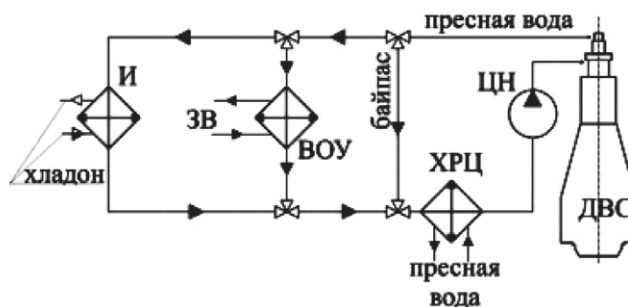


Рис. 3. Схема подключения испарителя теплонасосной установки, к системе охлаждения главного двигателя: И — испаритель теплового насоса; ЗВ — забортная вода; ВОУ — водоопреснительная установка; ХРЦ — холодильник системы охлаждения рубашки цилиндров ДВС; ЦН — циркуляционный насос



### Выводы

1. Наиболее предпочтительным источником утилизации тепловых ресурсов главного судового двигателя (низкопотенциального тепла) для работы теплонасосной установки является пресная вода, охлаждающая рубашки цилиндров ГД, имеющая температуру на выходе из дизеля 80 ... 85 °С. Количество теплоты этого источника является достаточным для одновременной работы ТНПУ и ВОУ.

2. Применение теплонасосной установки на морских судах оправдывает использование теплового эффекта как первичного агента для нагрева помещения, воды, рабочих и технических жидкостей (мазут, дизельное топливо и т. д.), так и вторичного как холодильного агента для охлаждения рабочих, производственных и бытовых помещений личного состава, а также для охлаждения продуктов питания и отвода тепла паропроизводящей установки от рабочих жидкостей двигателя внутреннего сгорания. Благодаря образуемому конденсату возможно получение дистиллированной воды.

3. Внедрение теплонасосных систем теплохолодоснабжения является весьма эффективным инструментом политики энергосбережения для судов промыслового и морского флота, позволяющим не только обеспечить экономию энергоресурсов у потребителя, но и существенным образом снизить нагрузку на централизованную систему энергосбережения судна, а также сократить выбросы в окружающую атмосферу продуктов сгорания традиционного органического топлива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елистратов С. Л.* Комплексное исследование теплонасосных установок: диссертация / С. Л. Елистратов. — Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, 2010. — 383 с.
2. *Соболенко А. Н.* Судовые энергетические установки: дипломное проектирование / А. Н. Соболенко, Р. Р. Симашов. — М.: Моркнига, 2015. — Ч. 2. — 426 с.
3. *Андреев А. А.* Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок / А. А. Андреев, В. С. Самохвалов, Д. Н. Смагин, В. С. Цвиклис // Зб. наук. пр. УДМТУ. — 2002. — № 5 (283). — С. 66–76.
4. *Калиниченко И. В.* Теплонасосное направление утилизации вторичных тепловых ресурсов судовой энергетической установки / И. В. Калиниченко, А. А. Андреев // Науковий вісник ХДМІ. — 2009. — № 1 (1). — С. 174–183.
5. *Радченко Н. И.* Теплоутилизирующие контуры на низкокипящих рабочих телах для ДВС / Н. И. Радченко, А. А. Сирота // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2002. — Вип. 31. — С. 17–19.
6. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/montreal\\_prot.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml) (дата обращения – 10.09.16)
7. *Kontomaris K.* Global Technology Leader – Working Fluids & Foam Expansion Agents / K. Kontomaris / IEA Heat Pump Centre Newsletter. — 2016. — Volume 34. — No. 1/2016 (39). — Pp. 4–5.
8. *Андреев А. А.* Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками / А. А. Андреев, Ю. В. Захаров, И. В. Калиниченко, В. И. Максимов // Зб. наук. пр. УДМТУ. — 2005. — № 2 (401). — С. 70–79.
9. *Калиниченко И. В.* Получение пара на судне тепловым насосом. / И. В. Калиниченко, А. А. Андреев, Н. Б. Андреева // Водный транспорт. — 2015. — № 2 (23). — С. 48–57.
10. *Волынцев А. В.* Теплонасосная установка для использования на судах промыслового флота / А. В. Волынцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 121–125.

### UTILIZATION OF MAIN SHIP ENGINE HEAT RESOURCES BY MEANS OF HEAT PUMP INSTALLATION USAGE

*The possibility of using a heat pump and a heat exchanger in a heating vessel. Effective substitution in fuel balance of marine heating systems on fossil fuels is practically inexhaustible resources of low-grade heat of renewable and secondary sources of heat using a topical trend of energy saving and environmental protection.*

Shows the principle of the heat pump system dispose of low-potential secondary thermal resources of the main engine. A feature of the heat pump is that a secondary source of heat has a higher temperature than the consumer. Energy efficiency of main marine plants can be increased more complete utilization of secondary energy resources through the use of heat pumps. The analysis of the possibility of providing heat to the consumers of marine vessel navigating mode when using the heat pump system, heat-utilizing low-potential secondary resources of the main engine. The proposed variant of the use of the heat pump system as an alternative source of heat on the ship would have allowed, first, to dispose of the discharged heat of the diesel, thus reducing thermal pollution of the environment, and secondly, to abandon the operation of the auxiliary boiler on the navigation mode, and possibly parking modes of the vessel and, thus saving non-renewable sources of energy. It is proved that the introduction of heat pump heating and cooling system is extremely effective energy-saving tool for Navy ships, which allows not only to provide energy savings at the consumer, but also the sous-nificant way to reduce the burden on centralized energy saving system of the vessel, as well as to reduce emissions to the ambient atmosphere of the combustion of traditional products fossil fuels.

Keywords: Heat pump, refrigerant, the main engine, low-grade heat, heat waste.

## REFERENCES

1. Elistratov, S. L. Kompleksnoe issledovanie teplonasnykh ustanovok. Diss. Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze, 2010.
2. Sobolenko, A. N., and R. R. Simashov. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki: diplomnoe proektirovanie*. M.: Morkniga, 2015. Ch. 2.
3. Andreev, A. A., V. S. Samohvalov, D. N. Smagin, and V. S. Cviklis. "Sovremennoe sostojanie sistem glubokoj utilizacii vtorichnykh jenergoresursov sudovykh dizelnykh jenergeticheskikh ustanovok." *Zb. nauk. pr. UDMTU* 5(283) (2002): 66–76.
4. Kalinichenko, I. V., and A. A. Andreev. "Teplonasosnoe napravlenie utilizacii vtorichnykh teplovykh resursov sudovoj jenergeticheskoj ustanovki." *Naukovij visnik HDMI* 1(1) (2009): 174–183.
5. Radchenko, N. I., and A. A. Sirota. "Teploutilizirujushhie kontury na nizkokipjashhix rabochih telax dlja DVS." *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija* 31 (2002): 17–19.
6. Monrealskij protokol po veshhestvam, razrushajushhim ozonovyj sloj. Web. 10 Sept. 2016 <[http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/montreal\\_prot.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml)>.
7. Kontomaris, K. "Global Technology Leader – Working Fluids & Foam Expansion Agents." *IEA Heat Pump Centre Newsletter* 34.1(39) (2016): 4–5.
8. Andreev, A. A., Ju. V. Zaharov, I. V. Kalinichenko, and V. I. Maksimov. "Ocenka jeffektivnosti utilizacii teploty sudovykh glavnykh dizelej teplonasosnymi paroproizvodjashhimi ustanovkami." *Zb. nauk. pr. UDMTU* 2(401) (2005): 70–79.
9. Kalinichenko, I., A. Andreev, and N. Andreeva. "Producing steam of heat pumps on ships." *Vodnyj transport* 2(23) (2015): 48–57.
10. Volyntsev, A. V. "Energetically effective use of heatpump installation in courts of fishing fleet." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 4 (2015): 121–125.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волынцев Александр Владиславович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Соболенко Анатолий Николаевич.  
Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет  
[gold125@list.ru](mailto:gold125@list.ru)  
Соболенко Анатолий Николаевич —  
доктор технических наук, профессор.  
Морской государственный университет  
им. адм. Г.И. Невельского  
[sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volintsev Aleksandr Vladislavovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Sobolenko Anatolij Nikolaevich.  
Far Eastern State Technical  
Fishery University  
[gold125@list.ru](mailto:gold125@list.ru)  
Sobolenko Anatolij Nikolaevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Marine State University named  
after G.I. Nevelskoy  
[sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.

## **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОТЛИВКИ ПОРШНЯ ИЗ СПЛАВА АК12М2МГН (АЛ25) НА ЗАДИРООБРАЗОВАНИЕ В ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЕ**

*В статье приводятся результаты экспериментального исследования причин образования задиров в деталях цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания, у которых поршень изготовлен из отливки сплава АК12М2МгН (АЛ25) ГОСТ 1583-93. Поршневой сплав АК12М2МгН (АЛ25) относится к эвтектическим легированным силуминам, и при температуре 750 °С все компоненты сплава находятся в жидком виде. При затвердевании сложнолегированного сплава АК12М2МгН (АЛ25) в отливке возникает химическая неоднородность в направлении оси поршня сверху вниз, в радиальном направлении от наружной поверхности к центру, при движении по окружности в горизонтальном сечении. В объеме поршня отклонение по химическому составу от ковшевой пробы по кремнию составляет 24,6 %, по меди — 24 %, по марганцу — 148 %, по железу — 492 %. Ликвация приводит к изменению механических и физических свойств металла: плотности, коэффициента термического расширения, теплопроводности, вызовет различную величину теплового зазора между поршнем и втулкой от головки до юбки. Возникновение задира в цилиндропоршневой группе является результатом воздействия нескольких факторов, способствующих снижению теплового зазора между втулкой и поршнем за счет некачественной сборки цилиндропоршневой группы, низкого качества поршневых колец, неправильной настройки топливной аппаратуры, нарушение теплового режима обкатки двигателя при переходе на повышенную мощность. Снижение влияния ликвации на однородность свойств в пределах поршня возможно при объемной кристаллизации при повышении равномерности структуры за счет снижения перегрева металла над линией ликвидус и уменьшении выдержки металла на стенде перед разливкой. Термическая обработка не устраняет эффект от ликвации, но стабилизирует размеры поршня при циклических перегревах.*

*Ключевые слова: цилиндропоршневая группа, химическая неоднородность, отливка, ликвация, сплав, заDIR, перекоС поршня, тепловой зазор, коэффициент термического расширения, теплопроводность, топливная аппаратура.*

### **Введение**

Во время сдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при определении энергосиловых параметров в режиме повышенной мощности в ряде случаев возникает резкое падение оборотов с выбросом белого дыма через трубу отвода картерных газов и вынужденная остановка двигателя. После выемки поршня из цилиндра обнаруживается заDIR всей тронковой части с наволакиванием металла на поршневые кольца, смещение замков колец, повреждение колец и втулки [1]. При хорошей смазке цилиндра и сбалансированной инерционной системе двигателя цилиндропоршневая группа (далее — ЦПГ) работает в области контролируемого трения-скольжения. Однако достаточно кратковременного нарушения смазки, чтобы в данном месте появились условия сухого трения, а также возникло адгезионное взаимодействие трущихся деталей: поршня, колец и втулки. В зонах контакта резко возрастает интенсивность тепловыделения, мгновенно повышается температура до 2000 °С, а быстрый теплоотвод обеспечивает схватывание металла [2].

ЗаDIRообразование в узлах трения ЦПГ в первом приближении связано с перекоСом поршня. Во время работы двигателя его узлы и детали испытывают механические нагрузки, вызванные силами расширяющихся газов в цилиндре, силами инерции поступательно движущихся масс и центробежными силами инерции неуравновешенных вращающихся масс. Каждая из указанных сил, совместно с силами трения колец о втулки, образует опрокидывающие моменты относительно оси пальца, горизонтальной и вертикальной оси, которые способствуют перекоСу в движении

поршня и образованию задира [3]. Таким образом, целью настоящей работы является исследование причин образования задиров в узлах трения деталей цилиндропоршневой группы ДВС.

### Исследование причин задириобразования в деталях цилиндропоршневой группы

Исследование причин задириобразования было проведено на ДВС, у которого поршень изготовлен из отливки сплава АК12М2МгН (АЛ25) (ГОСТ 1583-93) весом 105 кг, в том числе заготовка весит 60 кг, литниковая система — 35 кг, масса готового поршня — 42 кг; втулка изготовлена из серого перлитного чугуна, кольца отлиты из серого чугуна с хромовым покрытием (см. рисунок). Заготовка поршня получена литьем в кокиль.



Отливка поршня вместе с литниковой системой

После сборки ДВС подвергался обкатке при различных нагрузках в течение определенного времени и с помощью визуально-измерительного контроля анализировалось состояние поршня, втулки и колец. Результаты визуально-измерительного контроля, режим и время обкатки, а также тепловой режим приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Условия образования задиров и характеристика состояния деталей ЦПГ

Время работы, мин	Режим обкатки, мощность, кВт	Состояние поршня	Состояние втулки	Состояние колец	Работа форсунок, распыление топлива	Тепловой режим, Т °С	
						масла	воды
10	870	Продольные риски с одной стороны на тронке	Продольные риски	Одностороннее смещение замков колец, острая кромка	Распыление туманообразное	55	65
7	850	Продольные риски с двух сторон на тронке	Продольные риски	Острая кромка, отсутствие фаски	Распыление туманообразное	51	69
10	850	Продольные риски с двух сторон на тронке	Продольные риски	Острая кромка, смещение замков	Распыление струйное	53	78
5	800	Продольные риски с двух сторон на тронке	Продольные риски	Острая кромка, смещение замков	Распыление струйное	52	67



Таблица 1  
 (Окончание)

5	700	Продольные риски симметрично с шести сторон на тронке	Продольные риски	Острая кромка, смещение замков	Распыление туманообразное	52	65
Согласно нормам ТУ32ЦТВ325-82							
–	740 – 880	–	–	–	Распыление туманообразное	75 – 82	70 – 80

Поршни ДВС производят из серого чугуна или сложного алюминиевого сплава. К недостаткам чугунных поршней можно отнести большой вес, к достоинствам — однородность металла с кольцами и втулкой, графитизированную структуру. Главное достоинство поршней из алюминиевых сплавов состоит в том, что они легкие, плотность основы составляет  $2,7 \text{ г/см}^3$  [4]. Кроме алюминия, в сплаве содержатся тяжелые компоненты с большой плотностью и высокой температурой плавления. Поршневой сплав АК12М2МгН (АЛ25) относится к эвтектическим легированным силуминам, и при температуре  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  все компоненты сплава находятся в жидком виде. При затвердевании такого сплава в крупной отливке всегда возникает химическая неоднородность — ликвация, которая создает анизотропию механических и физических свойств, способствующих перекосу поршня [5] – [7].

Распределение химических элементов в отливке поршня определяли химическим и спектральным методами на образцах, отобранных в процессе разлива из ковша, от прибыли литниковой системы в начале, в середине и в конце разлива. Отбирали стружку послойно с поверхности отливки к осевой зоне, в головке поршня, в зоне пальца и юбки. Одновременно отбирали образцы для макроконтроля, механических свойств и плотности, которую определяли методом гидростатического взвешивания. Полученные результаты химического анализа с указанием места отбора проб представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Распределение химических элементов в отливке поршня из сплава АК12М2МгН (АЛ25)**

Место отбора проб	Содержание элементов в %						
	Mg	Si	Mn	Cu	Ni	Fe	Ti
Ковш	1,09	12,40	0,42	2,00	1,12	0,80	0,10
Прибыль	1,11	12,80	0,26	2,01	1,00	0,62	0,10
Литник	1,13	12,60	0,27	2,20	1,08	0,67	0,08
Юбка	1,30	15,00	0,29	2,00	1,20	0,60	0,07
Палец	1,38	15,10	0,25	2,20	1,15	0,61	0,08
Головка	1,40	12,60	0,78	1,96	1,19	1,56	0,20
Содержание элементов в сплаве АК12М2МгН (АЛ25) по ГОСТ 1583-93	0,80 – 1,30	11,0 – 13,0	0,30 – 0,60	1,50 – 3,00	0,80 – 1,30	до 0,80	0,05 – 0,20

По результатам анализа (см. табл. 2) выявлены изменения концентрации элементов по объему поршня:

- в направлении оси поршня сверху вниз;

- в радиальном направлении от наружной поверхности к центру;
- при движении по окружности в горизонтальном сечении.

При кокильной отливке на холодных стенках и металлической трубке — там, где быстро остывает расплав, в первую очередь затвердевают элементы с высокой температурой кристаллизации. В горячих местах скапливаются легкоплавкие металлы. В объеме поршня отклонение по химическому составу от ковшевой пробы по кремнию может составлять 24,6 %, по меди — 24 %, по марганцу — 148 %, по железу — 492 %. Эти отклонения наблюдаются в средней части головки поршня в зоне пальца и бобышек [8], [9]. В нашем исследовании отклонение химического состава от ковшевой пробы в среднем составляет:

- по кремнию: в головке поршня — 2 %, в районе поршневого пальца — 18 %;
- по меди: в головке поршня — 2 %, в районе поршневого пальца — 9 %;
- по марганцу: в головке поршня — 46 %, в районе поршневого пальца — 68 %;
- по железу: в головке поршня — 49 %, в районе поршневого пальца — 32 %.

После затвердевания металла сплав является пересыщенным твердым раствором. Для стабилизации размеров и механических свойств требуется термическая обработка в различных сочетаниях (закалка, старение и отжиг). Стабилизация размера поршня наступает, когда заканчивается процесс распада твердого раствора и концентрация легирующих элементов в нем будет соответствовать равновесной [8].

Способность металла обеспечивать стабильность размеров поршня в условиях циклических нагревов обусловлена постоянством коэффициента линейного расширения в интервале рабочих температур двигателя. В данном сплаве на коэффициент линейного расширения влияют все элементы, причем действия компонентов суммируется в соответствии с их концентрацией. Основное влияние на изменение размеров поршня от температуры оказывает кремний, так как его коэффициент линейного расширения в шесть раз ниже, чем у алюминия [10], [11].

Стабилизирующая термообработка для заготовок поршней состояла в старении металла — четырехкратном нагреве на 210 °С (с целью выделения второй фазы из твердого раствора) и отжиге при температуре 300 °С, после которого пластичность литого металла возросла от 0,8 % до 3 %, твердость понизилась от 110 НВ до 85 НВ.

Проверку изменения линейных размеров поршневого сплава АК12М2МгН (АЛ25) в зависимости от температуры провели на образцах правильной формы и непосредственно на поршне после черновой обдирки и термической обработки. Поршень загружали в разогретую печь, после выдержки измеряли температуру контактным термометром и определяли диаметр в трех поясах. По результатам замеров определены коэффициенты линейного расширения и зависимости изменения диаметра поршня от температуры в интервале от 20 °С до 450 °С. Также определен максимальный прирост диаметров при температуре 350 °С в различных зонах поршня. Результаты замеров диаметра поршня и коэффициенты линейного расширения приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Диаметры поршня и коэффициенты линейного расширения  
в интервале от 20 °С до 450 °С**

Место замеров диаметра	Зависимость диаметра от температуры в диапазоне температур от 20 °С до 450 °С	Максимальный прирост диаметра при 350 °С	Коэффициент линейного расширения (мм / °С)
Диаметр у края юбки поршня	$Y=0,0079X+342$	2,8 мм	$23,0 \cdot 10^{-6}$
Диаметр под отверстием для пальца	$Y=0,0076X+340$	2,5 мм	$22,0 \cdot 10^{-6}$
Диаметр у края головки поршня	$Y=0,0074X+339$	1,6мм	$15,3 \cdot 10^{-6}$

Значение коэффициента линейного расширения и увеличение диаметра поршня возрастают в направлении от головки к юбке, что вполне согласуется с распределением легирующих элементов в отливке. В связи с этим наибольшую опасность задириобразования в деталях ЦПГ можно отнести к тепловому зазору в зоне юбки. В общем случае изменение теплового зазора в сопряжении поршень – втулка при разогреве двигателя выражается формулой [12]:

$$\Delta S = S_0 - S = D | (t_n - t_0) \alpha_n - (t_r - t_0) \alpha_r |,$$

где  $S_0$  — холодный зазор;  $S$  — зазор в номинальном режиме;  $D$  — диаметр поршня по юбке;  $t_n$  — температура данной зоны поршня;  $t_r$  — температура соответствующей зоны втулки, которая контактирует с данной зоной поршня в нижней мертвой точке;  $t_0$  — начальная температура;  $\alpha_n$  — средний коэффициент линейного расширения поршня;  $\alpha_r$  — средний коэффициент линейного расширения втулки.

Для нормальной работы двигателя необходимо, чтобы зазор в сопряжении поршень-втулка не менялся при прогреве двигателя до рабочей температуры и оставался постоянным в процессе эксплуатации.

Анализ формулы показывает, что максимальное изменение зазора происходит, когда поршень быстро нагревается, а втулка остается холодной. У сплава АК12М2МгН (АЛ25) теплопроводность выше, чем у чугуна в 3,5 раза. Такая ситуация способствует образованию задири, которые могут возникнуть при прорыве газов в картер, перегреве поршня, ухудшении теплопередачи через поршневые кольца, вследствие потери контакта со втулкой из-за температурной деформации и через масло [13].

Двигатель предназначен для работы при разных мощностях и очевидно, что минимально допустимый тепловой зазор предусмотрен на режимах с максимальной мощностью. Учитывая, что теплопроводность алюминиевого поршневого сплава выше, чем у чугуна, поршень разогревается быстрее и расширяется, в то время как втулка еще сохраняет свои размеры. Ступенчатый подвод тепла и запоздалое расширение втулки не сказываются при работе на малой мощности, если зазор «втулка – поршень» большой. Но когда зазор близок к минимальному или является различным по высоте поршня, быстрое повышение тепловой нагрузки может привести к снижению теплового зазора до критических значений и вызвать задири тронковой части поршня. Поэтому наиболее благоприятным моментом задири являются первые минуты работы двигателя после увеличения мощности, если двигатель недостаточно прогрет.

Во всех случаях задири отмечен краевой износ поршневых колец (толщина кольца уменьшилась на 0,5 – 0,6 мм) и вместо фаски образовалась острая кромка. Кроме того, расположение замков колец относительно друг друга не соответствует 120°, они смещены в одну сторону, что не обеспечивает герметичность камеры сгорания и способствует прорыву картерных газов через сапун. Имеет место струйное распыление топлива вместо туманообразного, что приводит к локальному перегреву головки поршня, изменению ее формы от цилиндрической до овальной [14].

### Заключение

Таким образом, анализ стендовых испытаний ДВС и условий возникновения ликвации при кристаллизации заготовки поршня, изготовленной литьем в кокиль, а также последующей термической обработки заготовок позволил установить следующее.

1. При обкатке ДВС после проведенного ремонта в условиях Астраханского тепловозоремонтного завода наблюдалось возникновение рисков (царапин и задири) в узлах трения деталей цилиндропоршневой группы. Возникновение задири является результатом воздействия многих факторов, способствующих перекоосу поршня. В связи с этим мероприятиями по ликвидации задири могут служить: контроль качества изготовления комплектующих (качество поршневых колец и покрытий); контроль качества сборки деталей ЦПГ; правильная настройка топливной аппаратуры (исключающая струйный распыл топлива); контроль теплового зазора в начале обкатки двигателя; увеличение времени обкатки при малой и средней нагрузке для прогрева двигателя перед выходом на режим максимальной мощности.

2. В настоящем исследовании установлено отклонение химического состава сплава АК12М2МгН (АЛ25) в объеме поршня от ковшовой пробы, которое в среднем составляет:

- по кремнию: в головке поршня — 2 %, в районе поршневого пальца — 18 %;
- по меди: в головке поршня — 2 %, в районе поршневого пальца — 9 %;
- по марганцу: в головке поршня — 46 %, в районе поршневого пальца — 68 %;
- по железу: в головке поршня — 49 %, в районе поршневого пальца — 32 %.

Химическая неоднородность при затвердевании сплава АК12М2МгН (АЛ25) вызвала вертикальную и горизонтальную асимметрию плотности материала — смещение центра тяжести; изменение механических свойств на поверхности и в осевой зоне; изменение коэффициентов линейного расширения и теплопроводности в различных зонах поршня. Ликвация в поршне сплава АК12М2МгН (АЛ25) носит не случайный характер, а подчиняется объективным законам и происходит при литье каждого поршня. Возможность управления ликвацией во время кристаллизации состоит в том, чтобы коэффициент распределения химических элементов был близок к равновесному. Это достигается высокой скоростью объемной кристаллизации. Для получения качественных отливок с мелкозернистой структурой и минимально возможной ликвацией в объеме поршня необходимо выполнить два условия: не перегревать сплав более чем на 10 °С над линией ликвидус и не передерживать металл на стенде перед разливкой более 10 мин. Тогда твердые микрочастицы кремния обеспечивают мелкокристаллическую структуру, а зональная ликвация тяжелых и более тугоплавких легирующих элементов не успеет произойти [15].

3. После проведения рекомендуемой стабилизирующей термообработки для заготовок поршней, которая состояла в старении металла — четырехкратном нагреве на 210 °С (с целью выделения второй фазы из твердого раствора) и отжига при температуре 300 °С, после которого пластичность литого металла возросла от 0,8 % до 3 %, твердость понизилась от 110 НВ до 85 НВ, проводилось измерение линейных размеров поршней из сплава АК12М2МгН (АЛ25) в зависимости от температуры его нагрева. Результаты измерений показывают, что при изменении температуры от 20 °С до 450 °С значение коэффициента линейного расширения и увеличение диаметра поршня возрастают в направлении от головки к юбке поршня, что вполне согласуется с распределением легирующих элементов в отливке.

4. При обкатке было установлено, что во всех случаях задиров отмечен краевой износ поршневых колец — толщина кольца уменьшилась на 0,5 – 0,6 мм и вместо фаски образовалась острая кромка. Кроме того, расположение замков колец относительно друг друга не соответствует 120°, они смещены в одну сторону, что не обеспечивает герметичность камеры сгорания и способствует прорыву картерных газов через сапун.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вознесенский И. В.* Судовые дизели и их эксплуатация: учебник для мореходных училищ / И. М. Вознесенский, Е. Г. Михеев. — 2-е изд. — М.: Транспорт, 1990. — 360 с.
2. *Любарский И. М.* Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. — М.: Metallurgy, 1976. — 176 с.
3. *Булгаков В. П.* Модель изнашивания трибосистемы при ударно-абразивном воздействии / В. П. Булгаков, С. С. Уксусов, Л. А. Цапко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 20–22.
4. *Пастухов И.А.* Повышение производительности обработки деталей методом искрового упрочнения / И. А. Пастухов, Н. Ю. Дударева // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2013. — № 3. — С. 92–98.
5. *Ершов Г. С.* Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья / Г. С. Ершов, Ю. Б. Бочков. — М.: Metallurgy, 1979. — 180 с.
6. *Эскин Д. Г.* Структурные факторы дендритной ликвации в алюминиевых сплавах / Д. Г. Эскин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. — 2008. — № 5. — С. 47–53.



7. Кузьмин М. П. Ликвация и повышение качества проб литейных алюминиевых сплавов / М. П. Кузьмин, М. Ю. Кузьмина // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 12 (83). — С. 210–213.

8. Зильберг Ю. Я. Алюминиевые сплавы в тракторостроении / Ю. Я. Зильберг, К. М. Хрущева, Г. Б. Генршмен. — М.: Машиностроение, 1972. — 313 с.

9. Койдан И. М. Современные технологии изготовления заготовок поршней для форсированного дизельного двигателя из поршневых алюминиевых сплавов методами тиксоформования / И. М. Койдан, А. С. Журавлев // Литье и металлургия. — 2013. — № 3S (72). — С. 42–45.

10. Орлов Н. Д. Справочник литейщика. Фасонное литье из сплавов цветных металлов / Н. Д. Орлов, В. М. Чурсин. — М.: Машиностроение, 1971. — 450 с.

11. Евстифеев В. В. Совершенствование технологии изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания / В. В. Евстифеев, А. А. Александров, А. А. Исаков // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки: материалы Международной науч.-практ. конф. — Омск: СибАДИ, 2014. — С. 240–242.

12. Овсянников М. К. Теплотехника: техническая термодинамика и теплопередача: учебник / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. — СПб.: ЭЛМОР, 1998. — 208 с.

13. Насыров Р. А. Повышение надежности работы поршней тепловозных дизелей / Р. А. Насыров. — М.: Транспорт, 1977. — 256 с.

14. Молдованов В. П. Производство поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / В. П. Молдованов, А. Р. Пикман, В. Х. Авербух. — М.: Машиностроение, 1980. — 230 с.

15. Циммерман Р. Металлургия и материаловедение / Р. Циммерман, К. Гюнтер. — М.: Металлургия, 1982. — 480 с.

## THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL HETEROGENEITY OF THE CASTING OF THE PISTON ALLOY ALSI12CU2MGN1 (AL25) THE SCORING IN THE CYLINDER-PISTON GROUP

*The article presents the experimental results of the causes of the formation of scuffing in the parts of the cylinder-piston group of internal combustion engines in which the piston is made of alloy casting of AlSi12Cu2MgNi (AL25) GOST 1583-93. Piston alloy of AlSi12Cu2MgNi (AL25) refers to the eutectic alloy silumins and at a temperature of 750°C all components of the alloy are in a liquid form. During the solidification of complex alloys of AlSi12Cu2MgNi (AL25) in casting a chemical heterogeneity arises in the direction of the axis of the piston from top to bottom, in the radial direction from the outer surface to the centre when driving on a circle in the horizontal section. The amount of piston deviation of the chemical composition of ladle samples on silicon is 24.6%, on copper is 24%, on manganese is 148% and on iron is 492%. The segregation leads to changes in mechanical and physical properties of the metal: density, thermal expansion coefficient, thermal conductivity, it would cause a different value of the thermal clearance between the piston and the bushing from the head to the skirt. The emergence of the scuffing in the cylinder-piston group is the result of several factors contributing to the reducing of the thermal gap between the bushing and the piston due to the substandard assembly of the cylinder-piston group, low quality of piston rings, improper adjustment of the fuel equipment, the violation of a thermal mode of the engine running during the transition to the increased power. The reducing of the influence of segregation on the homogeneity of properties within the piston is possible at volume crystallization by increasing the uniformity of the structure by reducing the overheating of the metal above the liquidus line and the reducing of the exposure of metal on the stand before pouring. Heat treatment does not eliminate the effect of segregation, but stabilizes the piston sizes under cyclic overheating.*

*Keywords: cylinder-piston group, chemical heterogeneity, casting, liquation, alloy, smearing, misalignment of the piston, the thermal gap, thermal expansion coefficient, thermal conductivity, fuel injection equipment.*

### REFERENCES

1. Voznesenskij, I. V., and E. G. Miheev. *Sudovye dizeli i ih jekspluatacija. Ucheb. dlja morehod. uchilishh.* 2-d ed. M.: Transport, 1990.

2. Ljubarskij, I. M., and L. S. Palatnik. *Metallofizika trenija.* M.: Metallurgija, 1976.

3. Bulgakov, Vladimir Pavlovich, Sergey Semenovich Uksusov, and Lyudmila Andreevna Tsapko. "Model of wear process of tribosystem at shock and abrasive exposure." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2011): 20–22.
4. Pastuhov, I. A., and N. Ju. Dudareva. "Povyshenie proizvoditel'nosti obrabotki detalej metodom iskrovogo uprochneniya." *Molodezhnyj vestnik Ufimskogo gosudar-stvennogo aviacionnogo tehnikeskogo universiteta* 3 (2013): 92–98.
5. Ershov, G. S., and Ju. B. Bochkov. *Vysokoprochnye aljuminievye splavy na osnove vtorichnogo syrja*. M.: Metallurgija, 1979.
6. Jeskin, D. G. "Strukturnye faktory dendritnoj likvacii v aljuminievyh splavah." *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Cvetnaja metallurgija* 5 (2008): 47–53.
7. Kuzmin, Mikhail, and Marina Kuzmina. "Segregation and improvement of aluminum casting alloy sample quality." *Bulletin of Irkutsk State Technical University* 12(83) (2013): 210–213.
8. Zilberg, Ju. Ja., K. M. Hrushheva, and G. B. Genrshmen. *Aljuminievye splavy v traktorostroenii*. M.: Mashinostroenie, 1972.
9. Koidan, I. M., and A. S. Zhuravlev. "Modern manufacturing techniques of billet pistons for diesel engine of accelerated piston aluminum alloy molding TICS-methods." *Foundry production and metallurgy* 3S(72) (2013): 42–45.
10. Orlov, N. D., and V. M. Chursin. *Spravochnik litejshhika. Fasonnoe lite iz splavov cvetnyh metallov*. M.: Mashinostroenie, 1971.
11. Evstifeev, V. V., A. A. Aleksandrov, and A. A. Isakov. "Sovershenstvovanie tehnologii izgotovlenija porshnej dvigatelej vnutrennego sgoraniya." *Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitelnogo kompleksov i osvoenie strategicheskij vazhnyh territorij Sibiri i Arktiki: vklad nauki: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Omsk: SibADI, 2014: 240–242.
12. Ovsjannikov, M. K., and I. I. Kostylev. *Teplotehnika: tehnikeskaja termodinamika i teploperedacha: uchebnik*. SPb.: JeLMOR, 1998.
13. Nasyrov, R. A. *Povyshenie nadezhnosti raboty porshnej teplovoznnyh dizelej*. M.: Transport, 1977.
14. Moldovanov, V. P., A. R. Pikman, and V. H. Averbuh. *Proizvodstvo porshnevnyh kolec dvigatelej vnutrennego sgoraniya*. M.: Mashinostroenie, 1980.
15. Cimmerman, R., and K. Gjunter. *Metallurgija i materialovedenie*. M.: Metallurgija, 1982.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Булгаков Владимир Павлович* — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»  
*mbulgak@mail.ru*  
*Чеботарев Юрий Валерьевич* — директор. Астраханский тепловозоремонтный завод – филиал АО «Желдорремаш»  
*Atrz@ao-zdrm.ru*  
*Рубан Ирина Николаевна* — аспирант. Научный руководитель:  
*Булгаков Владимир Павлович*. ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»  
*irinaruban1979@mail.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Bulgakov Vladimir Pavlovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. FSBEI HE "ASTU"  
*mbulgak@mail.ru*  
*Chebotarev Yuri Valerievich* — Director. Astrakhan diesel locomotive repair plant – branch of JSC "Zheldorremash"  
*Atrz@ao-zdrm.ru*  
*Ruban Irina Nikolaevna* — postgraduate. Supervisor:  
*Bulgakov Vladimir Pavlovich*. FSBEI HE "ASTU"  
*irinaruban1979@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2016 г.

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ СУДОВ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ**

*Вопрос о целесообразности применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения (СЭД) мощностью более 15 МВт весьма актуален и решается на стадии проектирования судна. В статье проведен анализ применения низковольтных электростанций в составе единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) с СЭД мощностью свыше 16 МВт. На примере судна-снабженца рассмотрены два варианта схемотехнических решений построения ЕЭЭС с СЭД с использованием низковольтного и высоковольтного оборудования. Для вышеуказанных вариантов приведены массы и габариты главных распределительных устройств (ГРУ) и кабельных трасс для участков между наиболее мощными потребителями ЕЭЭС. Представлен краткий сравнительный анализ низковольтных и высоковольтных судовых электростанций (СЭС), рассмотрены основные преимущества высоковольтных СЭС, среди которых следует отметить снижение токов главных дизель-генераторов (ГДГ) и сборных шин, значительное уменьшение токов короткого замыкания, снижение сечения и массы кабельных трасс, улучшение массогабаритных показателей ГРУ, уменьшение количества секций распределительных щитов и автоматических выключателей. Дана оценка влияния уровня напряжения на технико-эксплуатационные показатели оборудования. Указаны причины, благодаря которым в настоящее время низковольтные СЭС на судах с СЭД мощностью от 10 до 16 МВт имеют более широкое распространение, чем высоковольтные. Указаны основные недостатки применения высоковольтных электростанций. Проведен первичный критериальный анализ мощности электростанции, позволяющий определить целесообразность применения высоковольтной ЕЭЭС. На основе результатов сравнения двух вариантов исполнения ЕЭЭС с СЭД показано, что применение высоковольтной СЭС на 6,3 кВ является технически обоснованным и перспективным и имеет ряд существенных преимуществ.*

*Ключевые слова:* судовая электростанция, единая электроэнергетическая установка, единая электроэнергетическая система, система электродвижения, гребная электрическая установка.

### **Введение**

На современном этапе развития мирового судостроения единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС) с системами электродвижения (СЭД) находят все более широкое применение на морском и речном транспорте. Мощность судовой электростанции (СЭС) на некоторых судах с СЭД может превышать 20 МВт. В связи с этим возникает вопрос об использовании в составе ЕЭЭС с СЭД высоковольтного оборудования (более 1000 В) [1].

Классическое построение единых электроэнергетических установок (ЕЭЭУ) с уровнем напряжения ЕЭЭС и СЭД до 1000 В (например, равным 690 В) находит широкое применение в отечественном и зарубежном судостроении. Данное схемотехническое решение позволяет использовать пропульсивную установку суммарной мощностью до 16 МВт [2] – [4]. По мере достижения верхней границы мощности, существенно возрастают токи сборных шин главных распределительных щитов (ГРЩ), что обуславливает необходимость применения системы двойных шин и коммутационных аппаратов с высокой коммутационной способностью. В конструктивном плане система двойных шин характеризуется двукратным увеличением количества секций ГРЩ и ухудшением массогабаритных показателей.

По мере увеличения номинального тока сборных шин, ток в режиме короткого замыкания (КЗ) может превысить предельный ток отключения коммутационных аппаратов, тогда достижение необходимой мощности СЭД станет невозможным. В этом случае рациональным решением становится применение высоковольтных СЭС с использованием коммутационной аппаратуры на-

пряжением, равным 6 кВ или 10 кВ. За счет увеличения напряжения главных генераторов происходит пропорциональное снижение тока на сборных шинах. Это позволяет отказаться от системы двойных шин и выполнить компоновку главного распределительного устройства (ГРУ) по упрощенной схеме. Снижение величины тока влечет за собой уменьшение сечения сборных шин, а также питающих и отходящих кабелей. Необходимость введения понижающих трансформаторов приводит к незначительному снижению массогабаритных показателей СЭС, что компенсируется уменьшением веса ГРУ и кабельных трасс.

### Сравнительный анализ низковольтного и высоковольтного варианта построения ЕЭЭС с СЭД

Рассмотрим два варианта построения ЕЭЭУ на примере судна-снабженца с мощностью ГЭУ, равной 16 МВт:

первый вариант — ЕЭЭС на 690 В и СЭД на 690 В;

второй вариант — ЕЭЭС на 6,3 кВ и СЭД на 690 В.

В первом случае (рис. 1) СЭС образует две системы трехфазных шин с ГРЩ напряжением 690 В. Между шинами ГРЩ реализован сдвиг по фазе напряжения на 30° эл., что обеспечивает питание статических 12-пульсных преобразователей без применения согласующих трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой. Полупроводниковый преобразователь частоты для питания гребного электродвигателя (ГЭД) и подруливающих устройств одновременно получает питание от двух систем шин ГРУ. ГЭД выполнен на напряжение 690 В. Потребители собственных нужд получают питание от двух трехобмоточных трансформаторов. Напряжение на выходе трансформаторов собственных нужд составляет 400 В.

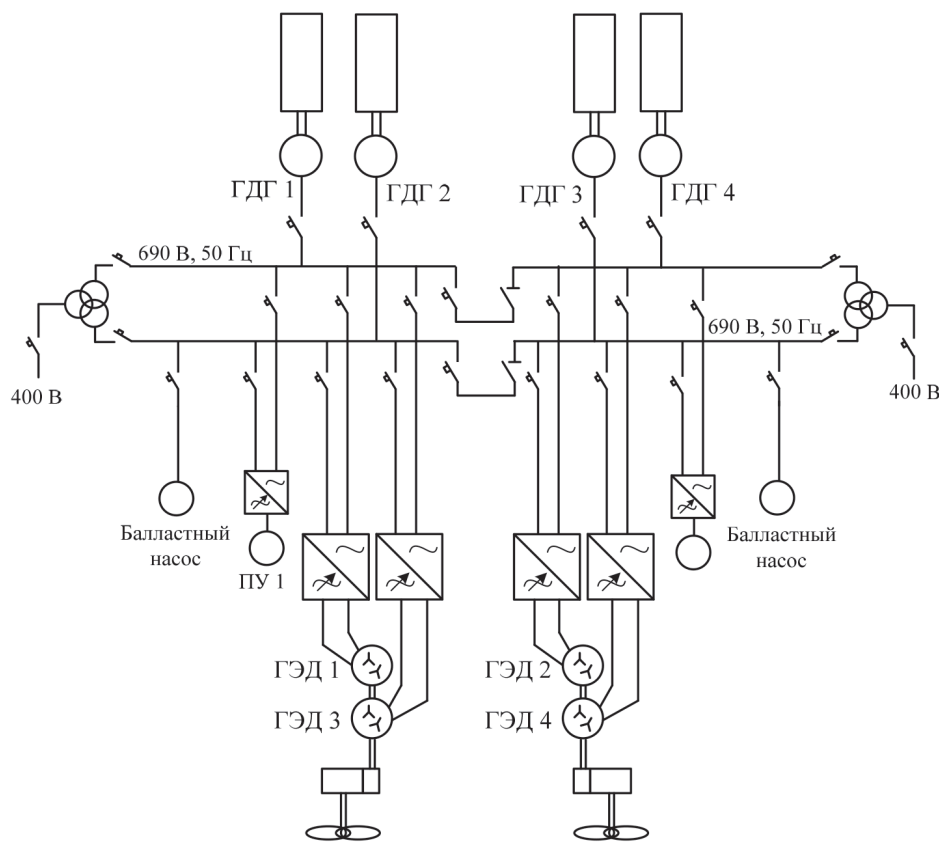


Рис. 1. ЕЭЭС с СЭД на 690 В

Во втором случае (рис. 2) генераторы включены на общую систему шин ГРУ с напряжением 6,3 кВ. Преобразователи частоты для питания ГЭД получают питание через понижающие трехоб-



моточные трансформаторы. ГЭД выполнен на напряжение 690 В. Потребители собственных нужд получают питание от двух двухобмоточных трансформаторов. Напряжение на выходе трансформаторов собственных нужд составляет 400 В.

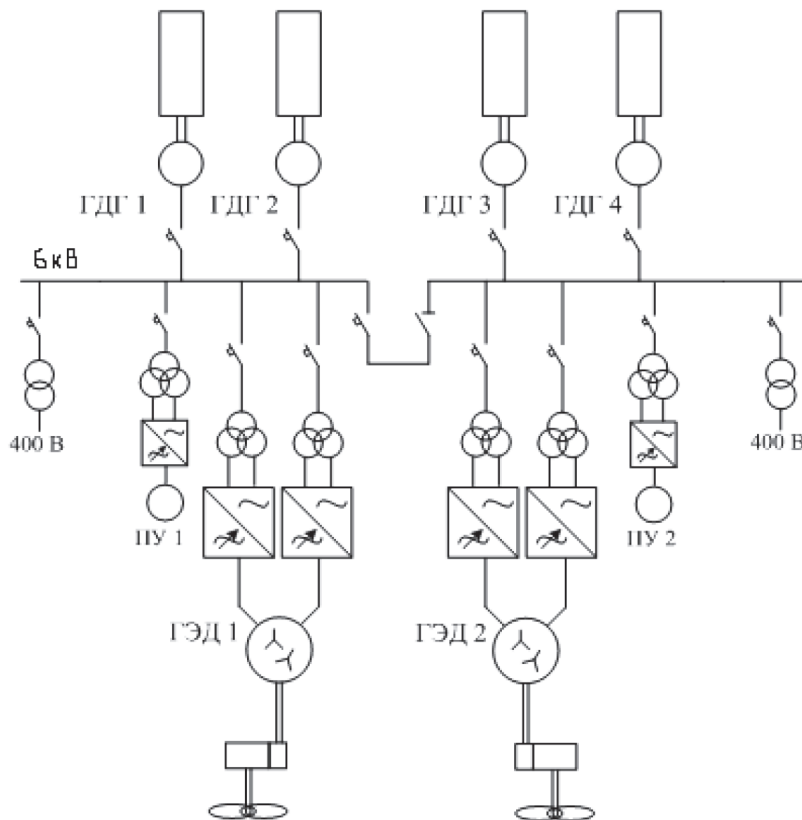


Рис. 2. ЕЭЭС на 6 кВ с СЭД 690 В

Состав основного оборудования ЕЭЭС с СЭД:

- главные дизель-генераторы (ГДГ) мощностью 5 МВт — 4 шт.;
- винто-рулевые колонки (ВРК) мощностью 8 МВт — 2 шт.;
- носовые подруливающие устройства (ПУ) мощностью 1 МВт — 2 шт.

При одинаковой мощности ЕЭЭС в высоковольтном варианте значительно уменьшается токовая нагрузка электрооборудования, в том числе:

- существенно снижаются токи генераторов (так, для генератора мощностью 5 МВт в первом варианте значение тока будет составлять 5 000 А, а для СЭС на 6,3 кВ — 550А);
- в высоковольтной схеме суммарный номинальный ток сборных шин равен 1 100 А, в низковольтной схеме — 20 000 А;
- значительно меньше токи КЗ, а следовательно, ниже требования к термической и динамической стойкости шинопроводов.

Снижение токов в высоковольтной ЕЭЭС позволяет:

- уменьшить сечение сборных шин щитового оборудования;
- уменьшить сечения кабельных линий как по условиям нормального режима эксплуатации, так и в режиме КЗ;
- уменьшить вес и габариты щитового оборудования, генераторов и кабельных трасс.

В таблице приведены расчеты технических характеристик оборудования ЕЭЭС для двух вариантов исполнения. Уровни питающего напряжения при одинаковой передаваемой мощности в обоих вариантах определяют разницу в сечении кабельных трасс.

### Сравнение вариантов построения СЭС на 6,3 кВ и 690 В

Параметр	ГРУ 6,3 кВ	ГРУ 690 В
Габариты Д × Г × В, мм	8800 × 1000 × 1900	11250 × 820 × 2220
Масса, т	5,8	10
Количество секций, шт.	12	16
Количество силовых выключателей, шт.	11	24
Ток генератора, А	550	5000
Ток одной ВРК, А	1500	8000
Ток одного ПУ, А	125	1000
Номинальный ток сборных шин, А	1100	5000
Суммарный ток сборных шин, А	2200	20000
Количество кабелей в прокладке, общая длина и вес кабелей мощных потребителей ЕЭЭУ		
Кабельная трасса на 1-м участке: ДГА – ГРУ 50 м (для четырех генераторов)	12 шт. Всего 0,6 км; 3,72 т	100 шт. Всего 5 км; 17 т
Кабельная трасса на 2-м участке: ГРУ – ВРК 120 м (для двух ВРК)	16 шт. Всего 1,92 км; 11,904 т	80 шт. Всего 9,6 км; 32,64 т
Кабельная трасса на 3-м участке: ГРУ – ПУ 30 м (для двух ПУ)	2 шт. Всего 0,06 км; 0,372 т	10 шт. Всего 0,3 км; 1,02 т
Суммарная длина и вес кабельных трасс мощных потребителей ЕЭЭУ	2,58 км; 15,996 т	14,9 км, 50,66 т

Таким образом, в таблице рассмотрены три основных участка кабельных трасс:

- 1-й участок — дизель-генераторный агрегат (ДГА) – ГРУ;
- 2-й участок — ГРУ – помещение ВРК;
- 3-й участок — ГРУ – помещение носового ПУ.

Для сравнения двух схем СЭС были выбраны высоковольтный и низковольтный кабель фирмы Nexans со следующими техническими характеристиками:

- MPRXCX — FLEX 0.6/1 кВ 3 × 95 (205 А), диаметр — 40 мм, масса 3400 кг/км;
- MPRXCX 6/10 кВ × 35 (205 А), диаметр — 60 мм, масса – 6200 кг/км.

Примечание. Выбор кабеля с указанным одинаковым сечением обусловлен задачей произвести теоретическое сравнение кабельных трасс с различным номинальным напряжением.

Сравнение двух вариантов исполнения ЕЭЭС с СЭД мощностью 20 МВт показывает, что применение высоковольтной СЭС на 6,3 кВ является технически обоснованным и перспективным и имеет ряд существенных преимуществ [5] – [10]. Среди основных достоинств высоковольтной СЭС необходимо отметить следующие:

- снижение массы и габаритов ГРУ;
- значительное упрощение системы сборных шин;
- снижение количества секций на 25 %;
- уменьшение количества силовых выключателей на 55 %, что повышает надежность ГРУ;
- значительное снижение тока сборных шин и тока питающих генераторов, что приводит к существенному снижению уровня тока КЗ;
- значительное снижение номинального тока кабельных трасс, что приводит к существенному снижению количества кабелей в прокладке и снижению их общей протяженности в 5,8 раз и веса в 3,2 раза;
- повышение КПД щитового оборудования за счет снижения тепловых потерь;
- уменьшение на 15 % стоимости оборудования ЕЭЭС.

### Выводы

1. Проведенный сравнительный анализ схмотехнических решений низковольтного и высоковольтного вариантов построения СЭС применительно к судну-снабженцу с ЕЭЭС с СЭД мощностью до 16 МВт показал предпочтение использования для данного типа судна высоковольтной СЭС с величиной напряжения 6 кВ или 10 кВ.

2. Использование высоковольтных электростанций на судах с СЭД позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели судна, в том числе массогабаритные.

3. Основная причина преимущественного применения низковольтных ЕЭЭС на судах с СЭД мощностью до 16 МВт заключается в том, что на сегодняшний день число компаний, занимающихся производством низковольтной коммутационной аппаратуры, имеющих сертификат Российского морского регистра судоходства (РС), значительно превышает количество компаний, выпускающих высоковольтную коммутационную аппаратуру с сертификатом РС.

4. Одним из незначительных недостатков применения высоковольтных электростанций являются дополнительные повышенные требования к эксплуатирующему персоналу — наличие у него соответствующей группы допуска по электробезопасности и наличие особых требований Правил РС по размещению высоковольтного оборудования.

5. В последнее время наблюдается тенденция перехода на уровень напряжения свыше 1000 В в ЕЭЭС с СЭД мощностью от 10 до 16 МВт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4. — С. 76–78.

2. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5(27). — С. 40–46.

3. Григорьев А. В. Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, В. И. Штрамбранд, Р. Р. Зайнуллин // Морской флот. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

4. Григорьев А. В. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3(31). — С. 164–171.

5. Wilflinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilflinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

6. Mahmud K. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks / K. Mahmud, G. E. Town // Applied Energy. — 2016. — Vol. 172. — Pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.

7. Gierusz W. Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results / W. Gierusz // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 123. — Pp. 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.

8. Yutao C. Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // Energy Procedia. — 2012. — Vol. 17. — Part A. — Pp. 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.

9. Гузанов А. Н. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики / А. Н. Гузанов, К. В. Недялков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — 59 с.

10. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: Корона Принт, 2001. — 320 с.

## ANALYSIS OF CAPABILITY OF USING OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER PLANTS FOR SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

The question regarding expediency of using of high-voltage power plants for ships with electric propulsion systems more than 15 MW power is rather actual and is solving on the stage designing of a ship. In the article analysis of using of low-voltage electric power plants in unified electric power systems with electric propulsion systems above 16 MW power is adduced. On example of supply vessel two alternatives of schematic decisions of unified electric power systems with electric propulsion systems with using of high-voltage and low-voltage equipment are considered. For the above mentioned alternatives mass and overall dimensions of propulsion switchboards and cable routes on sections to the most powerful consumers of unified electric power system are given. The short comparative analysis of low-voltage and high-voltage ship electric power plants is given, the main advantages of high-voltage voltage ship electric power plants are considered, among them it should be noted decreasing of currents of main diesel-generators, and bus bar, significant decreasing of short-circuit currents, decreasing of cross sectional area and mass of cable routes, improvement of mass and overall dimensions of propulsion switchboards, decreasing of amount of sections of distributing switchboards and circuit breakers. Evaluation of influence of voltage level to technical and economical parameters of equipment is given. Reasons of more widespread using of low-voltage ship electric power plants on ships with electric propulsion systems of 10 up to 16 MW power in comparison with high-voltage are given. Main disadvantages of using of high-voltage power plants are listed. Primary criterion analysis of power of plant, with which expediency of using of unified electric power systems appears, is realized. As a result of comparison of two alternatives of unified electric power system with electric propulsion system it is shown, that using of high-voltage ship electric power plant 6,3 kV is technically reasonable and prospective and it has some essential advantages.

*Keywords: ship electric power plant, unified electric power installation, unified electric power system, electric propulsion system, electric propulsion plant.*

### REFERENCES

1. Grigorev, A. V., V. V. Romanov'skiy, and R. R. Zaynullin. "Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 76–78.
2. Grigorev, A. V., and R. R. Zajnullin. "Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
3. Grigorev, A. V., V. I. Shtrambrand, and R. R. Zajnullin. "Celesoobraznost primeneniya SJeD na sudah vspomogatelnogo flota." *The Morskoy Flot (Marine Fleet)* 4 (2014): 38–40.
4. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. "Analysis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 164–171.
5. Wilfinger, Johann, P. Ortner, L. Del Re, and M. Aschaber. "Simulation and control design of hybrid propulsions in boats." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 40–45.
6. Mahmud, Khizir, and Graham E. Town. "A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks." *Applied Energy* 172 (2016): 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
7. Gierusz, Witold. "Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results." *Ocean Engineering* 123 (2016): 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.
8. Yutao, Chen, Zeng Fanming, and Wu Jiaming. "Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System." *Energy Procedia* 17 (2012): 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.
9. Guzanov, A. N., and K. V. Nedjalkov. *Modelirovanie sudovogo jelektrorudovanija i sredstv avtomatiki*. SPb.: SPbGUVK, 1996.
10. German-Galkin, S. G. *Kompjuterное modelirovanie poluprovodnikovyh sistem v MATLAB 6.0*. SPb.: KORONA print, 2001.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Григорьев Андрей Владимирович* —  
кандидат технических наук, доцент.  
АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
*a.grigorev@eds-marine.ru*  
*Васильев Алексей Юрьевич* — соискатель.  
Научный руководитель:  
*Григорьев Андрей Владимирович.*  
АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
*alex\_was@mail.ru*  
*Малышев Сергей Михайлович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Григорьев Андрей Владимирович.*  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*malyshev@eds-marine.ru, kaf\_saees@gumrf.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Grigoryev Andrey Vladimirovich* —  
PhD, associate professor.  
Jelektrodvizhenie sudov  
*a.grigorev@eds-marine.ru*  
*Vasil'ev Aleksej Jur'evich* — applicant.  
Supervisor:  
*Grigoryev Andrey Vladimirovich.*  
Jelektrodvizhenie sudov  
*alex\_was@mail.ru*  
*Malyshev Sergey Mihaylovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Grigoryev Andrey Vladimirovich.*  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*malyshev@eds-marine.ru, kaf\_saees@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2016 г.*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-166-172  
УДК 621.396

**А. И. Кулинич,  
А. В. Припотнюк,  
Ю. М. Устинов**

## РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА СУДАХ В СЕВЕРНЫХ ШИРОТАХ

*Судовые спутниковые средства связи ГМССБ и размещаемое на судах дополнительное оборудование не обеспечивают связь в северных широтах. В статье анализируются возможности спутниковой системы ИНМАРСАТ, исследуется текущее состояние системы. Представлены примеры реализации терминалов, показан терминал ИНМАРСАТ mini-C, широкополосный терминал для работы со спутниками четвертого поколения в сети ИНТЕРНЕТ. Сделан вывод о невозможности работы системы в высоких широтах, приводятся основные направления модернизации системы связи в высоких широтах. Рассматриваются три варианта создания спутниковой связи на судах для устранения этого недостатка. Анализируются возможности системы МЕРИДИАН для судовой связи в морских районах плавания А3/А4 ГМССБ. Предлагается совместное использование ИНМАРСАТ и модернизированной высокоэллиптической спутниковой системы для судовой связи в морских районах плавания А3/А4 ГМССБ. Отмечается, что совместное использование действующих спутниковых систем связи ИНМАРСАТ и системы связи ИРИДИУМ также решает проблему связи для судов в высоких широтах. Сформулирован вывод о целесообразности использования дополнительного оборудования для морских районов плавания А1 и А2 ГМССБ в виде мобильных терминалов спутниковых систем.*

*Ключевые слова:* спутниковая система связи, ИНМАРСАТ, морской район, судовой терминал.

### Введение

Система спутниковой связи ИНМАРСАТ морской подвижной спутниковой службы, которая входит в состав ГМССБ, является международной системой и предназначена для обеспечения спутниковой связью суда в Мировом океане. Система ИНМАРСАТ является геостационарной спутниковой системой, она находится в эксплуатации с 1982 г., с тех пор в системе сменилось четыре поколения спутников [1] – [3], [5], [6].

### 1. Современные средства спутниковой связи на судах в морских районах плавания А3/А4 ГМССБ

В соответствии с международными соглашениями система ИНМАРСАТ решает следующие задачи:

- безопасность мореплавания и охрана человеческой жизни на море;
- подача оповещений о бедствии;
- координация качества спасательных работ на море;
- повышение эффективности плавания судов;
- организация коммерческой морской связи.

Существующую систему ИНМАРСАТ на судах используют более 160 государств, так как практика связи показала, что спутниковая связь обладает большей надежностью и оперативностью по сравнению с традиционными коротковолновыми средствами связи.

Современное штатное средство спутниковой связи, устанавливаемое на судах в морских районах плавания А3/А4



Рис. 1. ИНМАРСАТ mini-C

ГМССБ, состоит из терминала ИНМАРСАТ-С или ИНМАРСАТ mini-С, внешний вид которого приведен на рис. 1 [1].

Терминалы ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ mini-С относятся к классу узкополосных терминалов и работают в режимах ТЕЛЕКС, ДАННЫЕ, ФАКС. Скорость передачи / приема данных составляет 600 бит/с. В качестве дополнительного оборудования после развертывания четвертого поколения спутников ИНМАРСАТ-4 на судах устанавливают широкополосные терминалы FB-500 выпуска 2009 г. [4]. Терминалы FB-500 обеспечивают связь в режимах ТЕЛЕФОНИЯ, ФАКС, ДАННЫЕ, а также работу в сети Интернет. Максимальная скорость передачи / приема данных равна 356/432 кбит/с.

На рис. 2 приведен внешний вид терминала FB-500. Диаметр его выносной антенны, направляемой по азимуту и углу места, равен 72 см.



Рис. 2. Внешний вид спутникового терминала FB-500 с выносной антенной

В последние годы в связи с глобальным потеплением мировое сообщество обеспокоено тем, что судовая спутниковая аппаратура ИНМАРСАТ, установленная на судах, не обеспечивает связь на трассах Северного морского пути, так как для терминалов ИНМАРСАТ-С этой системы минимально-допустимая величина угла места спутников равна  $10^\circ$ , а для терминалов FB-500 —  $20^\circ$ . Это означает, что на широтах более  $70^\circ$  и более  $62^\circ$  терминалы ИНМАРСАТ-С и FB-500 работать не будут.

Задача создания судовой спутниковой связи в Мировом океане, включая северные широты, может быть решена тремя путями:

- совместное использование геостационарной системы ИНМАРСАТ и действующей спутниковой системы МЕРИДИАН на высокоэллиптических орбитах;
- совместное использование системы ИНМАРСАТ с модернизированной спутниковой системой на высокоэллиптических орбитах;
- совместное использование системы ИНМАРСАТ с низкоорбитальной спутниковой системой ИРИДИУМ.

## 2. Совместное использование различных действующих спутниковых систем для судовой связи в морских районах плавания АЗ/А4 ГМССБ

**ИНМАРСАТ и МЕРИДИАН.** Второе поколение высокоэллиптической спутниковой системы МОЛНИЯ носит название МЕРИДИАН. Система МЕРИДИАН (Россия) обеспечивает в С-диапазоне частоты круглосуточное обслуживание Северного полушария Земли и предназначена для телевизионных передач и многоканальной телефонно-телеграфной связи [2]. Спутники системы МЕРИДИАН в четырех плоскостях на 12-часовых орбитах «зависают» в течение 6 ч над

поверхностью Земли (59 ... 64° с. ш. и 80° в. д.) на высоте 32000 ... 40000 км. Для непрерывной круглосуточной работы в орбитальную группировку входит четыре спутника. Угол места спутника на трассах Северного морского пути превышает 40°.

Задача судовой связи в северных широтах по системе МЕРИДИАН не может быть решена, так как для подвижных объектов в продаже отсутствуют терминалы этой системы.

**ИНМАРСАТ и модернизированная высокоэллиптическая спутниковая система.** Для судовой связи в морских районах плавания А3/А4 ГМССБ в состав дополнительного оборудования включается терминал FВ-500, если высокоэллиптическая система будет модернизирована. В модернизированной системе формат сигналов должен совпадать с форматом сигналов системы ИНМАРСАТ.

В морском районе плавания А3 ГМССБ терминалы ИНМАРСАТ-С и FВ-500 будут работать по сигналам действующей системы ИНМАРСАТ [8], [9] а на северных широтах — по сигналам группировки спутников модернизированной высокоэллиптической спутниковой системы связи.

**ИНМАРСАТ и ИРИДИУМ.** Спутниковая связь в северных широтах на судах будет возможна, если в состав дополнительного оборудования связи включить терминал IRIDIUM PILOT спутниковой низкоорбитальной системы связи ИРИДИУМ.

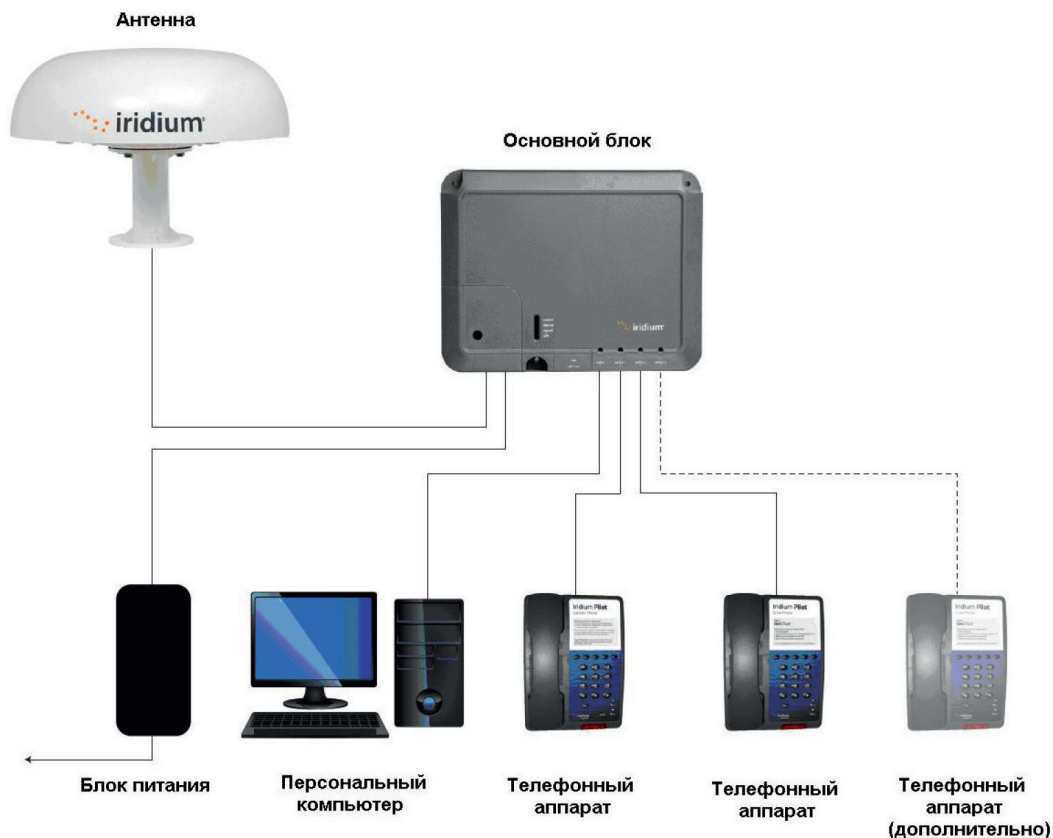


Рис. 3. Схема соединений судового спутникового терминала IRIDIUM PILOT

На рис. 3 приведена схема соединений судового терминала IRIDIUM PILOT, обеспечивающего работу трех независимых телефонов, передачу данных со скоростью до 134 кбит/с и постоянное подключение к сети Интернет.

### 3. Целесообразность использования дополнительного оборудования для морских районов плавания А1, А2 ГМССБ в виде мобильных терминалов спутниковых систем

Штатный состав радиооборудования связи для морского района плавания А1 ГМССБ состоит из ОВЧ-радиостанций, для района плавания А2 ГМССБ — из ОВЧ- и СЧ-радиостанций [7]. До недавнего времени низкая энергетика и невозможность использования крупноапертурных



антенн на спутниках связи делало невозможным создание мобильных терминалов для судовой телефонии и передачи данных. В течение последних лет эти недостатки были устранены. В продаже появились мобильные спутниковые телефоны систем ИНМАРСАТ, ТУРАЙА, ГЛОБАЛСТАР, ИРИДИУМ [10]. Фотографии мобильных телефонов указанных спутниковых систем связи представлены на рис. 4.



Рис. 4. Мобильные спутниковые телефоны различных систем связи:  
 а — ИНМАРСАТ; б — ТУРАЙА; в — ГЛОБАЛСТАР; г — ИРИДИУМ

На рис. 5 приведен внешний вид мобильного пейджера DeLORME in Reach системы ИНМАРСАТ:

- для двусторонней связи с возможностью отправки текстовых сообщений (на адреса электронной почты или мобильного телефона) длиной 160 символов;
- для выбора интервала трекинга от 10 мин до 4 ч;
- для передачи сообщения БЕДСТВИЕ;
- для подтверждения о приеме переданных сообщений.



Рис. 5. Мобильный пейджер DeLORME in Reach системы ИНМАРСАТ для передачи текстовых сообщений

Представляется целесообразным в состав дополнительного оборудования судовых средств связи для морских районов А1, А2 ГМССБ ввести (по выбору судовладельца) мобильные спутниковые телефоны и пейджеры текстовых сообщений [11], [12].

## Выводы

1. Имеющееся оборудование на судах соответствует национальным и международным правилам, но не обеспечивает связь в высоких широтах. Повсеместное и традиционное использование системы связи ИНМАРСАТ требует использования дополнительного оборудования на судах. Возможность связи в высоких широтах могут предложить такие системы, как МЕРИДИАН на высокоэллиптических орбитах; модернизированная спутниковая система на высокоэллиптических орбитах и низкоорбитальная спутниковая система ИРИДИУМ.

2. Целесообразно изменить состав дополнительного оборудования спутниковых средств связи для всех морских районов плавания ГМССБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринич А. Н.* Современное судовое оборудование средств электронной навигации, ГМССБ и береговая единая система контроля и управления судоходством: монография / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — Петропавловск-Камчатский: Камчат. ГТУ, 2007. — 261 с.

2. *Выгонский Ю.* Анализ возможности создания системы спутниковой связи для обслуживания Арктического района / Ю. Выгонский, А. Кузовников, В. Головков // Спутниковые технологии и бизнес. — 2014. — № 5. — С. 24–31.

3. *Ильин А. А.* Цифровые терминалы спутниковых систем связи. Справочное издание / А. А. Ильин, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов / под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с.

4. Общий каталог продукции для прогулочных судов 2009 г. [Электронный ресурс]: FURUNO. — Режим доступа: <http://www.furuno.ru/> (дата обращения: 13.01.2016).

5. ФГУП «Морсвязьспутник» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.marsat.ru/> (дата обращения: 13.01.2016).

6. *Резников В. Ю.* Судовая радиосвязь. Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ / В. Ю. Резников, Ю. М. Устинов, А. А. Дуров [и др.] / под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2002. — 480 с.

7. *Кулинич А. И.* Основные направления модернизации морской ВЧ радиосвязи / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2012. — № 35. — С. 136–141.

8. *Кулинич А. И.* Мониторинг судов на северных широтах с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ-D+ путём использования модифицированной квазистационарной орбиты системы связи ИНМАРСАТ / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутниковые технологии и бизнес. — 2013. — Декабрь. — С. 8–12.

9. *Маринич А. Н.* Передача и прием данных широкополосными терминалами Fleet77, FB250, FB500 в активированных зональных лучах ИНМАРСАТ-4 / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутники технологии и бизнес. — 2014. — Май. — С. 42–44.

10. *Маринич А. Н.* Обзор мобильных спутниковых телефонов для персональной связи на море // А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // CONNECT. Мир информационных технологий. — 2014. — № 12. — С. 76–79.

11. *Устинов Ю. М.* Анализ современного состояния судовых средств связи и спасания / Ю. М. Устинов, А. В. Припотнюк, А. И. Кулинич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 166–174.

12. *Кулинич А. И.* Простейшие судовые терминалы IsatData Pro и IsatPhone Pro для передачи данных и телефонии по системе Инмарсат // А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 127–131.

## DEVELOPMENT SATELLITE COMMUNICATION ON SHIPS IN THE NORTHERN LATITUDES

*Marine satellite communications and GMDSS on vessels placed additional equipment does not provide a link in the Northern latitudes. The article analyzes the capabilities of the satellite system INMARSAT, examines the current state of the system. Presents examples of the terminals shown terminal INMARSAT mini-C, broadband-capable terminal to operate with the satellites, the fourth generation on the INTERNET. Is the conclusion about impossibility of operation of the system in high latitudes, are the main directions of modernization of communication systems at high latitudes. Three possibilities of creation of satellite communication on ships to eliminate this drawback. The possibilities of MERIDIAN systems for marine communication marine navigation areas A3/A4 GMDSS. Another way is sharing INMARSAT and upgraded high-elliptical satellite system for marine communication marine navigation areas A3/A4 GMDSS. The joint use of existing satellite communication systems INMARSAT and IRIDIUM communication also solves the problem of communication for vessels in high latitudes. The conclusion about expediency of use of additional equipment for offshore sailing areas A1, A2 GMDSS in the form of a mobile terminal satellite systems.*

*Keywords: satellite communication systems, Inmarsat, sea area, ships terminal.*

### REFERENCES

1. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, Ju. M. Ustinov, et al. *Sovremennoe sudovoe oborudovanie sredstv jelektronnoj navigacii, GMSSB i beregovaja edinaja sistema kontrolja i upravljenja sudohodstvom: monografija*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchat. GTU, 2007.
2. Vygonskij, Ju., A. Kuzovnikov, and V. Golovkov. "Analiz vozmozhnosti sozdaniya sistemy sputnikovoj svjazi dlja obsluzhivaniya Arkticheskogo rajona." *Sputnikovye tehnologii i biznes* 5 (2014): 24–31.
3. Ilin, A. A., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. *Cifrovye terminaly sputnikovyh sistem svjazi. Spravochnoe izdanie*. SPb.: Dean, 2005.
4. Obshhij katalog produkcii dlja progulochnyh sudov 2009 g. Web. 13.01.2016 <<http://www.furuno.ru/>>.
5. Morsviazsputnik. Web. 13.01.2016 <<http://www.marsat.ru/>>.
6. Reznikov, V. Ju., Ju. M. Ustinov, A. A. Durov, et al. *Sudovaja radiosvjaz. Spravochnik po organizacii i radiooborudovaniju GMSSB*. SPb.: Sudostroenie, 2002.
7. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. "Osnovnye napravlenija modernizacii morskoy VCh radiosvjazi." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 35 (2012): 136–141.
8. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. "Monitoring sudov na severnyh shirotah s pomoshhju terminalov INMARSAT-S i INMARSAT-D+ putjom ispolzovanija modifitsirovannoj kvazistacionarnoj orbity sistemy svjazi INMARSAT." *Sputnikovye tehnologii i biznes* December (2013): 8–12.
9. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. "Peredacha i priem dannyh shirokopolosnymi terminalami Fleet77, FB250, FB500 v aktivirovannyh zonal'nyh luchah INMARSAT-4." *Sputniki tehnologii i biznes* May (2014): 42–44.
10. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. "Obzor mobilnyh sputnikovyh telefonov dlja personalnoj svjazi na more." *CONNECT. Mir informacionnyh tehnologij* 12 (2014): 76–79.
11. Ustinov, Yury Matveevich, Andrey Vladimirovich Pripotnyuk, and Andrey Ivanovich Kulinich. "Analysis of the current state of ship communications and rescue equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 166–174.
12. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, and Ju. M. Ustinov. "The simplest marine terminal IsatData Pro i IsatPhone Pro for data and telephony services on the Inmarsat system." *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. 31 marta 2015 g.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. Vol. 2. 127–131.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Кулинич Андрей Иванович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Устинов Юрий Матвеевич*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_tsn@gumrf.ru*  
*Припотнюк Андрей Владимирович* —  
инструктор МУТЦ, методист направления ГМССБ.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*apripotnyuk@mts.spb.su*  
*Устинов Юрий Матвеевич* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_tsn@gumrf.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Kulinich Andrey Ivanovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Ustinov Yuriy Matveevich*.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_tsn@gumrf.ru*  
*Pripotnyuk Andrey Vladimirovich* —  
instructor of Makarov training centre.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*apripotnyuk@mts.spb.su*  
*Ustinov Yuriy Matveevich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_tsn@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 25 августа 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184**  
**УДК: 621.316:629.12.06.001.4**

**В. А. Малышев,  
В. С. Иванов,  
В. С. Соловей**

**РАСЧЕТ И ВЫБОР ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
УСТАНОВКИ ТАНКЕРА ЛЕДОВОГО КЛАССА**

*В статье рассмотрена единая электроэнергетическая система танкера ледового класса, в состав которой входит гребная электрическая установка переменного тока с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока и гребными синхронными электродвигателями. Танкер снабжен двумя винторулевыми колонками типа Azipod. Представлены схемы главного тока и системы автоматического управления гребной электрической установки в режимах стабилизации частоты вращения и мощности гребного электродвигателя. Рассмотрена топология модульного преобразователя частоты среднего напряжения ACS 6000 концерна AAB, использующего мощные полупроводниковые ключи (IGCT — запираемый тиристор с интегрированным блоком управления). Их использование позволяет получить менее сложный, более эффективный и надежный привод среднего напряжения с уменьшением расходов на эксплуатацию и обслуживание. Рассмотрен алгоритм прямого управления моментом синхронного гребного электродвигателя, основными достоинствами которого, по сравнению с векторным управлением, являются более простая программная реализация и обеспечение большего быстродействия. Рассмотрены способы торможения танкера: без реверса гребного электродвигателя посредством разворота винторулевой колонки и с реверсом гребного электродвигателя. Первый способ является более целесообразным с точки зрения требуемой мощности тормозных резисторов. Для перераспределения тормозной энергии перспективным направлением является исполнение единой электроэнергетической системы танкера ледового класса на базе сети постоянного тока. В статье произведен расчет и выбор тормозных резисторов преобразователя частоты гребной электрической установки танкера ледового класса при торможении судна посредством разворота винторулевой колонки.*

*Ключевые слова: гребная электрическая установка, преобразователь частоты со звеном постоянного тока, синхронный гребной электродвигатель, система автоматического управления, тормозные режимы, тормозные резисторы.*



## Введение

Танкер ледового класса предназначен для перевозки нефти с морской ледостойкой нефтедобывающей платформы на перегрузочный терминал [1], [2]. По оценкам западных экспертов, это судно нового поколения признается одним из самых сложных в техническом отношении продуктов современного кораблестроения. При проектировании танкера была реализована концепция судна двойного действия (Double Acting Ship) финской компании «Aker Arctic Technology». В открытой воде судно перемещается носовой частью вперед, а во льду — кормой вперед. Танкер оснащен двумя движителями типа Azipod (поворотный на 360 ° электроприводной винторулевой комплекс) общей суммарной мощностью 17 МВт, спутниковой системой динамического позиционирования при швартовке к платформе. Форма кормовой оконечности и конструктивная прочность ледового пояса судна обеспечивают возможность работы танкера без сопровождения ледоколов в зимнее время во льдах толщиной до 1,2 м.

### Схемы главного тока и системы автоматического управления гребной электрической установки танкера ледового класса

На танкере применена единая электроэнергетическая система (ЕЭЭС) переменного тока, осуществляющая питание гребной электрической установки (ГЭУ) переменного-переменного тока и отбор мощности для питания общесудовых электропотребителей от шин электродвижения. Это повышает общий коэффициент полезного действия установки и позволяет сократить число вспомогательных генераторов. Сеть высокого напряжения (6,6 кВ) челночного танкера ледового класса разделена между двумя главными распределительными щитами, каждый из которых имеет собственную измерительную секцию.

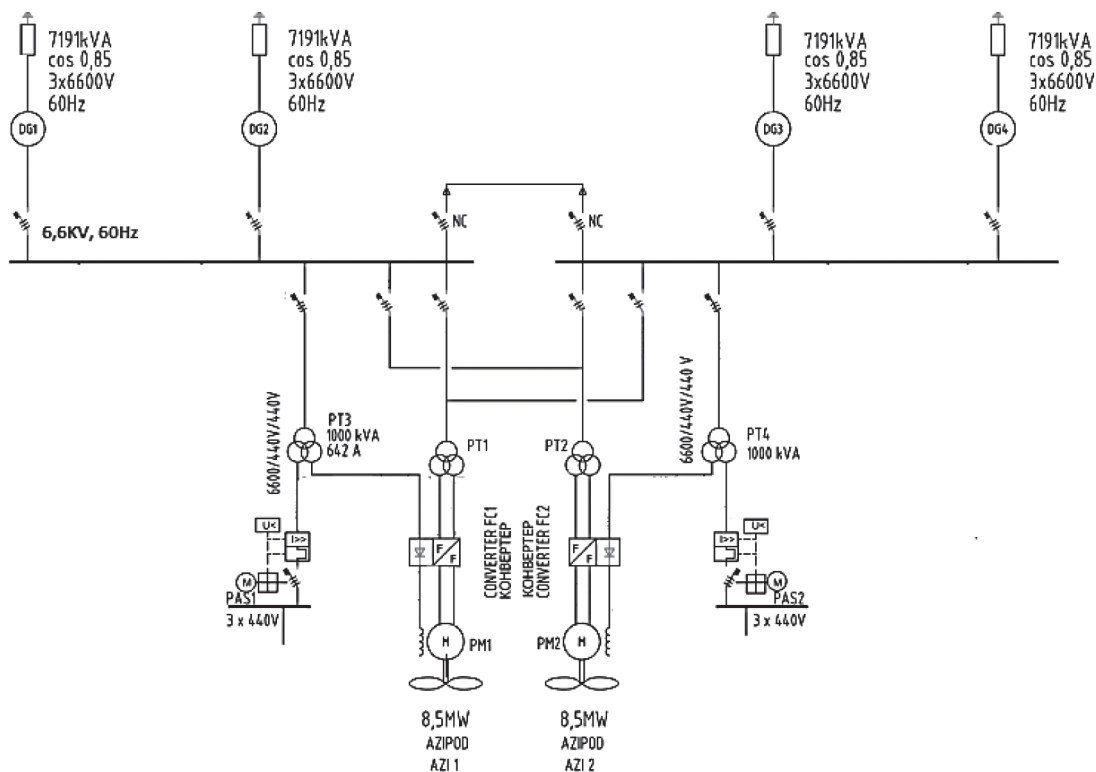


Рис. 1. Схема главного тока

В состав ЕЭЭС входят четыре главных дизельных двигателя Wärtsilä 9L38, каждый номинальной мощностью 6525 кВт, 600 об/мин, главные генераторы фирмы АВВ на 7190 кВ·А (5752 кВт при  $\cos \varphi = 0,85$ ). Генераторы подключены к главным распределительным щитам (6,6 кВ/60 Гц). Преобразователи частоты инверторного типа подключены к главным распределительным

тельным шинам через трехобмоточные трансформаторы с вторичным напряжением 1744 В. Используются гребные синхронные электродвигатели (ГЭД) с электромагнитным возбуждением в составе системы Azipod.

При использовании частотно-регулируемой ГЭУ гребные синхронные двигатели наиболее эффективны [3], как показал опыт эксплуатации атомных ледоколов типа «Таймыр» [4]. Синхронный ГЭД имеет ряд преимуществ перед асинхронным ГЭД:

- более высокий КПД;
- возможность регулирования  $\cos \varphi$ ;
- у синхронного двигателя при тех же частотах питающего напряжения критический момент может быть больше, чем у асинхронного, следовательно, перегрузочная способность у него выше;
- воздушный зазор между статором и ротором у синхронного ГЭД значительно больше, что должно учитываться при проектировании судов ледового класса, так как вероятность повреждения обмотки двигателя при повышенной вибрации во время хода судна во льдах меньше.

Оборудование постов управления включает рукоятки курсового угла на центральном пульте и на обоих боковых пультах мостика. При этом предусматривается как раздельная, так и совместная работа гондол. Кроме того, система рулевого управления может управляться авторулевым. Система автоматического управления ГЭД танкера осуществляет регулирование по мощности и по частоте вращения в зависимости от заданного режима работы и положения поста управления.

В схеме регулирования частоты вращения уставкой регулятора скорости является результирующий сигнал при последовательном прохождении блока задания скорости, фильтра и задатчика интенсивности. Регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор, выходной сигнал которого определяет текущую частоту вращения гребного винта. Выходной сигнал регулятора ограничивается при достижении предельных значений ряда параметров системы. Выходной сигнал регулятора подается в качестве задания крутящего момента непосредственно на преобразователь частоты. Схема регулирования скорости представлена на рис. 2.

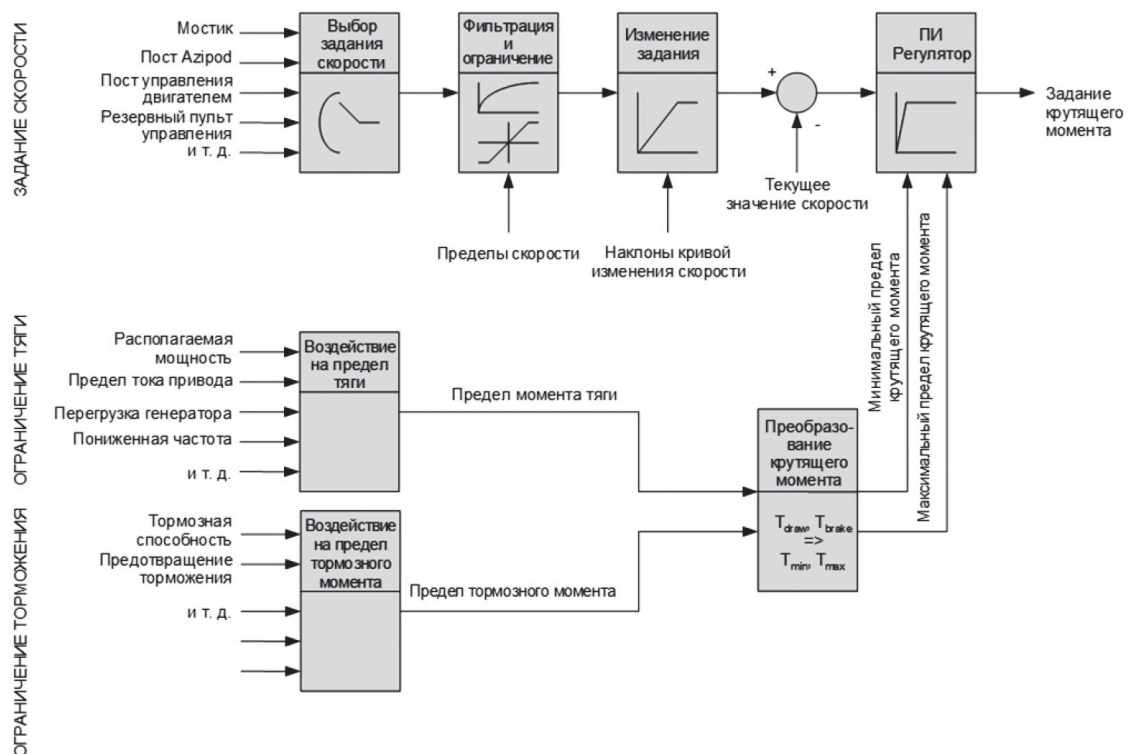


Рис. 2. Схема регулирования скорости ГЭД

Схема регулирования мощности отличается от схемы регулирования скорости тем, что заданием для регулятора мощности является задание мощности, а функция управления представ-

ляет собой функцию деления вместо ПИ-регулятора. Окончательное задание мощности делится на текущую скорость, чтобы получить в результате задание крутящего момента. Задание крутящего момента ограничивается, как и в случае регулирования скорости, и подается в преобразователь частоты. Схема регулирования мощности представлена на рис. 3.

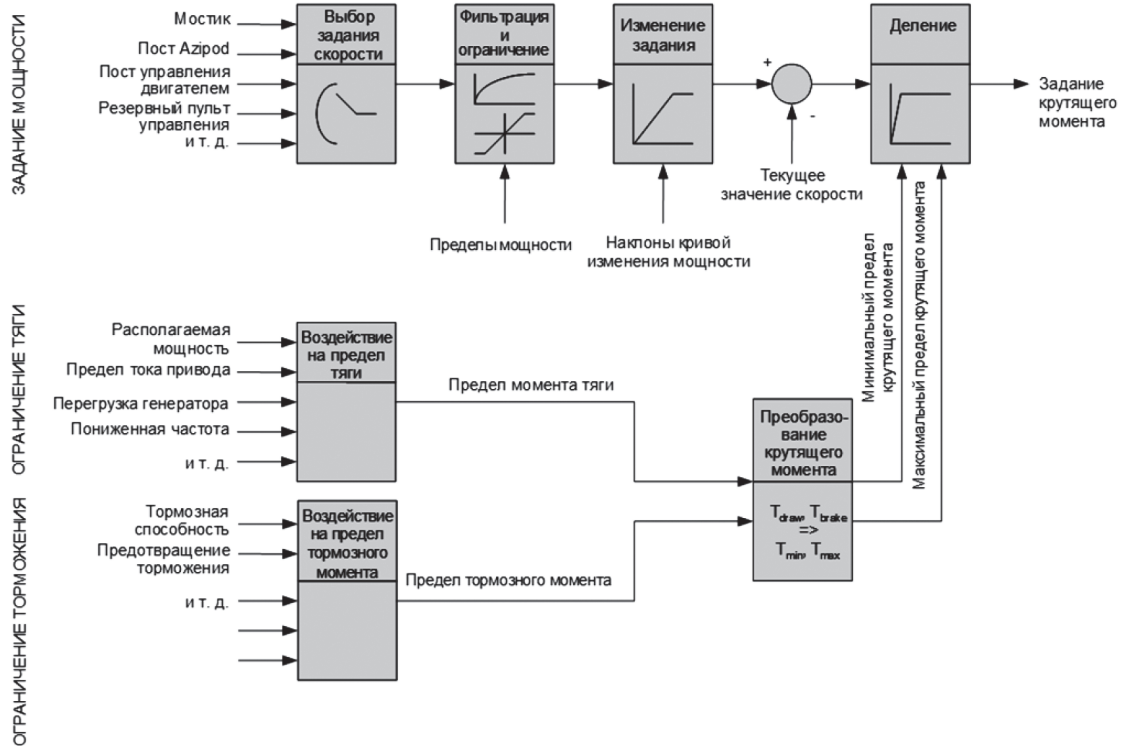


Рис. 3. Схема регулирования мощности ГЭД

В период разгона гребного двигателя и хода при малых мощностях, когда мощность гребного электрического двигателя не превышает 10 % от номинального значения, осуществляется принцип управления с регулированием скорости, при дальнейшем увеличении мощности система автоматически переходит на управления с регулированием мощности. Зависимость частоты вращения и мощности от выставленного уровня задающего устройства (рукоятка поста управления) приведена на рис. 4.

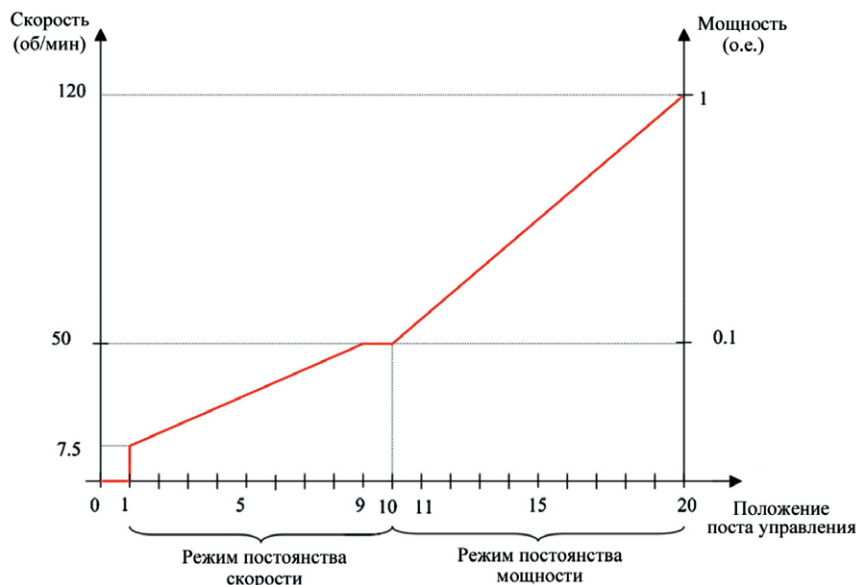


Рис. 4. Зависимость частоты вращения и мощности ГЭД от положения рукоятки поста управления

### Прямое управление моментом гребного синхронного электродвигателя танкера ледового класса

На танкере ледового класса используется преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока фирмы АВВ АСS 6000 [5]. АСS 6000 имеет модульную конструкцию на основе стандартных блоков (рис. 5). Автономный инвертор напряжения (АИН) и активный выпрямитель (АВ) выполняются на базе силовых полупроводниковых приборов IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления) высокой мощности. Это позволяет упростить топологию АИН и АВ за счет минимизации полупроводниковых ключей. Благодаря низким общим собственным потерям, тиристоры IGCT не требуют интенсивного охлаждения и тем самым позволяют использовать сравнительно маломощное охлаждающее оборудование.

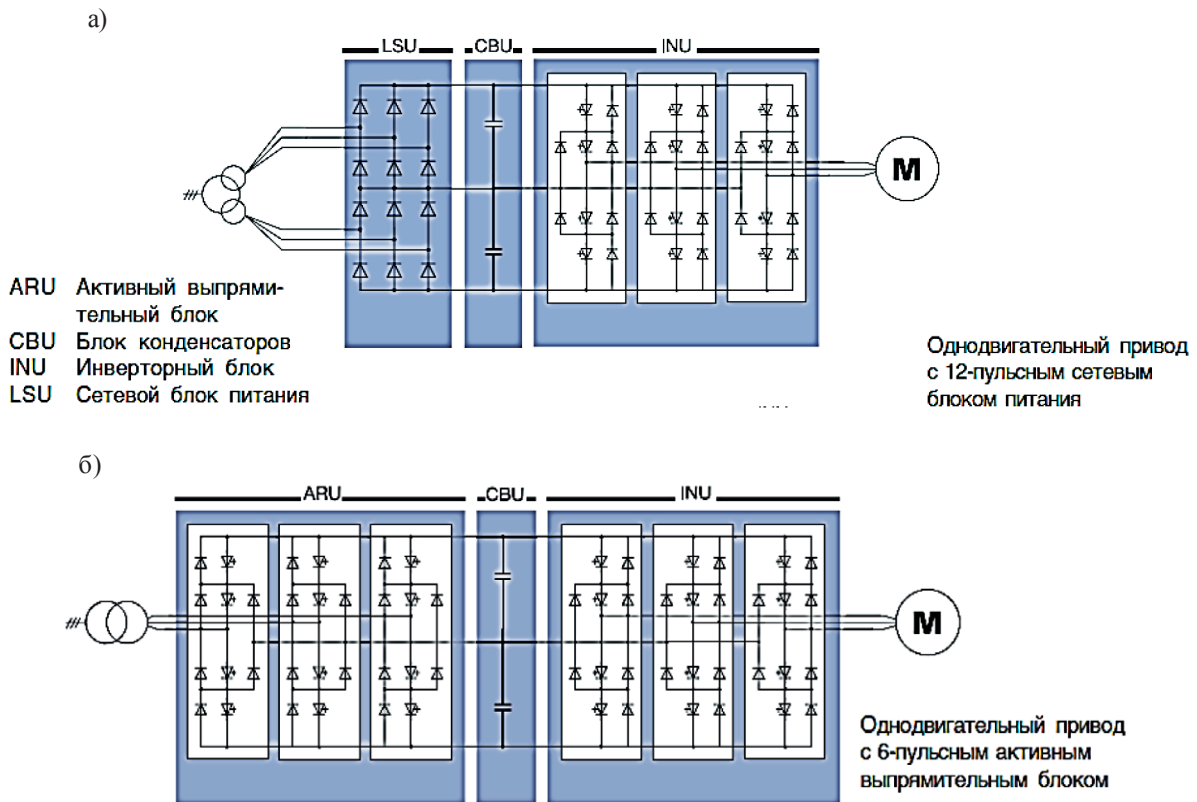


Рис. 5. Базовые блоки ПЧ (ACS 6000) с неуправляемым выпрямителем (а) и активным выпрямителем (б)

В качестве способа частотного управления синхронным ГЭД используется прямое управление моментом (Direct Torque Control — *DTC*) [6] – [8]. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента на управляющее и возмущающее воздействия. Исключительно быстрая реакция привода АСS 6000 на единичный скачок момента сопротивления позволяет легко справиться с ситуациями потери питания и стабилизации нагрузки, что очень важно для автономной энергетической системы танкера, работающего во льдах. В отличие от векторного управления, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, который, таким образом, является управляемой величиной, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. Изменение потокосцепления достигается путем оптимального переключения ключей инвертора напряжения, от которого питается гребной синхронный электродвигатель. Метод *DTC* не требует координатных преобразований и широтно-импульсной модуляции, при этом обеспечиваются наименьшие коммутационные потери. На рис. 6 представлена функциональная схема системы управления *DTC*.



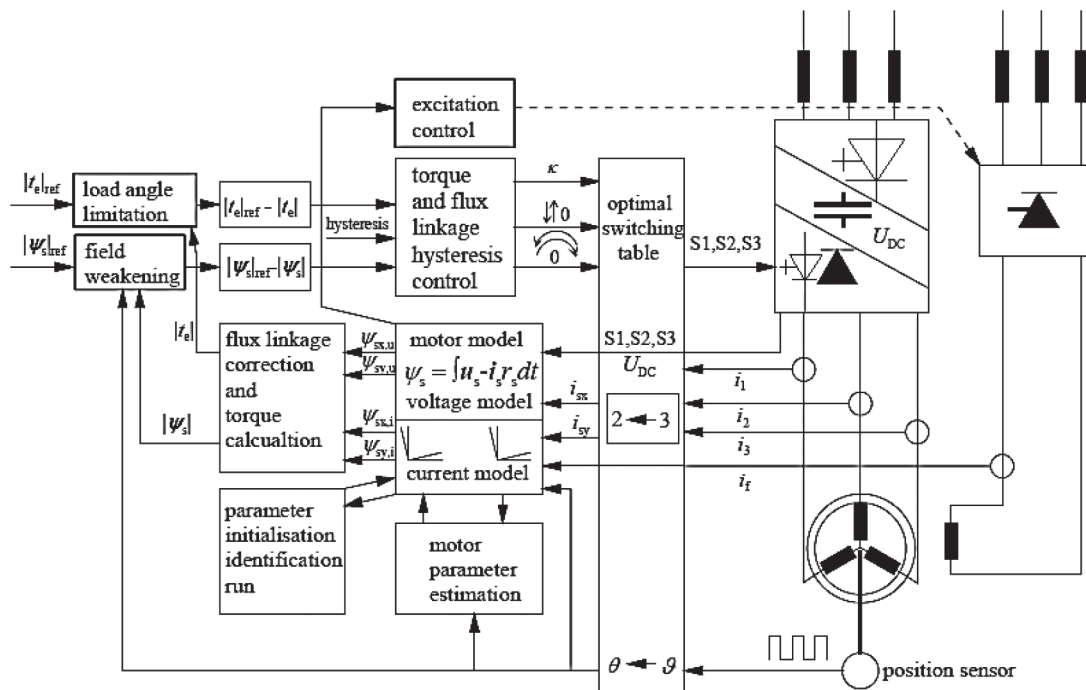


Рис. 6. Функциональная схема управления синхронным двигателем

Алгоритм работы системы *DTC* реализуется следующим образом. Вначале определяется вектор потокосцепления статора  $\psi_s$  и электромагнитный момент синхронного двигателя  $M_e$  (на рис. 6 —  $t_e$ ). Затем модуль вектора потокосцепления статора и момент сравниваются с заданными значениями ( $|\psi_s|_{ref} - |\psi_s|$  и  $|t_e|_{ref} - |t_e|$ ), после чего с помощью компараторов, называемых *релейными регуляторами*, формируются логические сигналы ошибки (0 или 1). На основании этих сигналов и знания положения вектора потокосцепления на плоскости базовых векторов, выбирается такая комбинация состояний ключей инвертора, при которой будет сформирован базовый вектор напряжения, минимизирующий отклонение потокосцепления статора и электромагнитного момента от заданных значений. Таким образом, в результате работы системы модуль потокосцепления статора и электромагнитный момент будут постоянно находиться в зоне допустимого отклонения от заданного значения, определяемого величиной гистерезиса соответствующего регулятора. Выбор базового вектора зависит от сектора, в котором в данный момент находится вектор  $\psi_s$ , и осуществляется с помощью переключающей таблицы (*Optimal Switching Table*). Переключающая таблица состоит из оцифрованных сигналов рассогласования по потоку (1 – 0), моменту (1 – 0 – 1) и информации, в каком секторе системы координат, связанной со статором, находится вектор потока статора синхронного двигателя. Выбор оптимального вектора напряжения производится из восьми возможных базовых векторов напряжения.

Главными управляющими блоками являются: релейный блок с гистерезисом для управления крутящим моментом и потокосцеплением, блок с таблицей оптимальной коммутации, модель расчета фактических значений потокосцепления статора и момента двигателя, регулятор потокосцепления для ослабления поля, ограничитель угла нагрузки для удержания привода в стабильной рабочей зоне, блок контроля возбуждения. Блок контроля возбуждения осуществляет контроль коэффициента мощности при быстро изменяющихся нагрузках с целью повышения устойчивости привода [9].

На функциональной схеме показаны:

- $\psi_{sx,u}, \psi_{sy,u}$  — составляющие потокосцепления статора в модели напряжения в  $xu$ -координатах;
- $\psi_{sx,i}, \psi_{sy,i}$  — составляющая потокосцепления статора в модели тока в  $xu$ -координатах;

- $i_{sx}, i_{sy}$  — составляющие тока статора в  $xu$ -координатах;
- $i_f$  — ток возбуждения ротора.

### Тормозные режимы винторулевого комплекса Azipod танкера ледового класса

Торможение судна с системой Azipod может осуществляться двумя способами:

- реверсированием гребного электрического двигателя (10 – 20 с);
- разворотом винторулевой колонки (ВРК) на 180°.

Для преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем на входе при рассмотрении вопроса торможения и реверса судна нужно учитывать, что энергия, возвращаемая в сеть двигателем, может гаситься только на тормозном резисторе, так как её передача в судовую сеть для использования не представляется возможной.

Необходимо учитывать недостатки и достоинства того или иного способа торможения. В том случае, когда реверсируется ГЭД, необходимо рассеивать значительную тормозную энергию в мощных тормозных резисторах или осуществлять её рекуперацию в питающую сеть. При этом мощность привода поворота ВРК будет меньше, чем при втором способе торможения судна.

В [10] показано, что торможение ГЭУ с применением тормозных резисторов может быть использовано в качестве основного способа на судах с прямой передачей вращающего момента на винт. На судах с винто-рулевыми колонками этот вид торможения целесообразно применять при остановке ГЭД, а торможение и реверс судна осуществлять разворотом винто-рулевых колонок. Разворот Azipod на 180° занимает 20 – 25 с.

Вся энергия при торможении ГЭД рассеивается в виде тепла в блоке тормозных резисторов. При этом возможно использовать перераспределение энергии торможения через соединенные коммутирующими цепями звенья постоянного тока (ЗПТ) инверторных преобразователей частоты гребных электродвигателей [11]. Оптимизацию параметров режима реверса ГЭД по критерию минимизации времени реверса и ограничениями по обеспечению управляемости судна и качества электроэнергии в электроэнергетической системе предлагается организовать с помощью интеллектуального управления рекуперативной энергии при торможении на основе предсказательного моделирования.

Однако среди достоинств данного способа есть существенный недостаток. Для выравнивания токов при объединении цепей постоянного тока преобразователей частоты, систему необходимо дополнить коммутационной аппаратурой, уравнительными соединениями и ключами со сложным алгоритмом включения и выключения ЗПТ каждого гребного электропривода. Поэтому перспективным направлением по оптимизации тормозных режимов является использование ЕЭЭС с общей шиной постоянного тока [12], [13].

Для оценки работы тормозных резисторов рассмотрим характеристики гребного винта и часть механической характеристики ГЭД, формируемой системой управления  $P = \text{const}$  (рис. 7).

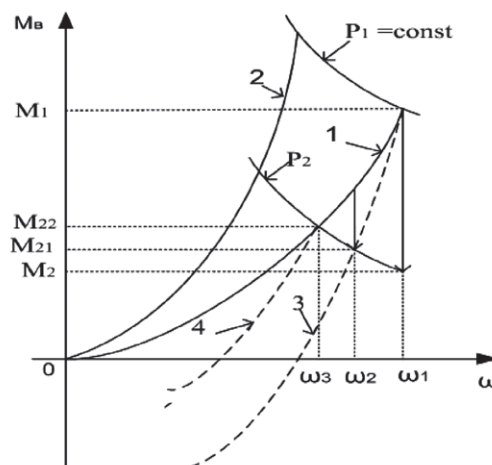


Рис. 7. Винтовые и механические характеристики ГЭД

Кривые 1 и 2 соответствуют характеристике хода в свободной воде и швартовой характеристике. Кривые 3 и 4 — реверсивные характеристики для различной скорости хода судна  $V_1$  и  $V_2$ , причем  $V_1 > V_2$ .

Допустим, что торможение винта начинается в исходной точке с параметрами  $M_1$  и  $\omega_1$ , что соответствует мощности ГЭД  $P_1$ . Оператор (судоводитель) системой Azipod переходит в режим работы судна с меньшим значением мощности  $P_2$ , и по окончании переходного процесса частота вращения достигнет значения  $\omega_3$ , а момент вращения —  $M_{22}$ .

Частота вращения винта с  $\omega_1$  до  $\omega_3$  мгновенно измениться не может, поэтому в первый момент времени возникает разность момента сопротивления  $M_1$  и момента вращения  $M_2$   $\Delta M = M_2 - M_1$ , которая создает мощность торможения  $P_t = \Delta M \omega_1$ . Эта мощность имеет отрицательный знак. Под действием тормозного момента частота вращения винта быстро уменьшается до  $\omega_2$  в соответствии с реверсивной характеристикой 3. В этой точке торможение замедляется, поскольку гребной винт начинает подкручиваться под действием кинетической энергии вращающихся на гребном валу масс и потока воды при движении судна. Торможение судна — значительно более инерционный процесс, чем торможение винта. Поэтому переход на новое значение мощности  $P_2$  заканчивается тогда, когда судно уменьшит скорость хода до значения, соответствующего реверсивной характеристике 4.

В синхронном двигателе с преобразователем частоты со звеном постоянного тока при изменении знака мощности двигателя  $P_t$  изменяется и направление тока в звене постоянного тока  $I_d$ . Первоначально это приводит к заряду конденсатора  $C$  током  $I_d$ . Напряжение на конденсаторе  $U_d$  растет, но оно не должно превысить допустимых значений. В связи с этим основная часть энергии торможения передается на тормозные резисторы  $R_t$ , которые управляются тиристорным ключом  $VS_t$  (рис. 8).

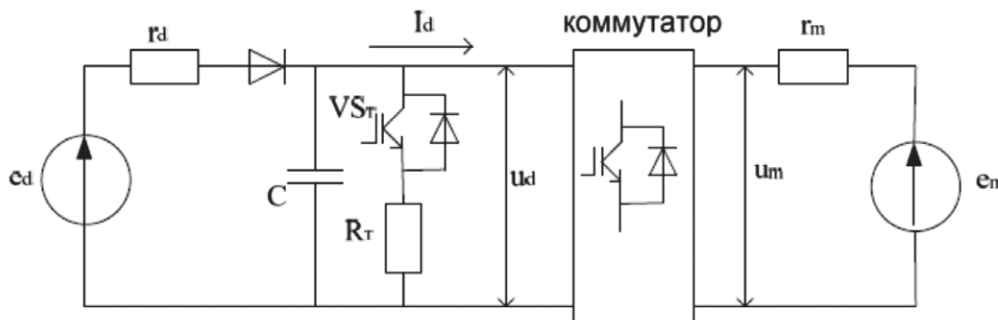


Рис. 8. Расчетная схема гребного электропривода при торможении судна:

- $e_d$  и  $e_m$  — ЭДС выпрямителя и ЭДС вращения ГЭД;
- $u_d$  и  $u_m$  — напряжение на выходе выпрямителя и напряжение на статорной обмотке двигателя;
- $r_d$  и  $r_m$  — внутреннее сопротивление выпрямителя и сопротивление статорной обмотки двигателя;
- $C$  — конденсатор в звене постоянного тока;  $R_t$  — тормозной резистор;
- $VS_t$  — транзисторный ключ, управляющий тормозным резистором

Система управления ключом построена по сигналу напряжения в звене постоянного тока  $U_d$ . Обратная связь по напряжению на конденсаторе является основной, чтобы не допустить значительных заряд-разрядных токов конденсатора. Интенсивность торможения определяется энергией торможения ГЭД, которая зависит от скорости хода судна, частоты вращения винта, интенсивности изменения режимов работы судна судоводителем.

Момент  $\Delta M$  и мощность торможения  $P_t$  относительно невелики, поэтому интенсивность торможения винта меньше  $\left( J \frac{dn}{dt} = \Delta M \right)$ , чем в случае торможения винта путем задания отрицательного момента вращения.

Произведем расчёт тормозного резистора при известных параметрах ГЭД, учитывая что часть энергии томожения будет рассеиваться в конденсаторной батарее при ее заряде [14], [15]:

- приведенный момент инерции  $J = 19100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;
- масса ротора — 69000 кг;
- частота вращения номинальная  $n = 97 \text{ об/мин}$ ;
- момент вращения  $M_{\text{ном}} = 837 \text{ кН}\cdot\text{м}$ .

Определим значение энергии торможения при условии изменения частоты вращения от 140 об/мин ( $n_{\text{max}}$ ) до 74 об/мин.

Значение кинетической энергии на валу гребного двигателя

$$W = \frac{J \cdot \omega^2}{2}.$$

Значение энергии заряженного конденсатора

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}.$$

Изменение энергии системы, при её переходе со 140 об/мин на 74 об/мин, будет составлять

$$\Delta W_m = J \cdot \left( \frac{\omega_1^2}{2} - \frac{\omega_2^2}{2} \right).$$

Изменение энергии на конденсаторе

$$\Delta W_c = C \cdot \left( \frac{U_1^2}{2} - \frac{U_2^2}{2} \right).$$

Изменение энергии системы при переводе в рад/с

$$\Delta W_m = 19100 \cdot \left( \frac{14,66^2}{2} - \frac{7,749^2}{2} \right) = 1478995,12 \text{ Дж} \approx 1,5 \text{ МДж}.$$

Определим значение энергии, которая пойдёт на заряд конденсаторной батареи. В схеме ПЧ используется два конденсатора, каждый емкостью по 1,6 мФ. Напряжение на конденсаторе при  $n = 140 \text{ об/мин}$  равно 3000 В, предельное напряжение на конденсаторе должно быть не более 10 % от номинального (3300 В), следовательно,

$$\Delta W_c = 0,0032 \cdot \left( \frac{3300^2}{2} - \frac{3000^2}{2} \right) = 3024 \text{ Дж}.$$

В схеме ПЧ установлено два резистора. При выборе тормозного резистора надо определить его параметры (сопротивление, предельную силу тока, мощность рассеивания), также нужно учесть исполнение оболочек, габариты и возможность установки в блоке ACS 6000. В таблице приведены возможные материалы, из которых могут быть изготовлены тормозные резисторы. Для изготовления резисторов применяются сплавы из различных материалов: меди, никеля, стали, марганца, хрома, алюминия, а также чугуна.

#### Характеристики материалов тормозных резисторов

Наименование и состав	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Максимальная рабочая температура, °С	Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), $10^{-5}\cdot\text{К}^{-1}$
Манганин МНЦ3-12 (Cu, Mn, Ni)	43	300	4
Константан МНМц 401.5 (Cu, Ni, Mn)	50	500	3
Нейзильбер МНЦ 15-20 (Cu, Ni, Zn)	32	200	36



(Окончание)

Нихром Х15Н60 (Ni, Cr, Fe)	107	1100	17
Фехраль Х27Ю5Т (Cr, Fe, Al, Ti)	120	1350	10
Жаростойкий сплав Х20Н80 (Ni, Cr, Fe)	140	1200	8
Чугун (Fe, C)	80	400	100
Сталь (проволока)	17	300	600
Сталь листовая электротехническая (Fe, Si)	30	200	200

С учетом максимальной рабочей температуры, выбирается тормозной резистор с большой рассеиваемой мощностью серии CNS из NiCrMo. На рис. 9 приведена схема соединения тормозных резисторов.

### Power Circuit

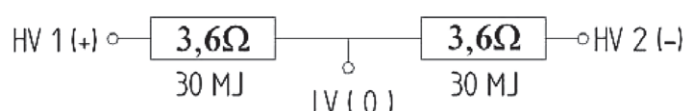


Рис. 9. Принципиальная схема соединения тормозных резисторов (силовой контур)

Силовой тормозной контур (Power Circuit) состоит из двух последовательно соединенных резисторов, подключенных к нейтральной точке  $LV(0)$ .

Характеристики резистора серии CNS:

- охлаждение — естественное воздушное;
  - материал — NiCrMn;
  - изменение сопротивления от 20 °С до 550 °С — 9 %;
  - значение сопротивления при 20 °С —  $2 \cdot 3,6$  Ом;
  - значение сопротивления при 550 °С —  $2 \cdot 3,9$  Ом;
  - максимальная сила тока — 1000 А;
  - рабочий цикл — 20 с каждые 30 мин;
  - максимальная кратковременная мощность в течение 20 с —  $2 \cdot 1500$  кВт, рассеиваемая мощность — 60 МДж;
  - номинальное напряжение — 2,8 кВ постоянного тока (максимальное напряжение — 3,2 кВ).
- Значение энергии, идущей на нагрев резистора:

$$\Delta W_m - \Delta W_c = W;$$

$$W = 1478995,12 - 3024 = 1475971,12 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$W = 73,798 \text{ кВт на } 20 \text{ с.}$$

Эта энергия выделится в виде тепла

$$W = Q.$$

В соответствии с законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

Определим значение тормозного тока

$$I = \sqrt{\frac{Q}{tR}} = \sqrt{\frac{1475971,12}{20 \cdot 3,6 \cdot 2}} = 101,24 \text{ А.}$$

В случае торможения судна посредством реверсирования ГЭД, он переходит в режим гидротурбины за счет подкручивающего потока воды и реализует необходимую рекуперативную мощность. Оценим значение энергии рекуперации:

- водоизмещение судна 94858,6 т;
- скорость судна 16 уз (8,23 м/с).

Значение кинетической энергии движущегося судна

$$W_{\text{судно}} = \frac{m_A \cdot v_c^2}{2} = \frac{94858600 \cdot 8,23^2}{2} = 3212,5 \text{ МДж.}$$

Часть этой энергии пойдет на подкручивание гребного винта.

### Выводы

1. Построение единой электроэнергетической системы танкера ледового класса на базе сети постоянного тока упростит алгоритм торможения гребных электродвигателей. При этом энергия торможения, генерируемая в одном гребном электродвигателе, может передаваться на другие инверторы по общей шине постоянного тока без потребления энергии из сети питания.

2. Использование частотного способа управления синхронным ГЭД в виде прямого управления моментом (DTC) позволяет обеспечить высокое быстродействие и точность реализации как двигательных, так и тормозных режимов ГЭУ танкера ледового класса.

3. Расчет и выбор тормозных резисторов для судна с винторулевым комплексом типа Azipod зависит от способа торможения судна. Целесообразно производить расчет и выбор тормозных резисторов для режима торможения ГЭД без учета его реверса. При этом значительно уменьшается мощность рассеивания, масса и габариты тормозных резисторов.

4. В случае реверса судна посредством разворота Azipod на 180° при ходе судна в свободной воде необходимо учитывать повышенные нагрузки при расчете мощности привода поворота Azipod.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fifth Arctic Shuttle Tanker Launched // Arctic Passion News. — 2010. — № 1. — Pp. 8–9.
2. Ямщиков Д. «Приразломная»: первый опыт нефтедобычи на арктическом шельфе / Д. Ямщиков // Безопасность объектов ТЭК. — 2013. — № 2. — С. 54–57.
3. Бакшанов А. А. К выбору гребных электродвигателей для ледоколов / А. А. Бакшанов, В. В. Романовский // Материалы науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб., 2013. — С. 116–122.
4. Быков А. С. ГЭУ атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.
5. Привод переменного тока среднего напряжения ACS 6000, 3-27 МВ, 6,0 – 6,9 кВ. Технический каталог. — Корпорация АВВ, 2004. — 15 с.
6. Иванов В. С. Анализ систем автоматического управления судовым асинхронным электроприводом / В. С. Иванов, Л. О. Саловский, Б. В. Шняк // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1. — С. 50–51.
7. Merzoug M. S. Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm) / M. S. Merzoug, F. Naceri // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. — 2008. — Vol. 35. — Pp. 299–304.
8. Романовский В. В. Электрооборудование морских комплексов: монография / В. В. Романовский, В. Н. Куракин, В. С. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 244 с.

9. *Pyrhönen O.* Analysis and Control of Excitation, Field Weakening and Stability in Direct Torque Controlled Electrically Excited Synchronous Motor Drives: Research papers / O. Pyrhönen. — Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1998. — 117 p.

10. *Григорьев А. В.* Анализ тормозных режимов гребных электрических установок / А. В. Григорьев, А. С. Быков // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3. — С. 62–66.

11. *Иванова М. К.* Моделирование режимов реверса ледокола проекта 22220 / М. К. Иванова, И. М. Калинин, В. С. Соловей // Конференция молодых ученых и специалистов 2015: тезисы докладов. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2015. — С. 52–54.

12. *Иванов В. С.* Судовой частотно-регулируемый многодвигательный привод / В. С. Иванов, В. С. Соловей // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 67–71.

13. *Иванова М. К.* Новые принципы управления торможением судовых гребных электродвигателей / М. К. Иванова, И. М. Калинин, В. С. Соловей // Международная конференция по судостроению и океанотехнике 2016: тез. докладов. — СПб.: Изд-во ГМТУ, 2016. — С. 45–46.

14. *Хорошенький А. В.* Торможение судна с винторулевыми колонками / А. В. Хорошенький // Материалы VII межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции развития водного транспорта России». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 202–205.

15. *Андронников Д.* Особенности выбора и применения резисторов в силовой технике / Д. Андронников // Силовая электроника. — 2007. — № 12. — С. 4–8.

## CALCULATION AND SELECTION OF BRAKE RESISTORS, ELECTRIC PROPELLER THE INSTALLATION OF THE TANKER

*In the article the unified power system of the tanker of an ice class, which includes rowing electrical installation AC-AC frequency converters with an intermediate DC link and the propeller synchronous motors is considered. The tanker is equipped with two azimuth columns of type Azipod. The schemes of the main current and automatic control system electric propeller installation in the modes of stabilization of frequency of rotation and capacity of the propeller of the motor are presented. Considered the topology of the modular frequency Converter medium voltage ACS 6000 concern AAB using high-power semiconductor keys (IGCT – lockable thyristors with integrated control unit). Their use allows to obtain a less complex, more efficient and reliable medium voltage drive with reduction of costs of operation and maintenance. The algorithm for direct torque control of synchronous propeller of the motor, the main advantages of which in comparison with vector control is easier to program implementation and ensuring greater performance is considered. The methods of the deceleration of the tanker, without reversing the propeller of the motor by reversal azimuth column and reverse propeller of the motor are considered. The first method is more appropriate from the point of view of the required power of the brake resistors. For redistribution of braking energy, a promising direction is the implementation of the unified power system of the tanker of an ice class on the basis of the DC network. The article made the calculation and selection of the brake resistors of the frequency Converter of rowing electrical installations of tankers ice-class when braking of a ship by reversal azimuth column.*

*Keywords: propulsion electrical system, frequency converter with DC link, a synchronous propeller motor, automatic control system, the braking modes, braking resistors.*

### REFERENCES

1. “Fifth Arctic Shuttle Tanker Launched.” *Arctic Passion News* 1 (2010): 8–9.
2. Yamshchikov, D. “«Prirazlomnaya»: pervyj opyt neftedobychi na arkticheskom shelfe.” *Bezopasnost obektov TEHK* 2 (2013): 54–57.
3. Bakshanov, A. A., and V. V. Romanovskij. “K vyboru grebnyh ehlektrodvigatelej dlya ledokolov.” *Materialy nauch.-prakt.konf., posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.N. Krylova*. SPb, 2013: 116–122.
4. Bykov, A. S., V. V. Bashaev, V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskij. *GEHU atomnyh ledokolov*. EHMor, 2004.
5. *Privod peremennogo toka srednego napryazheniya ACS 6000, 3-27 MV, 6,0 – 6,9 kV. Tekhnicheskij katalog*. «ABB», 2004.

6. Ivanov, V. S., L. O. Salovskij, and B. V. Shnyak. "Analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya sudovym asinhronnym ehlektroprivodom." *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (2007): 50–51.
7. Merzoug, M. S., and F. Naceri. "Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm)." *Proceedings of world academy of science, engineering and technology* 35 (2008): 299–304.
8. Romanovskij, V. V., V. N. Kurakin, and V. S. Ivanov. *Elektrooborudovanie morskikh kompleksov*. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.
9. Pyrhönen, O. Analysis and Control of Excitation, Field Weakening and Stability in Direct Torque Controlled Electrically Excited Synchronous Motor Drives. Research papers. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1998.
10. Grigoryev, A. V., and A. S. Bikov. "Analysis of braking modes of electric propulsion plants." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2010): 62–66.
11. Ivanova, M. K., I. M. Kalinin, and V. S. Solovej. "Modelirovanie rezhimov reversa ledokola proekta 22220." *Konferenciya molodyh uchenyh i specialistov 2015. Tezisy dokladov*. SPb.: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2015: 52–54.
12. Ivanov, V. S., and V. S. Solovej. "Marine multy-variable frequency drive." *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. 31 marta 2015 g.* Vol. 2. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015: 67–71.
13. Ivanova, M. K., I. M. Kalinin, and V. S. Solovej. "Novye principy upravleniya tormozheniem sudovyh grebnyh ehlektroprivodov." *Mezhdunarodnaya konferenciya po sudostroeniyu i okeanotekhnike 2016. Tezisy dokladov*. SPb.: GMTU, 2016: 45–46.
14. Horoshenskij, A. V. "Tormozhenie sudna s vinto-rulevymi kolonkami." *Materialy VII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 202–205.
15. Andronnikov, D. "Osobennosti vybora i primeneniya rezistorov v silovoj tekhnike." *Silovaya ehlektronika* 2 (2007): 4–8.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мальшев Владимир Алексеевич* —  
кандидат технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*mva1945spb@mail.ru*  
*Иванов Владимир Сергеевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*vlad-iv-ov@yandex.ru, edas@gumrf.ru*  
*Соловей Валерий Сергеевич* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Иванов Владимир Сергеевич*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*walbel@mail.ru*

#### IFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Malyshev Vladimir Alekseevich* —  
PhD, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*mva1945spb@mail.ru*  
*Ivanov Vladimir Sergeevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*vlad-iv-ov@yandex.ru, edas@gumrf.ru*  
*Solovey Valery Sergeevich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Ivanov Vladimir Sergeevich*.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*walbel@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 22 августа 2016 г.



## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*В статье показано, что оптимальное проектирование современной автоматизированной судовой электроэнергетической системы в существенной мере определяется тем, насколько точно учтены при этом особенности переходных процессов при аварийных коротких замыканиях в сети и, в частности, при близких к судовым генераторным агрегатам повреждениях. Выявлено и подтверждено, что каждое многофазное замыкание является, в той или иной мере, неодновременным. В автономных (судовых, корабельных) электроэнергетических системах типичными особенностями неодновременных (последовательных) замыканий являются повышенные ударные токи и задержки прохождения токов через нуль. В данной статье разработана методика расчетов токов коротких замыканий с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах, которая позволяет повысить их электро- и пожаробезопасность. Рассмотрено существенное влияние на величину тока короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах сопротивления электрической дуги в месте короткого замыкания на судне, которое возрастает с увеличением отношения длины дуги в метрах к расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, а также с увеличением активного сопротивления участка электрической сети до места короткого замыкания. Выполнены расчеты токов коротких замыканий с учетом сопротивления электрической дуги для судовых электроэнергетических систем с номинальными напряжениями 220, 380 и 500 В. В судовой электроэнергетике предложена новая формула, расчеты по которой позволяют получать однозначные и точные значения сопротивления электрической дуги. Подтверждено, что формула может быть использована для расчетов сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах любого напряжения.*

*Ключевые слова:* судовая электроэнергетическая система, электрическая дуга, короткое замыкание, токи короткого замыкания, сопротивление электрической дуги, перемежающаяся дуга, двухфазное короткое замыкание.

### **Введение**

Продолжающиеся работы по строительству современных автоматизированных судов и ледоколов нового поколения ведут к укрупнению электроэнергетических систем, судовых электростанций и гребных электрических установок на базе полупроводниковых преобразователей частоты, к увеличению общей протяженности кабельных коммуникаций и росту мощностей автономных электростанций, а это, в свою очередь, приводит к увеличению токов короткого замыкания (КЗ). В данной статье разработана методика расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС), которая позволяет повысить их электро- и пожаробезопасность.

Оптимальное проектирование современной СЭЭС в значительной мере зависит от того, насколько правильно учтены при этом особенности переходных процессов при аварийных КЗ в энергосистеме и в особенности при близких к судовым генераторам повреждениях. Любое многофазное замыкание является, в той или иной мере, неодновременным. На судах типичными особенностями неодновременных (последовательных) замыканий являются повышенные ударные токи и задержка прохождения токов через нуль.

### **Методика расчета**

Непрерывный рост мощности судовых электростанций составляет главную тенденцию в развитии отечественной и мировой судовой электроэнергетики. Удвоение роста мощностей су-

довых электростанций происходит приблизительно каждые 10 лет. С этим связано увеличение единичной мощности судовых синхронных генераторов, что, в свою очередь, является основным направлением прогресса в области крупного электромашиностроения для судостроения и отрасли водного транспорта.

Мощность судовых (корабельных) синхронных турбогенераторов растет, главным образом, за счет увеличения линейной токовой нагрузки статора при почти неизменных геометрических размерах и мало изменяющейся индукции в воздушном зазоре. Следствием этого являются рост величин реактивных сопротивлений  $X_d$ ,  $X'_d$  и  $X''_d$ . Кроме того, как показывает линия регрессии  $\frac{T_a^{(3)}}{T_a''^{(3)}} = f(S)$ , представленная на рис. 1 в полулогарифмических координатах для двухполюсных турбогенераторов отечественного производства, с ростом номинальной мощности постоянные времени якоря  $T_a^{(3)}$ , характеризующие затухание апериодического тока, увеличиваются существенно быстрее сверхпереходных постоянных времени  $T_a''^{(3)}$ .

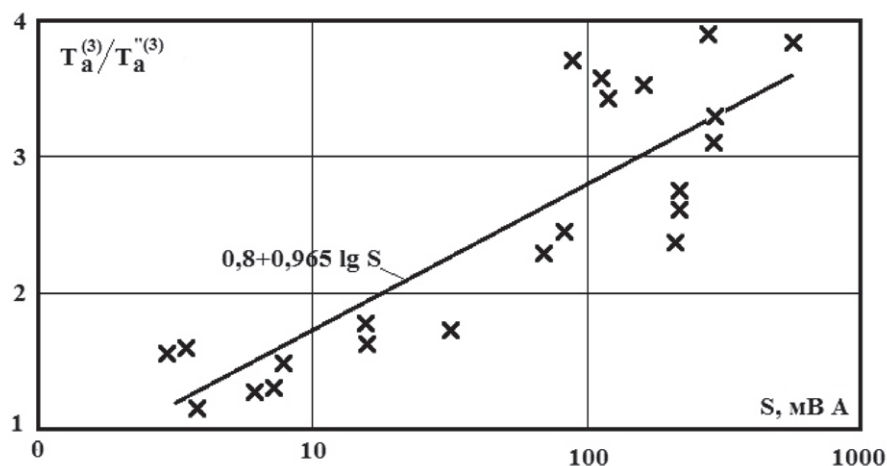


Рис. 1. Зависимость  $\frac{T_a^{(3)}}{T_a''^{(3)}} = f(S)$

для трехфазных двухполюсных турбогенераторов отечественного производства

В результате в судовых электростанциях при КЗ на выводах современного турбогенератора затухание апериодического тока в начале переходного процесса происходит медленнее, чем периодического, и может возникнуть задержка прохождения тока одной или двух фаз через нуль. Последнее обстоятельство способно чрезвычайно затруднить работу быстродействующего автоматического выключателя [1]. В высоковольтных СЭЭС в случае аварийного КЗ на стороне высшего напряжения блока «турбогенератор – трансформатор» затухание апериодического тока ускоряется трансформатором. Однако, чем выше номинальные мощность и напряжение трансформатора морского исполнения, тем ниже его активное сопротивление КЗ —  $r_{кз}$ , отнесенное к индуктивности КЗ:  $\frac{X_{кз}}{\omega}$  (рис. 2), и тем, следовательно, слабее содействие судового трансформатора затуханию апериодических токов.

Кроме того, возрастание реактивных сопротивлений судовых синхронных генераторов неблагоприятно сказывается на динамической устойчивости СЭЭС, одним из средств повышения которой является уменьшение времени срабатывания автоматических выключателей на судах [1]. В настоящее время в России и за рубежом созданы автоматические быстродействующие выключатели с собственным временем срабатывания — не более двух периодов основной частоты тока. Дальнейший прогресс в области автоматических сверхбыстродействующих выключателей будет, по-видимому, связан с применением управляемого полюсного отключения при тяжелых условиях КЗ (например, в случае повышенных апериодических составляющих токов). Возмож-

но, что таким способом удастся на судах морского и речного флота удовлетворить предъявляемые к судовым автоматическим выключателям уже в настоящее время современные требования, которые связаны с гарантией их успешной работы в специфических коммутационных режимах, в том числе при отключении не удалённых КЗ.

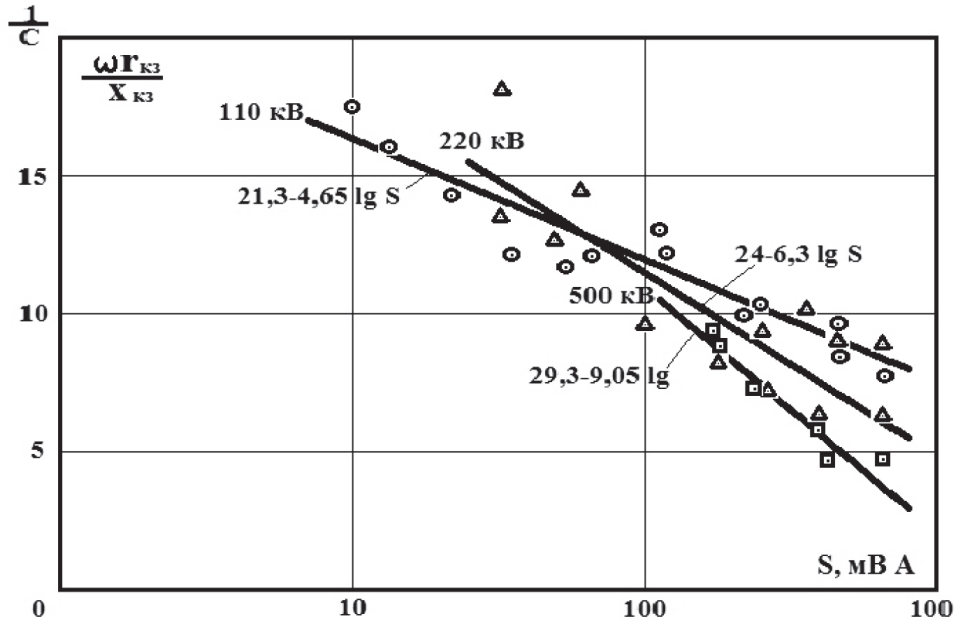


Рис. 2. Зависимость  $\frac{\omega r_{кз}}{X_{кз}} = f(S)$

для отечественных трехфазных обмоточных трансформаторов

Возможность управляемого отключения КЗ технически согласуется с намечающимся переходом к непосредственной автоматизации управления нормальными и аварийными режимами автономных (судовых, корабельных) электроэнергетических систем. По прогнозам, к 2020 г. в судовой электроэнергетике экипаж судна (человек) будет полностью отстранен от принятия решений, в частности, при возникновении аварийных ситуациях. В судовой электроэнергетике актуальной является проблема одновременных или последовательных (так называемых *постепенных, каскадных, развивающихся* и др.) аварийных КЗ в СЭЭС с турбогенераторами и трансформаторами.

На практике при проектировании СЭЭС серия расчетов токов КЗ производится традиционно для случаев так называемых *металлических замыканий без переходных сопротивлений*, а возможное уменьшение токов КЗ, из-за переходных сопротивлений, учитывается введением коэффициента запаса при расчете уставок защит [1] – [6]. Однако принимаемые коэффициенты запаса не всегда обеспечивают требуемую чувствительность защиты СЭЭС. В СЭЭС значительное влияние на величину тока КЗ может оказывать сопротивление дуги в месте КЗ, которое возрастает с увеличением отношения длины дуги в метрах к расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, а также с увеличением активного сопротивления участка электрической сети до места КЗ [7] – [14].

Расчеты токов КЗ выполнены с учетом сопротивления электрической дуги для СЭЭС с номинальными напряжениями 0,22, 0,38 и 0,5 кВ. При расчетах учитывались сопротивления кабелей, шин, трансформаторов тока, автоматических выключателей, а также активные сопротивления генераторов, питающих места КЗ [8] – [12]. Достоинство предложенной методики состоит в том, что такие процедуры можно легко алгоритмизировать и проводить в любой вычислительной среде, вплоть до Microsoft Office Excel. В данном случае вычислительные процедуры выполнены в среде MathCAD, которая предоставляет широкие возможности, в частности матричных вычислений.

Экспериментальные исследования открытых электрических дуг, проведенные в СССР, показывают, что при достаточно больших значениях токов повреждения (сотни ампер и более) градиент напряжения в дуге почти не зависит от тока и может приниматься 1,4 – 1,5 кВ на 1 м длины дуги (амплитудное значение) [13]. Принимая эти данные, сопротивление электрической дуги (действующее значение), являющееся практически чисто активным, определим по выражению, полученному на основании опытов [14]:

$$R_d = \frac{1050L_d}{I_d}, \quad (1)$$

где  $L_d$  — длина электрической дуги, м;  $I_d$  — ток в дуге, А;  $R_d$  — активное сопротивление дуги, Ом.

В публикации [14] утверждается о возможности использования выражения (1) для расчетов сопротивления электрической дуги в сетях напряжения 0,22 кВ – 1,0 кВ, а также в сетях более высокого напряжения. Авторы данной статьи не располагают техническими сведениями о рекомендациях относительно применения этого выражения для расчетов в сетях только определенного диапазона номинальных напряжений, а также об ограничениях по его использованию. Например, на Черепетской ГРЭС Тулэнерго расчеты токов КЗ выполнялись в соответствии с выражением (1), при этом экспериментальные исследования, подтверждающие результаты расчетов, не производились. В расчетах принималась длина дуги в момент ее возникновения, равная расстоянию между шинами в месте КЗ.

Выбор уставок защит производился на основании результатов расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в момент ее возникновения. В начальный период возникшего повреждения длина и сопротивление дуги имеют минимальные значения, а ток КЗ — максимальное. В последующие периоды, по мере удлинения электрической дуги под влиянием конвекции воздуха и электродинамических усилий, длина и сопротивление электрической дуги могут существенно возрасти [15], [16].

Выражение (1) определяет зависимость между сопротивлением электрической дуги  $R_d$  и током  $I_d$  при определенной длине дуги  $L_d$  и соответствующем напряжении на дуге  $U_d = 1050L_d$ , но не учитывает при этом изменения суммарного сопротивления сети с появлением сопротивления возникшей дуги, от которого зависит ток в дуге, а следовательно, и сопротивление дуги. Существующая методика однократного расчета сопротивления дуги по выражению (1) не всегда обеспечивает необходимую точность расчета. Точное сопротивление дуги может быть получено в результате проведения большого числа последовательных расчетов, выполнение которых необходимо осуществлять на компьютере (микрокалькуляторе) по специальной программе. В публикации [14] для практических расчетов сопротивления электрической дуги предлагается формула, дающая однозначное и точное значение сопротивления электрической дуги, соответствующее выражению (1).

Формула для расчета сопротивления электрической дуги в месте КЗ при одно-, двух- и трехфазных симметричных КЗ имеет вид

$$R_d = A \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + \frac{Z_1^2}{A}} \right), \quad (2)$$

где  $R_1, X_1, Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$  — активное, реактивное и полное сопротивление сети при КЗ без дуги;

$$A = \frac{U_d^2}{U_p^2 - U_d^2} \text{ — коэффициент;}$$

$U_p$  — расчетное напряжение, которое в зависимости от вида КЗ принимается по отношению к номинальному напряжению сети равным:

$$\begin{aligned} &\text{— для трехфазного и однофазного КЗ } U_p = 1,05 \frac{U_n}{\sqrt{3}}; \\ &\text{— для двухфазного КЗ } U_p = 1,05U_n. \end{aligned}$$

Здесь  $U_n$  — номинальное напряжение сети;



$U_d$  — напряжение на дуге.

Соответственно активное, реактивное и полное сопротивления сети при КЗ с дугой составляют:  $R_{11} = R_1 + R_d$ ;  $X_{11} = X_1$ ;  $Z_{11} = \sqrt{R_{11}^2 + X_1^2}$ , где  $R_d$  — активное сопротивление дуги.

Формула (2) может быть использована для расчетов в сетях любого напряжения при условии сохранения закономерностей, определяемых выражением (1). Для выполнения расчетов в эту формулу (2) вводятся суммарные сопротивления сети и коэффициент А в соответствии с видом КЗ (одно-, двух- или трехфазное симметричное).

Проверка результатов расчетов производится в соответствии с выражением (1), т. е.  $U'_d = I_{11}R_d = U_d = 1050L_d$  или  $\frac{U'_d}{U_d} = 1$ , где  $I_{11} = \frac{U_p}{Z_{11}}$  — ток аварийного КЗ с учетом дуги в месте повреждения.

Для автоматизации, упрощения и ускорения расчетов сопротивления дуги  $R_d$  по формуле (2), а также суммарных сопротивлений сети и токов аварийных КЗ разработана программа расчетов на компьютере (микрокалькуляторе). При исходных данных  $U_p$ ,  $R_1$ ,  $X_1$ ,  $L_d$  и 1050 по предложенной программе автоматически вычисляются  $U_d$ ,  $A$ ,  $Z_{11}$ ,  $I_{11}$ ,  $R_d$ ,  $R_{11}$ ,  $Z_{11}$ ,  $I_{11}$ ,  $U'_d$  и  $\frac{U'_d}{U_d}$ . Ток аварийного КЗ

без учета электрической дуги определяется по формуле  $I_1 = \frac{U_p}{Z_1}$ .

Разработан алгоритм расчетов токов двухфазного и однофазного КЗ с учетом сопротивления дуги для автономных (судовых, корабельных) СЭЭС. Расчет суммарных сопротивлений судовой электрической сети выполнен в соответствии с типовой методикой, разработанной ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Сопротивление электрической дуги в момент ее возникновения вычислялось по формуле (2). Все расчеты производились на компьютере (отечественном микрокалькуляторе) по разработанному алгоритму и реализованной рабочей программе. Анализ выполненных автоматизированных расчетов показывает, что токи КЗ с дугой в момент ее возникновения уменьшаются относительно токов КЗ без дуги до 0,835 – 0,495 при двухфазных аварийных КЗ и до 0,685 – 0,355 при однофазных.

Сопротивление электрической дуги в месте аварийного КЗ существенно зависит от активного сопротивления судовой питающей сети. Значительная разница в величине отношений  $\frac{I_{11}}{I_1}$  при двух- и однофазных КЗ на различных судовых секциях 0,38 кВ определяется отличием суммарных активных сопротивлений судовой сети до соответствующих мест КЗ на судах. Определение сопротивления дуги целесообразно производить автоматизированными расчетами с учетом сопротивлений всех элементов электрической сети судна. При автоматизированном проектировании СЭЭС использование в расчетах токов КЗ только заданных определенных сопротивлений дуги или коэффициентов запаса в случае выбора уставок защит, без учета реальных сопротивлений судовой сети и расчетных сопротивлений электрической дуги в месте КЗ, приводит часто к завышению токов КЗ и уставок быстродействующих защит, а иногда и к их занижению [17] – [19].

Как известно, после возникновения электрической дуги ее длина и сопротивление увеличиваются в процессе аварийного КЗ в СЭЭС. По выражению (1) можно определить расчетную теоретическую максимальную длину дуги  $L_{d \text{ макс}}$  в судовых сетях любого напряжения:

$$R_d = \frac{1050L_d}{I_d} = \frac{U_d}{I_d}. \quad (3)$$

При  $I_d = 0$ ,  $R_d = \infty$  и  $U_d = 1050L_d = U_p$ , откуда  $L_{d \text{ макс}} = \frac{U_p}{1050}$ . Например, при  $U_p = 525$  В  $L_{d \text{ макс}} = \frac{525}{1050} = 0,5$  м.

Расчетная максимальная длина электрической дуги в метрах равна расчетному напряжению судовой сети в киловольтах, деленному на 1,05.

При двухфазных аварийных КЗ в промышленных и СЭЭС расчетная максимальная длина дуги в метрах равна номинальному напряжению в киловольтах. В действительности, электрическая дуга погасает при меньшей ее длине, чем  $L_{д\max}$ , так как при увеличении длины и сопротивления дуги уменьшается ток аварийного КЗ.

Для определения зависимости аварийных токов КЗ от длины электрической дуги выполнены автоматизированные расчеты токов двухфазного КЗ при различной длине дуги (от 0 до  $L_{д\max}$ ) в судовой сети напряжением 0,5 кВ. При однократных расчетах сопротивление дуги вычисляется для каждого заданного значения ее длины при токе металлического КЗ, а затем определяется ток КЗ с учетом вычисленного сопротивления электрической дуги.

Зависимость токов КЗ от длины дуги в относительных единицах при автоматизированных расчетах без учета активного сопротивления судовой сети ( $R_1 = 0$ ) одинакова для СЭЭС любого напряжения. Обычно в расчетах токов КЗ на компьютере не учитываются активные сопротивления высоковольтных судовых сетей из-за их малой величины. Значительное уменьшение аварийных токов КЗ в зависимости от длины электрической дуги определяется наличием активного сопротивления судовой сети. Увеличение длины и сопротивления электрической дуги в процессе КЗ может привести к ее погасанию на судах.

В СЭЭС напряжением 0,38 кВ при расстоянии между токоведущими частями в месте КЗ, равном 0,15 м, электрическая дуга может погаснуть после ее возникновения при двухфазном КЗ через 0,24 – 0,4 с, а при однофазном — через 0,14 – 0,28 с. В действительности электрическая дуга погаснет при меньшей ее длине, чем  $L_{д\max}$ , что приведет к уменьшению расчетного времени горения дуги в СЭЭС. Установлено, что через небольшой промежуток времени после погасания электрическая дуга загорится вновь при минимальной ее длине. В СЭЭС возникнет процесс аварийного КЗ через прерывистую дугу.

На судах защиты при аварийных КЗ через перемежающуюся дугу отказывают в срабатывании, если время их отключения больше времени горения дуги до ее погасания, так как при погасании дуги или даже несколько раньше (при уменьшении тока КЗ) происходит возврат токовых реле и сброс набранной выдержки времени защиты. Это подтверждается также опытом эксплуатации мощных СЭЭС. Для повышения надежности работы защиты через перемежающуюся дугу разработана схема фиксации мгновенного измерения тока КЗ, приведенная в публикации [20]. О фиксации срабатывания реле сопротивления изложено также в публикациях [15], [16], [21].

Аварийные КЗ через перемежающуюся дугу наиболее вероятны в СЭЭС до 1000В, чем в высоковольтных электрических системах, так как с уменьшением номинального напряжения судовых автоматизированных электростанций уменьшаются абсолютное значение расчетной максимальной длины дуги и время ее горения до погасания.

Расчеты сопротивления дуги в месте КЗ следует выполнять по формуле (2) в судовых сетях любого напряжения, где возможно применение выражения (1). Такие расчеты можно выполнять также с использованием этого же выражения, но только в диапазоне изменения относительной длины дуги от 0 до  $0,5 L_{д\max}$  и при условии равенства нулю активного сопротивления судовой сети. По формуле (2) можно выполнять расчеты сопротивления дуги при трехфазных симметричных КЗ, когда сопротивления дуги в каждой фазе одинаковы.

Трехфазное симметричное КЗ может быть в момент возникновения электрической дуги при условном расположении токоведущих частей в месте КЗ по углам равностороннего треугольника. При этом длина дуги в каждой фазе  $L_{д\phi}$  в  $\sqrt{3}$  раза меньше расстояния между токоведущими частями. При этих условиях сохраняется соотношение токов трехфазного симметричного КЗ и двухфазного КЗ с дугой:

$$\frac{I_{11}^{(3)}}{I_{11}^{(2)}} = \frac{2}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где  $I_{11}^{(2)}$  — ток двухфазного КЗ с учетом дуги;  $I_{11}^{(3)}$  — ток трехфазного КЗ с учетом дуги.

Расчетные сопротивления и токи при трех-, двух- и однофазных КЗ обозначаются соответствующими индексами. Например,  $I_{11}^{(3)}, I_{11}^{(2)}, I_{11}^{(1)}$  — токи КЗ без учета дуги, при этом  $R_1^{(2)} = 2R_1^{(3)}, X_1^{(2)} = 2X_1^{(3)}$ .

На судах в эксплуатационных условиях возникшие трехфазные симметричные аварийные КЗ с дугой в СЭЭС могут перейти в несимметричные из-за различного изменения длины и сопротивления электрической дуги в фазах в процессе КЗ. Кроме того, открытые токоведущие части в судовых электрических установках до 1000 В расположены, как правило, в одной плоскости.

При трехфазном несимметричном КЗ с дугой фазные напряжения в месте КЗ разные по величине, происходит смещение нейтрали СЭЭС. Расчеты сопротивления дуги и токов КЗ при этом не могут быть выполнены по формуле (2) и выражению (1), так как расчетные фазные напряжения становятся неизвестными величинами.

С помощью компьютера выполнены расчеты сопротивлений электрической дуги, суммарных сопротивлений судовой сети и токов трехфазного несимметричного КЗ в СЭЭС напряжением 0,5 кВ при расположении шин  $A, B, C$  в месте аварийного КЗ с применением символического метода. Вычисления производились путем последовательных расчетов на компьютере (микрокалькуляторе) по программе расчетов произведения и частного отделения комплексных чисел. В автоматизированных расчетах принималась одинаковая длина электрической дуги между фазами  $A - B$  и  $C - B$ . Результаты выполненных расчетов при трехфазном аварийном КЗ с расположением шин  $A, B, C$  в месте КЗ ( $L_{дAB} = L_{дCB} = 0,35$  м) представлены на рис. 3.

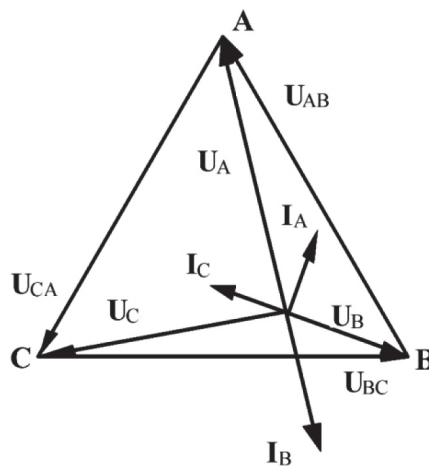


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений при трехфазном КЗ с дугой в сети 0,5 кВ (расположение шин  $A, B, C$  в месте КЗ ( $L_{дAB} = L_{дCB} = 0,35$  м))

Проведенные исследования с помощью компьютера показывают, что токи  $I_A^{(3)}$  и  $I_B^{(3)}$  при трехфазном несимметричном КЗ с дугой и ток  $I_{11}^{(3)} = I_{11}^{(2)} \frac{2}{\sqrt{3}}$  при условном трехфазном симметричном КЗ с дугой отличаются друг от друга не более чем на 5 – 10 %. Таким образом, для вычисления токов  $I_A^{(3)}$  и  $I_B^{(3)}$  трехфазного несимметричного КЗ с дугой при расположении токоведущих частей СЭЭС в месте КЗ  $A, B, C$  (в одной плоскости) и одинаковой длине электрической дуги между фазами  $A - B$  и  $C - B$  достаточно определить ток двухфазного КЗ  $I_{11}^{(2)}$  с дугой такой же длины, откуда

$$I_A^{(3)} \approx I_B^{(3)} \approx I_{11}^{(2)} \frac{2}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Следует отметить, что при разной длине дуги между фазами  $A - B$  и  $C - B$  эта зависимость не выполняется и поэтому не может быть использована. Установлено, что ток в фазе  $C$  при трехфазном несимметричном КЗ с дугой резко уменьшается с увеличением длины дуги, что может

привести к погашению дуги между фазами *C* и *B* при значительно меньшей ее длине, чем  $L_{д макс}$ . В результате этого трехфазное несимметричное КЗ с дугой перейдет в двухфазные КЗ с дугой между фазами *A* и *B* СЭЭС.

При трехфазном несимметричном КЗ с электрической дугой появляются токи обратной последовательности [22], что следует учитывать при выборе уставок защит СЭЭС. На основании расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в СЭЭС 0,38 кВ и 0,5 кВ выполнены автоматизированные расчеты уставок защит. На эксплуатируемых и модернизируемых судах изменены уставки максимальных токовых защит судовых электроустановок 0,22 кВ и 0,38 кВ, что обеспечило необходимую чувствительность при КЗ с электрической дугой на шинах резервируемых секций. На основании результатов выполненных автоматизированных расчетов на компьютере, а также практических рекомендаций, следует выполнить фиксацию мгновенного измерения тока КЗ в схемах токовых защит обратной последовательности, максимальных токовых защит 6 кВ и особенно в схемах токовых защит от замыканий на корпус судна 0,4 кВ мощных силовых трехфазных трансформаторов морского исполнения.

### Выводы

1. Серию расчетов токов КЗ в СЭЭС напряжением до 1000 В следует производить с учетом сопротивления электрической дуги в месте КЗ на судах.

2. Традиционная существующая методика однократных расчетов сопротивления электрической дуги по выражению (1) не всегда обеспечивает необходимую достаточную точность и достоверность результатов расчетов для судовых электроэнергетических систем.

3. В судовой электроэнергетике предложена новая формула, расчеты по которой позволяют получать однозначные и точные значения сопротивления электрической дуги, соответствующие выражению (1). Подтверждено, что формула может быть использована для расчетов сопротивления электрической дуги в СЭЭС любого напряжения, где возможно применение выражения (1).

4. Для автоматизации, повышения производительности, упрощения, облегчения и ускорения трудоемких расчетов по формуле разработан алгоритм, предложена и реализована программа расчетов сопротивления электрической дуги с одновременным вычислением других величин на компьютере (отечественном микрокалькуляторе).

5. Уточнена и скорректирована типовая методика расчетов токов КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в месте замыкания на судах речного и морского флота в СЭЭС до 1000 В. В СЭЭС, в соответствии с типовыми решениями, максимальная токовая защита и токовая защита от замыканий на корпус судна не обеспечивают необходимой чувствительности при КЗ с электрической дугой в конце шин резервируемых секций.

6. Предложенное аналитическое определение сопротивления электрической дуги, суммарных сопротивлений судовой сети и токов КЗ в СЭЭС по разработанной структурной схеме с реализацией на компьютере (микрокалькуляторе) соответствует наиболее оптимальному методу решения проблемы.

Научная новизна заключается в том, что разработанная методика определения КЗ с учетом сопротивления электрической дуги в СЭЭС может быть применена к судам различного назначения с целью оптимизации выбора уставок защит и повышения электропожаробезопасности. Кроме того, результаты выполненных исследований могут использоваться при создании электронных тренажеров, отрабатывающих выполнение задачи по выбору уставок защит электроэнергетических систем на судах морского и речного флота.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В. М. Ограничение аварийных токов в судовых электрических комплексах: науч. монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 425 с.



2. *Приходько В. М.* Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: ИПЦ СПбГУВК, 2005. — 348 с.

3. *Приходько В. М.* Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПбГУВК, 2013. — 244 с.

4. *Приходько В. М.* Вероятностное описание характеристик срабатывания защиты судовых электроэнергетических систем / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Речной транспорт (XXI век). — 2016. — № 1 (77). — С. 49–52.

5. *Приходько В. М.* Вероятностное описание режимов работы судовых электроэнергетических систем и токов коротких замыканий / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5 (76). — С. 59–61.

6. *Лучкин В. Ю.* Вероятностные характеристики режимов и токов коротких замыканий судовых электроэнергетических систем / В. Ю. Лучкин, И. В. Приходько, В. М. Приходько // Материалы VI Межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 226–231.

7. *Приходько В. М.* Устройство для ограничения тока короткого замыкания в электроэнергетической установке / В. М. Приходько, Д. В. Вилесов // Авторское свидетельство СССР на изобретение № 649097. — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1979. — № 7.

8. *Приходько В.* Защита судовых электросистем / В. Приходько // Речной транспорт. — 1983. — № 8. — С. 31–32.

9. *Приходько В. М.* Быстродействующее тиристорное защитное шунтирующее устройство для повышения пожаробезопасности судовых ЭЭС / В. М. Приходько // Повышение безопасности судовых электроэнергетических систем: сб. НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л.: Судостроение, 1981. — Вып. 339. — С. 25–28.

10. *Приходько В. М.* Автоматизация проектирования тиристорного токоограничителя шунтового типа для автономных электроэнергетических систем / В. М. Приходько // Автоматизация проектирования электротехнической части судна: сб. ВНТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л.: Судостроение. — 1988. — Вып. 461. — С. 45–53.

11. *Приходько В. М.* Оценка влияния тиристорного токоограничителя на ударные токи коротких замыканий в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Бобин // Материалы международной науч.-практ. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление», 1–2 октября 2009 года. — СПб.: ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2009. — С. 151–156.

12. *Мелкави Х.* Методы и средства комплексных испытаний электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Х. Мелкави. — СПб.: ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2012. — 23 с.

13. *Приходько В. М.* Коммутационно-защитные аппараты на базе полупроводниковых приборов / В. М. Приходько, П. А. Смирнов, М. В. Спиридонов // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвузовский сб. науч. тр. — СПб.: ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2008. — С. 102–108.

14. *Зятин В. М.* Расчеты токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в месте замыкания в сетях до 1000 В / В. М. Зятин, В. И. Поляхов // Электрические станции. — 1988. — № 12. — С. 65–73.

15. *Федосеев А. М.* Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 528 с.

16. *Чернобровов Н. В.* Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.

17. *Джамо А.* Метод управляемой сушки асинхронных электродвигателей по энергосберегающей технологии при судоремонте: автореф. дис. ...канд. техн. наук / А. Джамо. — СПб.: ИПЦ ФГОУ ВПО СПбГУВК, 2004. — 24 с.

18. *Приходько В. М.* Управление переходными процессами в аварийном режиме короткого замыкания дизель-генераторных судовых электроэнергетических систем / В. М. Приходько // Наука и техника на речном транспорте. — 2001. — № 8. — С. 11–18.

19. Мелкави Х. Ограничение аварийных токов в судовых электроэнергетических системах / Х. Мелкави, В. М. Приходько // *Материалы международной науч.-практ. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление».* 1 – 2 октября 2009 года. — СПб.: СПГУВК, 2010. — Книга III. — С. 137–145.

20. Курбатов П. А. Основы теории электрических аппаратов / П. А. Курбатов. — 2-е изд., перераб. — СПб.: Лань, 2015. — 592 с.

21. Барзам А. Б. Тип дистанционных защит / А. Б. Барзам // *Электрические станции.* — 2015. — № 2 (1003). — С. 27–30.

22. Юндин М. А. Токовая защита электроустановок / М. А. Юндин. — 2-е изд., испр.—СПб.: Лань, 2016. — 288 с.

## FEATURES OF PAYMENTS CURRENT SHORT CIRCUIT IN VIEW OF RESISTANCE ARC IN THE SHIP ELECTRIC POWER SYSTEM

*The article shows that the optimal design of modern automated marine power system to a significant extent, is determined by how accurately reflected the characteristics of the transients, accidental short circuits in the network and, in particular, when close to the ship generating units damage. Identified and confirmed that each of the multiphase circuit is in one way or another duality. In the Autonomous (ship, ship) power system typical characteristics of non-simultaneous (sequential) circuits are increased shock currents and delays the passage of current through zero. This article developed a method of short circuit calculations taking into account the resistance of the electric arc in marine power systems, which can improve their electrical and fire safety. Considered a significant influence on the magnitude of the short-circuit current in ship electric power systems the resistance of the electric arc in place of a short-circuit on the vessel, which increases with the ratio of the length of arc in meters to the ship's mains voltage in kilovolts, and also with the increase in the active resistance phase electrical network to the place of short circuit. Performed short circuit calculations taking into account the resistance of the electric arc for ship electric power systems with nominal voltages of 220; 380 and 500 Volts. In the ship power sector the proposed new formula, the calculations which allow us to obtain unambiguous and accurate values of the resistance of electric arc. It is confirmed that the formula can be used to calculate the resistance of the electric arc in marine power systems of any voltage.*

*Keywords: ship power system, electric arc short-circuit, short-circuit current, the resistance of the electric arc, intermittent arc, two-phase short circuit.*

## REFERENCES

1. Prihodko, V. M. *Ogranichenie avarijnyh tokov v sudovyh jelektricheskikh kompleksah: nauch. monog.* SPb.: SPGUVK, 2010.

2. Prihodko, V. M. *Metody i tehicheskie sredstva kompleksnyh ispytaniij elementov sudovyh jelektrojenergeticheskikh sistem v sudostroenii i sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: IPC SPGUVK, 2005.

3. Prihodko, V. M. *Intensifikacijakompleksnyhispytanijsudovogojelektrooborudovanijapojenergoberegajush hej tehnologij v sudostroenii I sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: SPGUVK, 2013.

4. Prihodko, V., I. Prihodko, and V. Luchkin. "Probabilistic description of activation parameters of ship's electropower systems' protection." *River transport (XXIst century)*1(77) (2016): 49–52.

5. Prihod'ko, V., I. Prihod'ko, and V. Luchkin. "Probabilistic description of operation modes of ship's electric power systems and short-circuits' currents." *River transport (XXIst century)*5(76) (2015): 59–61.

6. Luchkin, V. Ju., I. V. Prihodko, and V. M. Prihodko. "Veroyatnostnye harakteristiki rezhimov i tokov korotkih zamykanij sudovyh jelektrojenergeticheskikh system." *Materialy VI mezhvuzovskojnauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii i perspektivy razvitija vodnogo transporta Rossii», 14 maja 2015 goda.* SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015: 226–231.

7. Prihodko, V. M., and D. V. Vilesov. *Ustrojstvo dlja ogranichenija toka korotkogo zamykanija v jelektrojenergeticheskoy ustanovke.* USSR assignee. Patent 649097. *Otkrytija, izobrenenija, promyshlennyeobrazcy, tovarnyeznaki*, 1979. № 7.

8. Prihodko, V. "Zashhita sudovyh jelektrosistem." *Rechnoj transport* 8 (1983): 31–32.

9. Prihodko, V. M. “Bystrodejstvujushhee tiristorное zashhitnoe shuntirujushhee ustrojstvo dlja povyshenija pozharobezопасности sudovyh JeJeS.” *Povyshenie безопасности sudovyh jelektroenergeticheskikh sistem: sb. NTO im. akad. A.N. Krylova. L.: Sudostroenie, 1981. Is. 339. Pp. 25–28.*
10. Prihodko, V. M. “Avtomatizacija proektirovanija tiristorного tokoогranichitelja shuntovogo tipa dlja avtonomnyh jelektroenergeticheskikh sistem.” *Avtomatizacija proektirovanija jelektrotehnicheskoi chasti sudna: sb. VNTO im. akad. A.N. Krylova. L.: Sudostroenie, 1988. Is. 461. Pp. 45–53.*
11. Prihodko, V. M., and I. V. Bobin. “Ocenka vlijanija tiristorного tokoогranichitelja na udarnye toki korotkikh замыkanij v sudovyh jelektroenergeticheskikh sistemah.” *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, posvjashhennoj 200-letiju podgotovki kadrov dlja vodnogo transporta Rossii «Vodnye puti Rossii: stroitel’stvo, jekspluatacija, upravlenie», 1-2 oktjabrja 2009 goda. SPb.:FGOUVPOSPGUVK, 2009: 151–156.*
12. Melkai, H. *Metody i sredstva kompleksnyh ispytanij jelektrooborudovanija po jenergoberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: FGOUVPO SPGUVK, 2012.*
13. Prihodko, V. M., P. A. Smirnov, and M. V. Spiridonov. “Kommutacionno-zashhitnye apparaty na baze poluprovodnikovyx priborov.” *Mashiny i apparaty celljulozno-bumazhnogo proizvodstva: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. SPb.: GOUVPO SPbGTURP, 2008: 102–108.*
14. Zjatin, V. M., and V. I. Poljahov. “Raschety tokov korotkogo замыkanija s uchetom soprotivlenija jelektricheskoi dugi v meste замыkanija v setjah do 1000 V.” *Power Technology and Engineering 12 (1988): 65–73.*
15. Fedoseev, A. M., and M. A. Fedoseev. *Relejnaja zashhita jelektroenergeticheskikh sistem. M.: Jenergoatomizdat, 1992.*
16. Chernobrovov, N. V., and V. A. Semenov. *Relejnaja zashhita jenergeticheskikh sistem. M.: Jenergoatomizdat, 1998.*
17. Dzhamo, A. *Metod upravljaemoj sushki asinhronnyh jelektroprivodov po jenergoberegajushhej tehnologii pri sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: IPC FGOUVPO SPGUVK, 2004.*
18. Prihodko, V. M. “Upravlenie perehodnymi processami v avarijnom rezhime korotkogo замыkanija dizel-generatornyh sudovyh jelektroenergeticheskikh sistem.” *Nauka i tehnika na rechnom transporte 8 (2001): 11–18.*
19. Melkai, H., and V. M. Prihodko. “Ogranichenie avarijnyh tokov v sudovyh jelektroenergeticheskikh sistemah.” *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, posvjashhennoj 200-letiju podgotovki kadrov dlja vodnogo transporta Rossii «Vodnye puti Rossii: stroitel’stvo, jekspluatacija, upravlenie». 1-2 oktjabrja 2009 goda. SPb.: SPGUVK, 2010. Kniga III. Pp. 137–145.*
20. Kurbatov, P. A. *Osnovy teorii jelektricheskikh apparatov. 2-d ed. SPb.: Lan, 2015.*
21. Barzam, A. B. “Tip distancionnyh zashhit.” *Power Technology and Engineering 2(1003) (2015): 27–30.*
22. Jundin, M. A. *Tokovaja zashhita jelektroustanovok. 2-ded. SPb.:Lan, 2016.*

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Приходько Валентин Макарович* —  
 кандидат технических наук, профессор.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С.О. Макарова»  
*prihodki-3@yandex.ru, kaf\_seu@gumrf.ru*  
*Приходько Ирина Валентиновна* —  
 старший преподаватель.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С.О. Макарова»  
*prihodko-ira@yandex.ru*  
*Лучкин Василий Юрьевич* — аспирант.  
 Научный руководитель:  
*Приходько Валентин Макарович.*  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_seu@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Prihodko Valentin Makarovich* —  
 PhD, professor.  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
*prihodki-3@yandex.ru, kaf\_seu@gumrf.ru*  
*Prihodko Irina Valentinovna* —  
 Senior lecturer.  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
*prihodko-ira@yandex.ru*  
*Lucchino Vasily Yuryevich* — postgraduate.  
 Supervisor:  
*Prihodko Valentin Makarovich.*  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_seu@gumrf.ru*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ГАЗОВЫХ И ДВУХТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

*Предложен способ повышения точности распределения нагрузки параллельно работающим генераторным агрегатам автономной электроэнергетической системы, использующих в качестве первичных газовые или газодизельные двигатели, характеризующиеся нестабильностью оборотов в статических и особенно динамических режимах. Способ основан на контроле углового положения роторов генераторных агрегатов. Произведено аналитическое исследование по запасу устойчивости исследуемых систем при контроле углового положения роторов и без него. Предложена реализация описанного подхода, представлены результаты моделирования. Рассматривается актуальная задача разработки методов и средств исследования параллельной работы двух и более газодизель-генераторных агрегатов в составе автономной электроэнергетической системы буровой установки, где использование подобных устройств является перспективным и востребованным, но трудноосуществимым в связи с высокой зависимостью частоты тока, генерируемого подобными агрегатами от нагрузки и свойств топлива. Была разработана уточнённая модель газодизель-генератора, позволяющая исследовать процессы колебания его скорости и разрабатывать принципы эффективного управления ею. Это позволяет не только обеспечить работу газодизель-генераторных агрегатов в многогенераторных автономных электроэнергетических системах, но и, как следствие, осуществлять эффективное управление параметрами электроэнергии в автономной электроэнергетике, разрабатывать средства и методы обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии в многогенераторных электроэнергетических системах, использующих в качестве источников энергии газодизель-генераторные агрегаты.*

*Ключевые слова: автоматическое регулирование, эффективность стабилизации, моделирование процессов, буровые платформы, автономные электроэнергетические системы, запас устойчивости.*

### Введение

Внедрение газовых и газодизельных двигателей в качестве первичных двигателей генераторных агрегатов является одним из наиболее перспективных направлений развития многогенераторных автономных электроэнергетических систем целого ряда объектов транспорта и промышленности. В первую очередь это касается автономных буровых установок, где в качестве топлива подобного класса двигателей может использоваться попутный газ, что повышает эффективность, экономичность, и надёжность и снижает количество вредных выбросов в окружающую среду. Однако при построении автономных электростанций, использующих в качестве первичных двигателей синхронных генераторов газодизельные или газовые двигатели, возникают значительные проблемы в реализации режима параллельной работы нескольких генераторных агрегатов. Причиной тому является значительная нестабильность их оборотов при работе на газу, в особенности питания существенно нелинейной нагрузки, что характерно для электростанций буровых установок, работающих на мощную полупроводниковую нагрузку, соизмеримую по мощности с мощностью, генерируемой электроэнергетической системой буровой установки.

**Предлагаемое решение.** Решение указанной проблемы возможно за счёт использования датчиков положения коленчатого вала каждого из двигателей. Автором были проведены натурные испытания предлагаемой системы с использованием датчиков Холла. В основе предлагаемого способа лежит известное явление [1] – [5] возникновения колебаний углов поворота роторов генераторных агрегатов относительно синхронной скорости при относительных колебаниях роторов в противофазе. В результате вращающий механический момент первичного двигателя, как и электромагнитный момент синхронного генератора, представляется в виде двух составляющих: пропорциональной углу поворота ротора относительно синхронной скорости и пропорциональной отклонению угла.



Таким образом, стабилизацию процессов предлагается осуществлять посредством контроля не только разности оборотов двигателей, но и разности угловых положений коленчатых валов, а также скорости их относительного изменения. Описываемый способ контроля углового положения роторов синхронных генераторов при их параллельной работе обеспечивает точность при распределении генерируемой ими активной мощности, в том числе при резких сбросах / набросах нагрузки и при синхронизации работы вводимых агрегатов, вне зависимости от типа и мощности используемых генераторных агрегатов.

**Повышение точности распределения нагрузки путем контроля углового положения роторов.** Для идеальной системы регулирования рассматриваемого первичного двигателя, в которой отсутствуют инерционные звенья и чистое запаздывание, а регулирование осуществляется только по отклонению скорости, механический момент является чисто демпферным, пропорциональным производной угла. При наличии в системе запаздывания по времени и, следовательно, сдвига по фазе, появляется синхронизирующая составляющая и «механический момент» изменяет свой знак, т. е. проходит нулевое положение через половину периода колебаний. При этом демпферный момент становится раскачивающим, и система выходит на границу устойчивости [5], [7]. Таким образом, для исключения возможных автоколебаний и повышения устойчивости системы прежде всего необходимо найти способ увеличения запаса устойчивости как с учетом постоянного запаздывания  $z_3$ , так и угла сдвига по фазе  $\Psi_3$ .

Из публикаций известно [1], [2], что электромагнитная мощность генератора  $P$  при его работе параллельно с сетью (вторым генератором) является функцией ЭДС  $E_{Q1}$  и  $E_{Q2}$  обоих генераторов, частоты сети  $f_c$ , угла между роторами  $\delta_{12}$ , производной  $p\delta_{12}$  и сопротивления нагрузки  $Z_H$ :

$$P = f(f_c, E_{Q1}, E_{Q2}, \delta_{12}, p\delta_{12}, Z_H). \quad (1)$$

Для рассматриваемой задачи распределения активной мощности, считая нагрузку и возбуждение генераторов неизменными, линеаризуем уравнение (1):

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial f_c} \Delta f_c + \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P}{\partial (p\delta_{12})} \Delta (p\delta_{12}), \quad (2)$$

где первая составляющая учитывает изменение электромагнитной мощности, а вторая — изменение электромагнитной мощности в зависимости от угла рассогласования между роторами (эта мощность является синхронизирующей и обуславливается неравномерностью ее распределения между генераторами); третья составляющая учитывает синхронную мощность, создаваемую демпферными поперечными контурами параллельно работающим генераторам [1]. Поэтому в общем случае, в соответствии с действующими на вал моментами (механическим, электромагнитным и инерционным), могут быть выделены следующие пути решения задачи:

- повышение устойчивости за счет увеличения маховых масс (инерционного момента) — этой путь неприемлем из конструктивных соображений;
- дополнительное воздействие на электромагнитный момент генератора путем изменения параметров регулятора возбуждения — этот путь может ухудшить показатели качества электроэнергии;
- совершенствование автоматических устройств распределения нагрузки, которые ориентированы на управление первичными двигателями исходя из пропорций между активными составляющими токов генераторных агрегатов;
- дополнительное регулирование первичных двигателей (дизелей) по производной разности активных нагрузок работающих генераторов, эквивалентной производной угла рассогласования их роторов, а также по производной отклонения частоты вращения ГД [8] – [11].

Рассмотрим в качестве примера повышение устойчивости параллельной работы двух газодизель-генераторных агрегата. Основными показателями устойчивости параллельной работы являются:

- коэффициент затухания колебаний ротора

$$\alpha = \frac{M_d}{2T_j}; \quad (3)$$

– собственная частота колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{M_c / T_j};$$

– частота свободных колебаний

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2},$$

где  $M_d, M_c$  — соответственно удельные демпферные и синхронизирующие моменты, создаваемые на роторе системой регулирования частоты вращения;  $T_j$  — инерционная постоянная генераторного агрегата.

Расчет запасов устойчивости режимов агрегата основан на известном положении теории автоматического управления [1] и элементов программирования [4]: при свободных затухающих колебаниях выходного параметра  $\Delta y$  системы с передаточной функцией  $W(p)$ , в случае воздействия входного параметра  $\Delta x$ , выходной параметр можно представить в виде

$$\Delta y = \left\{ \operatorname{Re} [W(-\alpha + J\omega)] + \frac{\alpha}{\omega} y_m [W(-\alpha + J\omega)] \right\} \Delta x + y_m \left[ W(-\alpha + J\omega) \frac{1}{\omega} \frac{d(\Delta x)}{dt} \right].$$

Для механического момента дизеля при колебаниях ротора

$$\Delta M = M(p) \Delta \delta,$$

где  $M(p)$  — передаточная функция регулирования частоты вращения дизеля.

На основании разложения Тейлора получим

$$\Delta M = M_c \Delta \delta + M_{\text{мд}} \left[ \frac{d(\Delta \delta)}{dt} \right],$$

где  $M_c = \operatorname{Re} [M(-\alpha + J\omega)] + \frac{\alpha}{\omega} y_m [M(-\alpha + J\omega)]$ ;

$$M_d = y_m [M(-\alpha + J\omega)] \frac{1}{\omega}.$$

Следует отметить, что существенное влияние на устойчивость оказывают нелинейности и в частности, постоянное запаздывание, которое может быть учтено дополнительным звеном:

$$W_{\text{пз}}(p) = e^{-\varepsilon s}.$$

Колебательный коэффициент передачи звена определяется в виде

$$W_{\text{пз}}(-\alpha + J\omega) = e^{-\alpha \varepsilon} (\cos \omega \varepsilon - J \sin \omega \varepsilon),$$

а коэффициент самовыравнивания дизеля

$$K_c = - \left( \frac{\partial M_m}{\partial \omega_r} \right) \left( \frac{\omega}{M_{MN}} \right), \quad (4)$$

$M_{MN}$  — номинальное значение момента, может быть учтён дополнительным демпфирующим моментом  $M_{\text{мд}}^0 = K_c$ .

Для оценки максимально возможного контурного коэффициента усиления и обеспечения заданного запаса устойчивости были разработаны методики расчета запаса устойчивости режимов агрегатов с дополнительным регулированием по производной разности активных нагрузок и по производной скорости вращения их роторов.

Основные уравнения системы формируются на основе динамической модели газодизеля, а параметры выбираются по результатам оптимизации настройки ПИД-регулятора частоты вра-

щения и определяют передаточную функцию системы регулирования частоты вращения с учетом запаздывания:

$$W_{ПЗ}(P)M(P) = M(P) \cdot e^{-\epsilon p}$$

Коэффициент передачи системы получается из выражения (4) в соответствии с уравнениями (1) – (3) для условия границы устойчивости:  $\alpha = 0$ ;  $p = j\omega$ ;  $\omega = 2\pi f_c$  (здесь  $f_c$  — собственная частота автоколебаний агрегата).

По полученному количественному коэффициенту, в соответствии с формулами (2) и (3) выводятся выражения для расчета зависимостей значений составляющих удельных демпферного  $M_{МД}$  и синхронизирующего  $M_{МС}$  моментов, а также их суммарного значения в зависимости от величины постоянного запаздывания  $\epsilon$ , где  $M_{д} = M'_{д \max} \cos \omega \epsilon + M''_{д \max} \sin \omega \epsilon$ .

Электромагнитный демпферный и синхронизирующий моменты определяются через переходные параметры синхронного генератора ( $x'_d, E'_q$ ). По известному моменту инерции  $y_{дr}$  маховых масс агрегата определяется постоянная времени  $T_j$ . После этого находится коэффициент затухания ротора  $\alpha$ , собственная частота колебаний  $\omega_0$  и частота свободных колебаний  $\omega_c$ .

Для агрегата ГДГА-630, двигатель 6ГЧН25/34, расчетное значение частоты составило  $\omega_0 = 4$  Гц. Расчеты показателей устойчивости при параллельной работе агрегатов показали, что частота свободных взаимных колебаний незначительно отличается от частоты  $\omega_0$ . Это обусловлено тем, что при интенсивных внешних возмущениях, параметры которых исследованы в [1] – [3], доминирующее влияние на частоту колебаний агрегатов оказывает электромагнитный синхронизирующий момент.

**Результаты расчётов по запасу устойчивости и их анализ.** Результаты расчётов представлены в виде графиков зависимостей демпферного момента и его составляющих от величины запаздывания  $\epsilon$ , запаса устойчивости по фазе  $\Psi_3$  и запаздыванию  $\epsilon_3$  при классической системе стабилизации частоты вращения (рис. 1, а); с дополнительным регулированием по производной разности активных нагрузок (рис. 1, б) параллельно работающих генераторов; по производной отклонения частоты вращения дизеля от частоты сети (рис. 1, в), а также при количественном регулировании по обоим дополнительным параметрам (рис. 1, г).

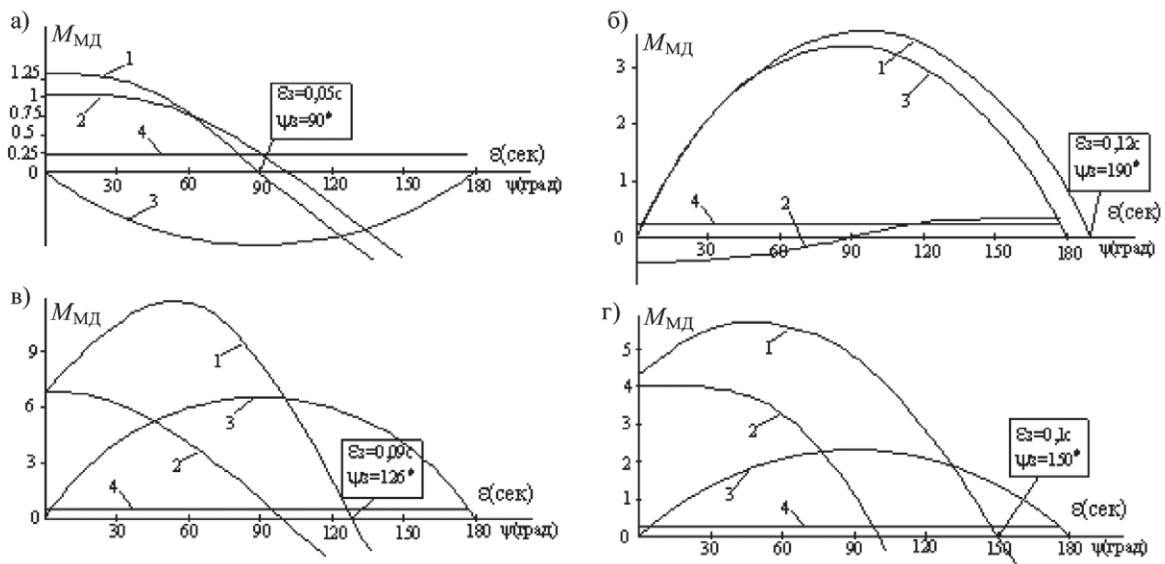


Рис. 1. Графики зависимостей демпферного момента:

а — зависимости демпферного момента и его составляющих от величины запаздывания  $\epsilon$ , запаса устойчивости по фазе  $\Psi_3$  и запаздыванию  $\epsilon_3$  при классической системе стабилизации частоты вращения;

б — с дополнительным регулированием по производной разности активных нагрузок параллельно работающих генераторов; в — по производной отклонения частоты вращения дизеля от частоты сети;

г — при количественном регулировании по обоим дополнительным параметрам;

на графиках а – г: 1 — суммарный демпферный момент  $M_{МД}$ ; 2 — удельный демпферный момент  $M'_{МД}$ ;

3 — удельный синхронизирующий момент  $M''_{МД}$ ;

4 — постоянная составляющая удельного демпферного момента  $M^0_{МД}$

Запасы устойчивости по  $\epsilon$  и  $\Psi$  определялись по моменту пересечения оси  $\epsilon$ ,  $\Psi$  с кривой суммарного удельного демпферного момента:

$$M_{\text{мд}} = M'_{\text{мд}} + M''_{\text{мд}} + M^0_{\text{мд}}$$

Анализ результатов выполненных расчетов позволил сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные дополнительные способы регулирования могут обеспечить увеличения запаса устойчивости по постоянному запаздыванию и фазе [11].
2. Наибольший запас устойчивости по фазе ( $190^\circ$ ) и постоянному запаздыванию (0,12 с) достигается при дополнительном регулировании по производной разности нагрузок агрегатов. При этом коэффициент затухания колебаний в переходном процессе также значительно возрастает.
3. Наибольшее демпфирование колебаний в устойчивой зоне работы обеспечивает дополнительное регулирование по производной отклонения скорости вращения, но запас устойчивости при этом несколько меньше, чем при регулировании по производной разности нагрузок.
4. Значительное увеличение запаса устойчивости и демпфирования колебаний в устойчивой зоне работы достигается при совместном регулировании по производным частоты вращения и разности нагрузок.

**Реализация предложенного способа.** Для реализации предложенного способа распределения активной мощности между параллельно работающими генераторами ГДГ1 и ГДГ2, предлагается структурная схема микропроцессорной системы распределения активной мощности, которая представлена на рис. 2. Принцип ее работы состоит в следующем. На маховиках обоих газодизель-генераторов: ГДГ1, ГДГ2 расположены по два индукционных датчика: Д1, Д2. Импульсный сигнал с выхода этих датчиков поступает на усилители ОУ1, ОУ2, нарастает до необходимого уровня и подается на микроконтроллер CPU. Таким образом, микроконтроллер имеет полную информацию о положении и частоте вращения роторов двух генераторов, а также информацию о величине моментов на валах обоих дизелей от датчиков моментов ДМ1 и ДМ2 или датчиков активной мощности, получаемой на выходе синхронных генераторов.

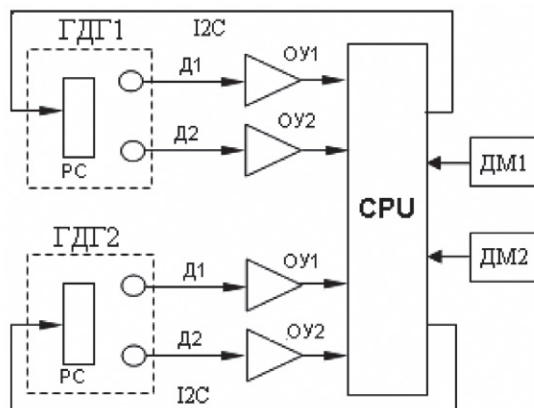


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой микропроцессорной системы распределения активной мощности

В случае значительной нелинейной нагрузки, характерной, например, при наличии соразмерных по мощности полупроводниковых преобразователей, выделение активной составляющей мощности в сети переменного тока становится проблематичным, поэтому получение информации о величине момента на валу может быть выполнено или с помощью датчиков момента, устанавливаемых на валах дизелей, или косвенным путем по избыточности давления турбонагнетателя первичного двигателя. Согласно этим данным, микроконтроллер рассчитывает угол рассогласования (фазовый сдвиг) между положениями роторов ГДГ1 и ГДГ2, пропорциональный отдаваемой активной мощности [1] – [18]. Затем микроконтроллер CPU выполняет операции умножения, интегрирования, дифференцирования с заданными коэффициентами и постоянными времени



ПИД-регулятора и формирует на выходе управляющий сигнал отрицательной обратной связи. С выхода CPU по шине I2C сигнал обратной связи поступает на вход регуляторов скорости вращения PC и те, в свою очередь, увеличивают или уменьшают подачу топлива таким образом, чтобы максимально точно поддерживать заданную частоту базового ГДГ1 и заданный угол отставания по фазе ГДГ2 относительно ГДГ1.

**Результаты моделирования.** Автором была разработана детальная модель параллельно работающих газодизель-генераторных агрегатов [3] – [6]. На рис. 3 изображена часть модели, состоящая из двух дизелей с ПИД-регуляторами (PID). Моделировалась система распределения активной мощности с использованием двухконтурной системы регулирования по отклонению угловых положений роторов и моментов на валах газодизелей.

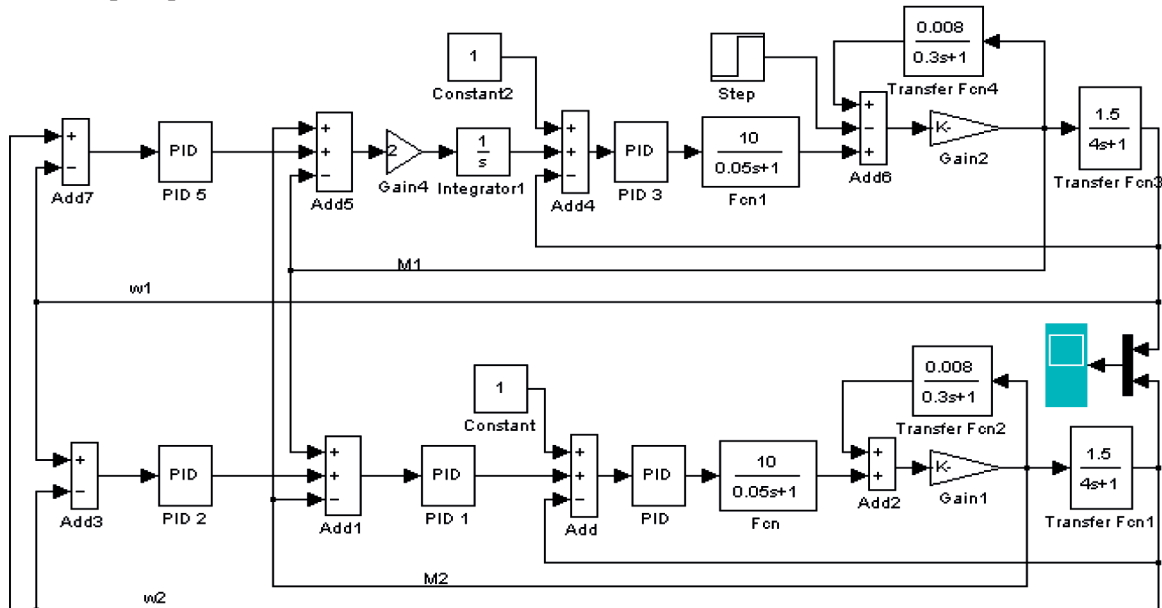


Рис. 3. Фрагмент детальной модели параллельной работы генераторных агрегатов с системой распределения активной мощности по отклонению угловых положений роторов и моментов на валах

Некоторые результаты моделирования процесса распределения активной мощности в автономной электроэнергетической системе с использованием предложенной системы управления представлены на рис. 4 [19] – [22]. Моделировалась реакция агрегатов на возмущающее воздействие со стороны нагрузки. На рис. 4, а приведены графики изменения скорости двигателей агрегатов при отсутствии обратных связей по моментам на валах агрегатов, а на рис. 4, б — графики изменения скорости двигателей агрегатов при контроле углового положения их роторов [22] – [24].

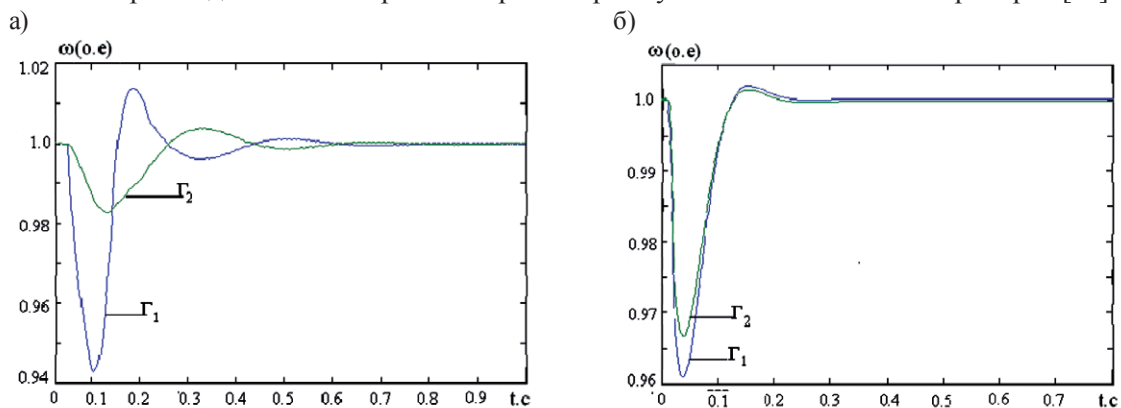


Рис. 4. Результаты моделирования управления частотой вращения газодизель-генераторных агрегатов при возмущении со стороны нагрузки: а — при отсутствии обратных связей по угловому положению роторов агрегатов; б — при контроле углового положения роторов

Моделирование показало, что контроль углового положения роторов агрегатов по предложенной схеме позволяет обеспечить распределение мощности как в статических, так и в динамических режимах во всём диапазоне нагрузок и снизить показатель колебательность в переходных процессах первичных двигателей.

### Выводы

1. Результаты аналитических исследований и компьютерное моделирование показали, что предложенный способ управления первичными двигателями генераторных агрегатов с контролем углового положения роторов и его реализация позволяют обеспечить повышение точности распределения нагрузки параллельно работающим газодизель-генераторным агрегатам.

2. Текущие исследования, проведенные авторами публикаций [3], [5], [6], показывают, что дополнительно улучшить качество регулирования можно за счёт контроля моментов на валах двигателей. Однако внедрение датчиков момента в мощных установках, где они не предусмотрены производителем (наиболее частый случай), является трудно выполнимой задачей. В связи с этим становится актуальной задача идентификации моментов на валах агрегатов по косвенным показателям (например, по электрическим параметрам со стороны синхронного генератора и по параметрам нагрузки турбоагрегата).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Онасенко В. С.* Судовая автоматика / В. С. Онасенко. — М.: Транспорт, 1988. — 271 с.
2. *Молотов В.Т.* Динамика комбинированной системы регулирования дизель-генератора / В. Т. Молотов, П. Я. Токин, П. И. Березовки // Двигателестроение. — 1982. — № 11. — С. 40–44.
3. *Жиленков А. А.* Исследование автоколебательных процессов в комбинированных автономных электроэнергетических системах / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Контроль. Диагностика. — 2016. — № 5. — С. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067.
4. *Сахаров В. В.* Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 201–211.
5. *Черный С. Г.* Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация процессов управления. — 2016. — № 1 (43). — С. 37–46.
6. *Веретенников Л. П.* Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы / Л. П. Веретенников. — Л.: Судостроение, 1975. — 376 с.
7. *Веретенников Л. П.* Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей / Л. П. Веретенников. — Л.: Ленинград, 1982. — 626 с.
8. *Болотин Б. И.* Исследование устойчивости параллельной работы дизель-генераторов ДГР 150/750 совместно с устройствами автоматики на математической модели / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Труды ЦНИДИ. — 1998. — № 56. — С. 245–258.
9. *Баранов А. П.* Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками / А. П. Баранов. — М.: Транспорт, 1981. — 246 с.
10. *Горелик Г. Б.* Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками / Г. Б. Горелик. — Хабаровск: ХГТУ, 2001. — 21 с.
11. *Крутов В. И.* Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. — М.: Наука, 2000. — 92 с.
12. Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2: Selected papers from the THIESEL 2002 Conference, Valencia, Spain, 11-13 September 2002 / J. H. Whitelaw, F. Payri, C. Arcoumanis, J. M. Desantes (Eds.). — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. — 501 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10502-3.
13. Dynamic Modelling of Gas Turbines: Identification, Simulation, Condition Monitoring and Optimal Control / G. G. Kulikov, H. A. Thompson (Eds.). — Springer-Verlag London, 2004. — 310 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3796-2.

14. Долгих И. Д. Принципы согласования параметров при синтезе микропроцессорных САР частоты вращения дизеля / И. Д. Долгих, П. П. Петров // Двигатели внутреннего сгорания. — 1982. — № 46. — С. 92–97.
15. Леонов И. В. Автоколебания двухимпульсной САР комбинированного двигателя / И. В. Леонов // Двигатели внутреннего сгорания. — 1984. — № 40. — С. 33–37.
16. Молотов В. Т. Влияние запаздывания в системе регулирования дизель-генератора на её устойчивости / В. Т. Молотов, Л. И. Березовский, А. П. Токин // Двигатели внутреннего сгорания. — 2004. — № 40. — С. 41–45.
17. Экспериментальные исследования неравномерности распределения топлива и воздуха по цилиндрам двигателя внутреннего сгорания // Двигатели внутреннего сгорания. — 1988. — № 48. — С. 41–45.
18. Скаженик А. М. Исследование влияния угла определения впрыскивания топлива на параметры работы тепловозного дизеля 10Д-100 / А. М. Скаженик, Ф. В. Гринсберг // Двигатели внутреннего сгорания. — 1984. — № 40. — С. 37–41.
19. Zhilenkov A. A. Horizon-relative positioning of water transport facility as a part of multicomponent system / A. A. Zhilenkov, S. G. Chernyi, A. S. Bordyug // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016. — Proceedings 2016. — Pp. 452–456.
20. Nyrkov A. The use of fuzzy neural structures to increase the reliability of drilling platforms / A. Nyrkov, S. Chernyi, A. Zhilenkov, S. Sokolov // Annals of DAAAM & Proceedings. — 2015. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 0672–0677. DOI: 10.2507/26th.daaam.proceedings.091.
21. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 100. — Pp. 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490.
22. Черный С. Г. Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.
23. Жиленков А. А. Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования / А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 90–97.
24. Черный С. Г. Анализ надежности энергетических систем морских буровых платформ в акватории черного моря / С. Г. Черный // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 2. — С. 106–110.

## ERGONOMIC USE SYSTEMS IN GAS AND DUAL FUEL ENGINES FOR LOAD BALANCING

*A way to improve the accuracy of load balancing of parallel gensets autonomous power system, using as a primary gas or gas-diesel engines, which are characterized by instability in the speed of static and especially dynamic modes. The method is based on controlling the angular position of the rotor generator units. Produced the analytical study on sustainability stock of the systems studied in the control of angular position rotor without it. It consider the urgent task of developing methods and means of research of the parallel operation of two or more diesel-generating units as part of an autonomous electricity rig systems where the use of such units is promising and popular, but difficult to implement due to the high dependence of the frequency of the current generated by such units of the load and fuel properties. the refined model of diesel-generator has been developed, allowing to explore the fluctuations in its speed processes, and to develop principles of good governance it. This allows do not only provide work diesel-generator sets in generators autonomous power systems, but also, as a consequence, to effectively manage power settings in the stand-alone power generation, to develop tools and methods to ensure the necessary quality of electricity in generators electric power systems, using as energy Gas diesel-generator sets.*

*Keywords: automatic control, the effectiveness of stabilization, process modeling, drilling platforms, autonomous power systems, stability margin.*

### REFERENCES

1. Onasenko, V. S. *Sudovaja avtomatika*. M.: Transport, 1988.
2. Molotov, V. T., P. Ja. Tokin, and P. I. Berezovki. “Dinamika kombinirovannoj sistemy regulirovanija dizel-generatora.” *Dvigatellestroenie* 11 (1982): 40–44.

3. Zhilenkov, A. A., and S. G. Chernyi. "The Investigation of the self-sustained oscillations in a Combined Autonomous Electric Energy Systems." *Kontrol'. Diagnostika* 5 (2016): 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067.
4. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Sergey Valerevich Saburov. "Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 201–211.
5. Chernyi, Sergei Grigorievich, and Anton Aleksandrovich Zhilenkov. "Processes control modeling in complex systems in case of indeterminate perturbation actions." *Automation of Control Processes* 1(43) (2016): 37–46.
6. Veretennikov, L. P. *Issledovanie processov v sudovyh jelektroenergeticheskikh sistemah. Teorija i metody*. L.: Sudostroenie, 1975.
7. Veretennikov, L. P. *Perehodnye processy v jelektroenergeticheskikh sistemah korablej*. L.: Leningrad, 1982.
8. Bolotin, B. I., and V. L. Vajner. "Issledovanie ustojchivosti parallelnoj raboty dizel-generatorov DGR 150/750 sovместно s ustrojstvami avtomatiki na matematicheskoj modeli." *Trudy CNIDI* 56 (1998): 245–258.
9. Baranov, A. P. *Avtomaticheskoe upravlenie sudovymi jelektroenergeticheskimi ustanovkami*. M.: Transport, 1981.
10. Gorelik, G. B. *Avtomatizirovannye sistemy upravlenija sudovymi jenergeticheskimi ustanovkami*. Habarovsk: Izd-vo, 2001.
11. Krutov, V. I. *Razvitie avtomaticheskogo regulirovanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. M.: Nauka, 2000.
12. Whitelaw, James H., F. Payri, C. Arcoumanis, and J. M. Desantes, eds. *Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2: Selected papers from the THIESEL 2002 Conference, Valencia, Spain, 11-13 September 2002*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. DOI: 10.1007/978-3-662-10502-3
13. Kulikov, Gennady G., and Haydn A. Thompson, eds. *Dynamic modelling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control*. Springer-Verlag London, 2004. DOI: 10.1007/978-1-4471-3796-2.
14. Dolgih, I. D. "Principy soglasovanija parametrov pri sinteze mikroprocessornyh SAR chastoty vrashhenija dizelja." *Internal Combustion Engines* 46 (1982): 92–97.
15. Leonov, I. V. "Avtokolebanija dvuhimpulsnoj SAR kombinirovannogo dvigatelja." *Internal Combustion Engines* 40 (1984): 33–37.
16. Molotov, V. T., L. I. Berezovskij, and A. P. Tokin. "Vlijanie zapazdyvanija v sisteme regulirovanija dizel-generatora na ejo ustojchivosti." *Internal Combustion Engines* 40 (2004): 41–45.
17. "Jeksperimentalnye issledovanija neravnomernosti raspredelenija topliva i vozduha po cilindram dvigately vnutrennego sgoranija." *Internal Combustion Engines* 48 (1988): 41–45.
18. Skazhenik, A. M., and F. V. Grinsberg. "Issledovanie vlijanija ugla opredelenija vpryskivanija topliva na parametry raboty teplovoznogo dizelja 10D-100." *Internal Combustion Engines* 40 (1984): 37–41.
19. Zhilenkov, A. A., S. G. Chernyi, and A. S. Bordyug. "Horizon-relative positioning of water transport facility as a part of multicomponent system." *23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016*. Proceedings 2016: 452–456.
20. Nyrkov, A., S. Chernyi, A. Zhilenkov, and S. Sokolov. "The use of fuzzy neural structures to increase the reliability of drilling platforms." *Annals of DAAAM & Proceedings* 26.1 (2015): 0672–0677. DOI: 10.2507/26th.daaam.proceedings.091.
21. Zhilenkov, A., and S. Chernyi. "Investigation performance of marine equipment with specialized information technology." *Procedia Engineering* 100 (2015): 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490
22. Chernyj, S. G., and A. A. Zhilenkov. "Intellectual decision support at the optimum system for ships electrical power systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(25) (2014): 68–75.
23. Zhilenkov, A. A., A. A. Zheleznjak, and S. G. Chernyj. "Prospective ways to improve the efficiency of diagnosis reliability parameters of operation of offshore drilling equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 90–97.
24. Chernyi, S. G. "Analysis of the energy reliability component for offshore drilling platforms within the Black Sea." *Oil Industry* 2 (2016): 106–110.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

*Титов Иван Леонидович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Черный Сергей Григорьевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
Керченский государственный морской  
технологический университет  
*vanya-titov-1993@mail.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*Titov Ivan Leonidovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Chernyj Sergej Grigorevich* —  
PhD, associate professor.  
Kerch State Maritime Technological  
University  
*vanya-titov-1993@mail.ru*

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2016 г.*

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-206-214  
УДК 620.395.01

**В. В. Сахаров,  
А. А. Чертков,  
С. В. Сабуров**

## ПРЕДИКТИВНОЕ АПЕРИОДИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Рассматривается аperiodическое управление устойчивыми и неустойчивыми динамическими объектами на водном транспорте на основе дискретных математических моделей, представленных уравнениями в пространстве состояний, и его использование для решения задач прогноза. Способы и алгоритмы аperiodического управления позволяют для класса наблюдаемых и управляемых объектов получить численные решения двухточечных граничных задач с обеспечением минимальной энергии на управление. В отличие от изложенного ранее метода экономии энергии на основе аperiodического управления, предлагается в вычислительный алгоритм встроить процедуру оптимизации, реализуемую средствами квадратичного программирования, содержащимися, например, в инструментарии MATLAB, что позволяет ввести ограничения на вектор переменных состояния и управления и, следовательно, использовать аperiodическое управление для построения прогнозирующих моделей. Для повышения эффективности расчетов в вычислительном алгоритме аperiodического управления применена матрица академика А. Н. Крылова. Прогнозирующие модели на базе аperiodического управления могут служить мощным теоретически обоснованным средством принятия оптимальных решений, полученных путем проведения многовариантного машинного эксперимента при изменении внешних условий и параметров объекта. Предлагаемые прогнозирующие модели на основе аperiodического управления можно использовать в качестве дополнения к решениям, реализуемым с помощью класса прогнозирующих моделей численной оптимизации — Model Predictive Control (MPC), требующих больших объемов пошаговых вычислений в режиме реального времени. Приведены примеры аperiodического управления динамическими объектами на водном транспорте с применением квадратичного программирования.*

*Ключевые слова:* объект, дискретная модель, аperiodическое управление, матрица, управляемость, наблюдаемость, математическое программирование, ограничения, экономия энергии.

### Введение

Методы аperiodического управления устойчивыми и неустойчивыми динамическими объектами, реализуемые на основе дискретных математических моделей, широко используются для решения задач прогноза с обеспечением минимальной энергии на управление [1], [2]. Аperiodическими системами управления называют дискретные динамические системы, обеспечивающие перевод объектов, находящихся в заданном начальном состоянии, в конечное состояние в течение определенного времени. Принцип действия аperiodических систем основан на известном в автоматике теоретическом положении, согласно которому управляемую и наблюдаемую дискретную линейную систему с размерностью матрицы состояния ( $n \times n$ ) можно перевести из любого начального в конечное состояние не менее, чем за  $n$  шагов, при отсутствии ограничений. Если рабочее время системы составит  $N_p$  шагов, причем  $N_p > n$ , то такой переход может быть осуществлен при обеспечении минимума энергии на управление.

При отсутствии помех для объектов с одним входом вектор управления однозначно определяется векторами начального и конечного состояний, матрицей состояния дискретной системы и матрицей Крылова. Оценка элементов вектора управления производится на основе псевдоинверсии Мура–Пенроуза, что обеспечивает движение объекта по оптимальной траектории [1], [2].

Применение компьютерных вычислительных сред для аperiodического управления динамическими объектами и технологическими процессами на водном транспорте позволяет кардинально изменить способы синтеза аperiodических систем различного назначения.

Высокое быстродействие и производительность вычислительных систем дают возможность для класса дискретных динамических объектов путем вариации интервалов дискретности и их числа решать важный комплекс задач:

- идентифицировать объекты по экспериментальным характеристикам;
- оценивать внешние воздействия и компенсировать их влияние на поведение управляемых объектов;
- оптимизировать технологические процессы при управлении по нескольким каналам с различными критериями качества.

Широкому практическому применению аperiodических систем с предиктивным управлением, как известно из [3] – [6], способствует возможность выполнения их структурных преобразований и различных модификаций, направленных на повышение эффективности и качества производственных и технологических процессов.

В отличие от известных методов экономии энергии на основе аperiodического управления, предлагается в вычислительный алгоритм встроить процедуру оптимизации, реализуемую средствами квадратичного программирования, содержащимися, например, в инструментарии MATLAB, что позволяет использовать аperiodическое управление для построения прогнозирующих моделей. Для повышения эффективности расчетов в вычислительном алгоритме аperiodического управления применена матрица академика А. Н. Крылова.

### Основная часть

Аperiodическое управление динамическими объектами рассмотрим применительно к математической модели в пространстве состояний инвариантной во времени системы [2]:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \quad (1)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t), \quad (2)$$

где  $A$  —  $(n \times n)$ -матрица;  $B$  —  $(n \times q)$ -матрица;  $C$  —  $(r \times q)$ -матрица и  $D$  —  $(r \times q)$ -вектор постоянных коэффициентов;  $x(t)$  —  $(n \times 1)$ -мерный вектор состояния;  $u(t)$  и  $y(t)$  — соответственно векторы управления и выхода соответствующей размерности. Если  $r < n$ , то измеряются не все переменные состояния.

Для системы управления с одним входом  $q = 1$  уравнения (1) и (2) упрощаются, и процедура поиска оптимальных решений может быть реализована с помощью инструментария функций математического программирования. Переход к базовой дискретной модели выполним с помощью соотношений, основанных на матричном экспоненциале:

$$A_d = e^{AT};$$

$$B_d = \int_0^T e^{A(T-\tau)} B d\tau,$$

где  $T$  — шаг дискретности.

В результате получим:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k); \quad (3)$$

$$y(k) = C_d \cdot x(k) + D_d \cdot u(k), \quad (4)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$  — номер такта, определяющий дискретный момент времени  $t = k \cdot T$ .

Если принять  $C_d = I$  и  $D_d = 0$ , то  $y(k) = x(k)$  и программное предиктивное управление для данного класса объектов, обеспечивающее минимум энергии, как известно из [3] – [6], существенно

упрощается. В этом случае без изменения структуры базовой модели, по мере необходимости, можно в реальном масштабе времени выполнять пошаговые оценки параметров модели средствами идентификации, применять динамические наблюдатели для восстановления вектора состояния по вектору выхода, осуществлять фильтрацию зашумленных сигналов, оценивать внешние возмущения и др.

Время прогноза  $T_p$ , определяющее горизонт предсказания, при управлении динамическим объектом всегда ограничено. Пусть окно горизонта предсказания, осуществляемого по уравнению (3), состоит из  $N_p = T_p/T$  тактов. Окно горизонта управления содержит  $N_c$  тактов, что соответствует времени  $T_c = T \cdot N_c$ . Очевидно, что  $N_c < N_p$ . Движение дискретного объекта на тактах  $k + 1, k + 2, \dots, k + N_p$  определяется вектором управления

$$U = [u(k) \ u(k + 1) \ u(k + 2) \ \dots \ u(k + N_c - 1)]^T, \quad (5)$$

а если горизонты управления и прогноза совпадают, то управление

$$U = [u(k) \ u(k + 1) \ u(k + 2) \ \dots \ u(k + N_p - 1)]^T. \quad (6)$$

Задача апериодического управления при  $N_c = N_p$  состоит в получении вектора  $U$ , обеспечивающего перевод объекта из состояния  $x(k)$  в состояние  $x(N_p)$  за время, определяемое числом тактов  $N_p$ , при минимизации критерия качества:

$$J = \frac{1}{2} U^T R U, \quad (7)$$

с учетом ограничения (3). Вектор  $U$  является программным управлением для прогнозирующей модели. Он формирует кусочно-постоянные сигналы с изменяющейся амплитудой в начале каждого шага. Применение алгоритма апериодического управления для прогноза состоит в решении двухточечной граничной задачи в условиях ограничений на заданном временном интервале, определенном горизонтом предсказания. Алгоритм синтеза основан на использовании дискретного матричного уравнения

$$x(N_p) = A_d^{N_p} \cdot x(k) + Kr \cdot U, \quad (8)$$

где  $x(N_p)$  — вектор состояния в момент  $N_p$  (на правой границе — конечное состояние);  $x(k)$  — вектор состояния на левой границе, принятый за начальное состояние в предиктивном окне;  $Kr$  — матрица Крылова;  $U$  — вектор управления (6).

Матрица Крылова полного ранга размерности  $(n \times N_p)$  имеет вид

$$Kr = [A_d^{N_p-1} \ A_d^{N_p-2} \ \dots \ A_d^1 \ A_d^0] \cdot * B_d. \quad (9)$$

Знак (\*) означает поэлементное умножение, применяемое в вычислительных средах. Заметим, что, согласно уравнению (8),  $x(N_p)$  зависит от  $x(k)$  на левой границе предиктивного окна и элементов вектора управления в моменты  $[k, k + 1, \dots, k + N_c]$ . Если целевым назначением управления объектом является приведение его в состояние  $x(N_p)$  за  $N_p$  тактов, т. е. конечное состояние известно, то такой переход может быть выполнен различными способами, отвечающими выбранным критериям оценки. Апериодическое управление, обеспечивающее минимум (7), следует оценивать с помощью соотношения

$$U = Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)], \quad (10)$$

где  $Kr^+$  — операция псевдоинверсии Мура–Пенроуза.

Из соотношения (10) видно, что если  $N_p = n$  и  $N_c = N_p$ , то перевод объекта из начального состояния в конечное выполняется в течение минимального времени. Квадратная матрица Крылова, соответствующая этому режиму, имеет полный ранг и должна инвертироваться. Если же  $N_p > n$ , то переход осуществляется за  $N_p$  шагов при минимальном значении (7), поскольку

$$J_{\min} = \frac{1}{2} [Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)]]^T \cdot R \cdot [Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)]],$$



где  $R$  — диагональная (положительно определенная) матрица весовых коэффициентов, приписываемых каждому элементу вектора управления на горизонте предсказания. Из приведенных соотношений следует, что  $U$  не зависит от  $R$ , а соотношения (7) и (10) позволяют сформулировать задачу управления в терминах квадратичного программирования, используя для решения инструментарий Optimization Toolbox среды MATLAB. При этом минимизация соотношения (7) должна выполняться для заданных рабочих интервалов  $N_c$  и  $N_p$  при соблюдении ограничения-равенства

$$Kr \cdot U = [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)] \quad (11)$$

на всех режимах, с учетом изменений вектора управления в допустимых пределах

$$LB < U < UB,$$

где  $LB$  и  $UB$  — соответственно нижняя и верхняя границы вектора управления.

Поскольку на каждом шаге может выполняться решение (3), эта информация применима для получения функциональных ограничений-неравенств на векторы выхода и состояния.

Рассмотрим применение аperiodического управления для решения задачи прогноза на конкретных примерах. Предположим, что объект управления описывается дифференциальными уравнениями (1) и (2), где  $A = -0.2231$ ,  $B = 0.1116$ ;  $C = 1$ ;  $D = 0$ . Выберем шаг дискретности  $T = 1.0$ , для которого дискретный вариант модели будет содержать численные значения коэффициентов  $A_m = 0.8$ ;  $B_m = 0.1$ ;  $C_m = 1$ ;  $D_m = 1$ . Теперь сформируем обобщенную дискретную прогнозирующую модель объекта, принятую в теории предиктивных систем класса MPC [2], по следующему правилу:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k), \quad (12)$$

где  $A_d = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m \cdot A_m & 1 \end{bmatrix}$  и  $B_d = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m \cdot B_m \end{bmatrix}$ .

Для определенности  $C_d$  примем равной единичной матрице. Если вектор  $D_d = [0 \ 0]^T$ , то, согласно уравнению (4), получим  $y(k) = x(k)$ . Ниже приведен фрагмент скрипт-файла, составленного в кодах MATLAB, по которому выполнены расчеты для различных окон предсказания  $N_p$  и управления  $N_c$ . Фрагмент скрипт-файла представлен двумя блоками. В первом блоке содержится матрица Крылова и операторы оценки вектора управления  $U$  для «жесткого» перевода объекта в заданное конечное состояние. Во втором блоке представлены операторы квадратичного программирования, используемые для решения задачи прогноза при различных окнах управления  $N_c$ , изменяющихся внутри фиксированного окна  $N_p$ . Перевод объекта в состояние  $x(N_p)$  обеспечивается с помощью ограничения-равенства  $A_{eq} \cdot U = b_{eq}$ .

% Аperiodическое управление на горизонте предсказания:

Kr=gallery('krylov',Ad,Bd,Np-1); Krl=flip1r(R)

W=inv(Krl\*Krl')\*Krl; u=W'\*[xNp-Ad^Np\*xO]

% Квадратичное программирование:

H=eye(Np-1);

A=Q;b=D;Hl;

Aeq=Krl; beq=Krl \*u;

lb=[ones(Nc,1)\*(-Inf);ones(Np-1-Nc, 1)\*0];

ub=[ones(Nc,1)\*Inf;ones(Np-1-Nc,1)\*0];

[uAp,J 1 ]=quadprog(2\*H,f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

На рис. 1 представлен процесс перехода объекта в конечное состояние  $x(N_p) = [0 \ 1.0]^T$  при векторе начальных условий  $x(k) = [0.1 \ 0.2]^T$ . Окна горизонта предсказания и управления  $N_p = N_c = 10$ . Масштаб переменной состояния  $X(1)$  принят равным трем. Критерий качества  $J_{\min}(10) = 0.4460$ .

Траектории объекта при тех же граничных условиях, но различных окнах предсказания и управления, приведены на рис. 2. Видно, что  $N_c = 4$  и  $N_p = 10$ . Значение критерия качества  $J_{\min}(4) = 6.4857$ . Объект переводится в заданное конечное состояние на правой границе окна предсказания.

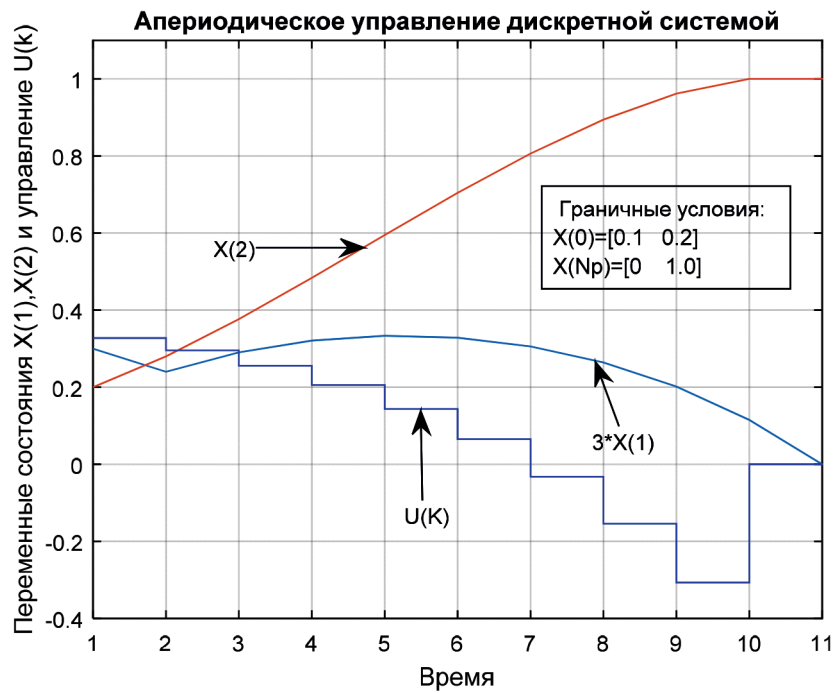


Рис. 1. Управление объектом при  $N_p = 10$  и  $N_c = 10$

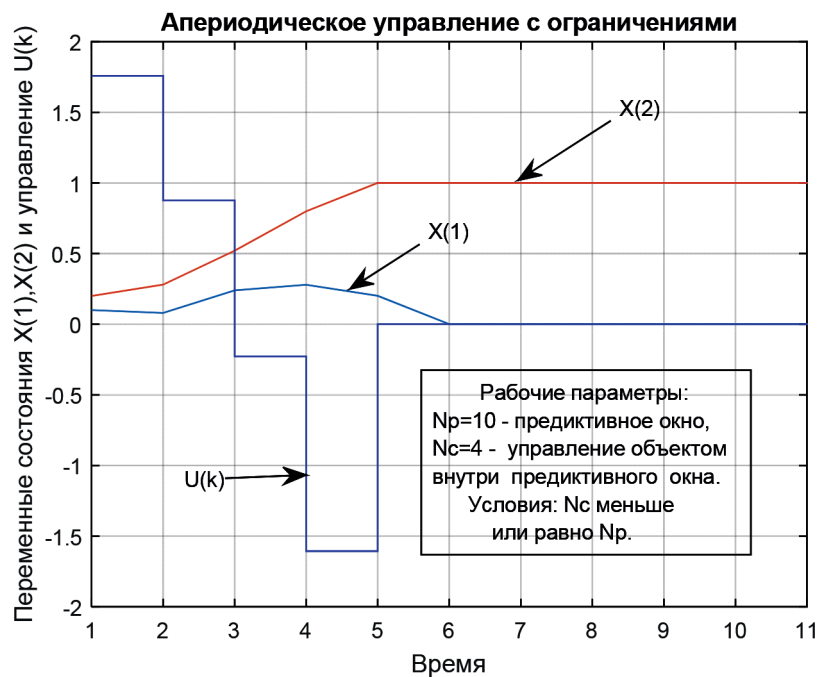


Рис. 2. Управление объектом при  $N_p = 10$  и  $N_c = 4$

Прогнозирование с применением аperiodического управления неустойчивым дискретным объектом рассмотрим на примере модели макроэкономики, приведенной в работах [7], [8]. Дискретная модель описывается следующим матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} x1(k+1) \\ x2(k+1) \\ x3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,852 & -0,158 & 0,156 \\ -0,328 & -0,499 & 0,403 \\ 0,527 & 0,356 & 0,557 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x1(k) \\ x2(k) \\ x3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,125 \\ 0,425 \\ 0,301 \end{bmatrix} \cdot u(k) \quad (13)$$

с векторами граничных условий в предиктивном окне:

$$\begin{bmatrix} x1(0) \\ x2(0) \\ x3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 460.1 \\ 113.1 \\ 718.4 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x1(Np) \\ x2(Np) \\ x3(Np) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 500.0000 \\ 117.0000 \\ 771.20008 \end{bmatrix}.$$

Здесь используются следующие обозначения:  $x1(k) = c(k)$  — потребление;  $x2(k) = y(k)$  — суммарные государственные закупки;  $x3(k) = l(k)$  — валовой национальный продукт;  $u(k) = 1(k)$  — инвестиции.

Собственные значения приведенной выше матрицы состояния:

$$\lambda_1 = -0.6835; \lambda_2 = 1.0240; \lambda_3 = 0.5696,$$

что свидетельствует о неустойчивости объекта. Выберем окно прогноза  $N_p = 12$  и рассмотрим предиктивное управление для двух окон управления:  $N_c = 12$  и  $N_c = 9$ . Для вектора управления введем следующие ограничения: инвестиции  $I(k)$  не должны быть отрицательными и в то же время на каждом шаге прогноза максимальное их значение не должно превышать 800 единиц.

### Обсуждение основных результатов

На рис. 3 приведены результаты моделирования дискретного объекта (13) с расчетом элементов вектора управления на каждом шаге в окне прогноза. Для подтверждения корректности вычислений приводится фрагмент матрицы, содержащей переменные состояния на первых трех шагах:

	$x(1)$	$x(2)$	$x(3)$	$u = 1$
1	460.1000	113.1000	718.4000	386.3865
2	486.2058	82.1655	682.8851	375.0256
3	459.4970	238.9409	782.1507	366.8620
...	...	...	...	...
11	443.8355	211.1054	875.0402	119.3817
12	466.3767	152.4587	832.3861	24.9338
13	500.0000	117.0000	771.2000	0

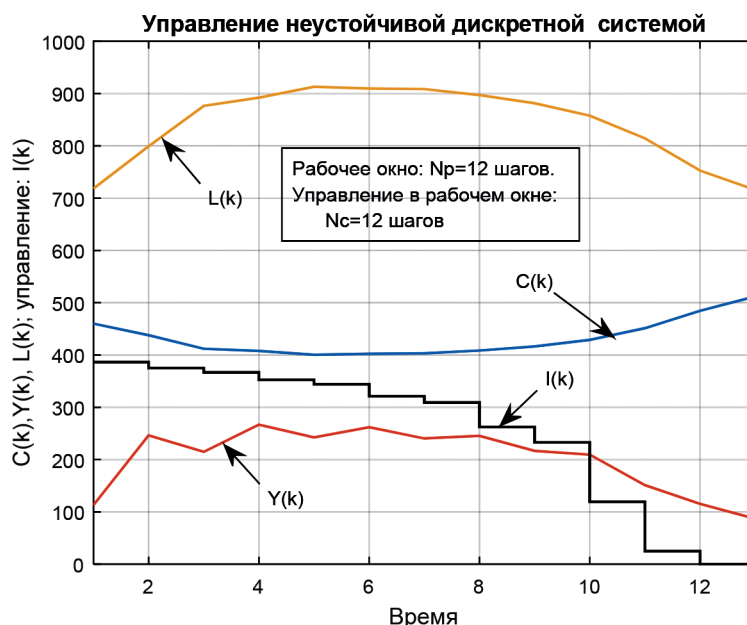


Рис. 3. Аperiodическое управление объектом в окне прогноза с рабочими параметрами  $N_p = 12$  и  $N_c = 12$

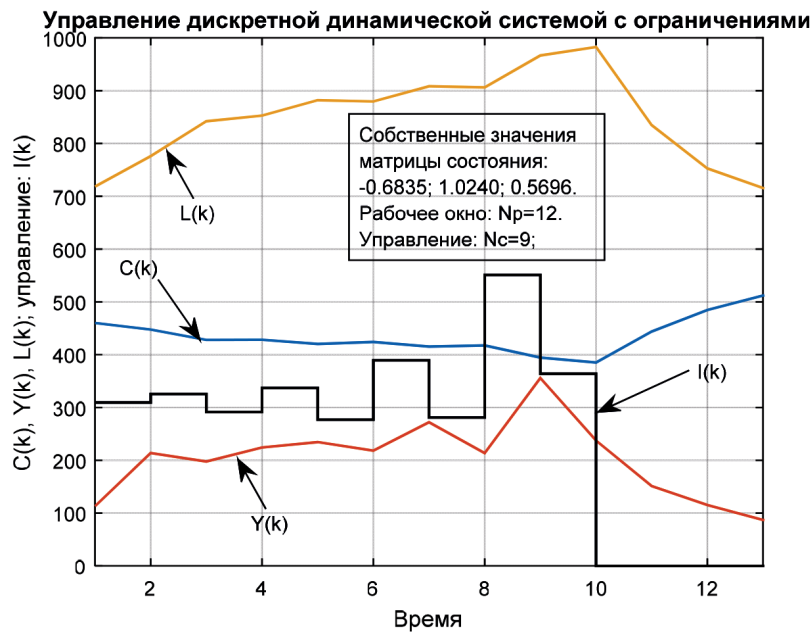


Рис. 4. Аперриодическое управление экономическим объектом с окном прогноза  $N_p = 12$  и окном управления  $N_c = 9$

На рис. 4 указаны текущие значения переменных состояния и управления объектом (13) при тех же граничных условиях, полученные для рабочих параметров окна прогноза:  $N_p = 12$  и  $N_c = 9$ .

### Выводы

1. Модели предиктивного аперриодического управления для рассматриваемого класса объектов водного транспорта могут служить инструментом для создания механизма принятия решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности реализуемых технологических процессов и производств [5], [6].

2. Модельные количественные оценки и прогнозирование поведения дискретных динамических объектов при вариации параметров, ограничений, анализе и моделировании широкого спектра внешних воздействий позволяют на качественно новом уровне совершенствовать процессы организации и управления практически на всех предприятиях водного транспорта.

3. Компьютерный эксперимент с применением модельного прогнозирования должен стать рабочим инструментом менеджеров при выборе оптимальных решений в логистике, экономике и эксплуатации водного транспорта с использованием институтов рынка для развития производства [9] – [13].

4. Специфика производственных моделей в экономике, их склонность к потере устойчивости, высокая чувствительность к вариации параметров и внешним воздействиям определяют количественные оценки и выбор решений, базирующихся на предиктивных моделях, что подтверждается рассмотренным примером аперриодического управления макроэкономической системой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В. В. Применение матрицы Крылова для аперриодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 83а–87.
2. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.

3. Wang L. Model predictive control system design and implementation using MATLAB / L. Wang. — Springer-Verlag London Limited, 2009. — 403 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-331-0.
4. Qin S. J. A survey of industrial model predictive control technology / S. J. Qin, T. A. Badgwell // Control Engineering Practice. — 2003. — Vol. 11. — Is. 7. — Pp. 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
5. Rodriguez J. Predictive current control of a voltage source inverter / J. Rodr'iguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, U. Ammann // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2007. — Vol. 54. — Is. 1. — Pp. 495–503. DOI: 10.1109/TIE.2006.888802.
6. Miranda H. Predictive torque control of induction machines based on state-space models / H. Miranda, P. Cortés, J. I. Yuz, J. Rodriguez // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2009. — Vol. 56. — Is. 6. — Pp. 1916–1924. DOI: 10.1109/TIE.2009.2014904.
7. Воронцовский А. В. Моделирование экономического роста с учетом неопределенности макроэкономических факторов: исторический обзор, проблемы и перспективы развития / А. В. Воронцовский, А. И. Дмитриев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5. Экономика. — 2014. — № 2. — С. 5–31.
8. Воронцовский А. В. Прогнозирование макроэкономических показателей в режиме имитации на основе стохастических моделей экономического роста для малой открытой экономики / А. В. Воронцовский, А. Ю. Дикарев // Финансы и бизнес. — 2013. — № 2. — С. 33–51.
9. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений / А. А. Грешилов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 584 с.
10. Козлов В. Н. Системный анализ и принятие решений / В. Н. Козлов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. — 223 с.
11. Сорина Г. В. Принятие решений как интеллектуальная деятельность: монография / Г. В. Сорина. — М.: «Канон +», «Реабилитация», 2009. — 272 с.
12. Ларичев О. И. Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев. — М.: Наука, 2006. — 181 с.
13. Niederle M. Market culture: How norms governing exploding offers affect market performance / M. Niederle, A. E. Roth // American Economic Journal: Microeconomics. — 2009. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 199–219. DOI: 10.1257/mic.1.2.199.

## PREDICTIVE APERIODIC CONTROL OF DYNAMIC OBJECTS ON WATER TRANSPORT USING MATHEMATICAL PROGRAMMING

*Considered aperiodic control of stable and unstable dynamic objects on water transport based on discrete mathematical models, represented by equations in state space, and its implementation for predictive control. Methods and algorithms for aperiodic control allow for a class of observed and managed objects to obtain the numerical solution of two-point boundary value problems with minimum energy control. In contrast to the previously described method of saving energy on the basis of aperiodic control [ ], the proposed computational algorithm is to embed the optimization procedure by means of quadratic programming, i.e., in the Toolbox of Mat LAB, that allows to impose restrictions on the vector of state variables and control and, therefore, the use of aperiodic control to build prediction models. To improve the efficiency of calculations in the computational algorithm of deadbeat control applied to matrix A. N. Krylov. A prediction model based on the aperiodic control can be a powerful theoretically sound tool for making optimal solutions obtained by multivariate machine experiment under changing external conditions and parameters of the object. The proposed predictive model based on the aperiodic control can be used as a supplement to the decisions performed using a class of predictive models of numerical optimization - Model Predictive Control (MPC), wherein large volumes of step-by-step calculations in real time regime. Examples of aperiodic control of dynamic objects on water transport with the use of quadratic programming are considered.*

*Key words: object, discrete model, aperiodic control, matrix, controllability, observability, mathematical programming, constraints, energy saving.*

### REFERENCES

1. Saharov, V. V., and V. I. Korolev. “Krylov matrix application to dynamic plants aperiodic control.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikatsij* 1 (2011): 83a–87.



2. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. Spb.: GUMRF imeni adm. S.O. Makarova, 2015.
3. Wang, Liuping. *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*. Springer-Verlag London Limited, 2009. DOI: 10.1007/978-1-84882-331-0.
4. Qin, S. J., and T. A. Badgwell. "A Survey of Model Predictive Control Technology." *Control Engineering Practice* 11.7 (2003): 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
5. Rodriguez, J., J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, and U. Ammann. "Predictive current control of a voltage source inverter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54.1 (2007): 495–503. DOI: 10.1109/TIE.2006.888802.
6. Miranda, H., P. Cortes, J. I. Yuz, and J. Rodriguez. "Predictive torque control of induction machines based on state-space models." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.6 (2009): 1916–1924. DOI: 10.1109/TIE.2009.2014904.
7. Vorontsovskiy, Aleksey V., and Anton L. Dmitriev. "Economic growth modeling under uncertainty of macroeconomic factors: history review, problems and prospects." *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 5. Economics* 2 (2014): 5–31.
8. Voroncovskij, A. V., and A. Ju. Dikarev. "Prognozirovanie makroekonomicheskikh pokazatelej v rezhime imitacii na osnove stohasticheskikh modelej ekonomicheskogo rosta." *Finansy i biznes* 2 (2013): 33–51.
9. Greshilov, A. A. *Matematicheskie metody prinjatija reshenij*. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2006.
10. Kozlov, V. N. *Sistemnyj analiz i prinjatie reshenij*. SPb.: SPbGPU, 2008.
11. Sorina, G. V. *Prinjatie reshenij kak intellektualnaja dejatel'nost: monografija*. M.: «Kanon +», «Reabilitacija», 2009.
12. Larichev, O. I. *Verbalnyj analiz reshenij*. M.: Nauka, 2006.
13. Niederle, M., and A. E. Roth. "Market culture: How norms governing exploding offers affect market performance" *American Economic Journal: Microeconomics* 1.2 (2009): 199–219. DOI: 10.1257/mic.1.2.199.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Сахаров Владимир Васильевич* — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
\_saharov\_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru  
*Чертков Александр Александрович* — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
chertkov51@mail.ru  
*Сабуров Сергей Валерьевич* — аспирант. Научный руководитель:  
*Сахаров Владимир Васильевич*. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
kaf\_osnivr@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Saharov Vladimir Vasilevich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
\_saharov\_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru  
*Chertkov Alexandr Alexandrovich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
chertkov51@mail.ru  
*Saburov Sergey Valerevich* — postgraduate. Supervisor:  
*Saharov Vladimir Vasilevich*. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
kaf\_osnivr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 августа 2016 г.

## ИМИТАЦИОННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СУДАХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ

*В статье предложено рассмотрение вопросов надежности и качества судового электромеханического оборудования в части реализации задач функциональной диагностики и прогнозирования рисков их ухудшения на базе статистической концепции теории надежности. Реализация этого подхода позволит принимать более эффективные упреждающие управленческие решения по сравнению с традиционной практикой реагировать на уже случившиеся отказы техники. При этом непрерывная статистическая обработка основных параметров технологических процессов должна осуществляться непосредственно на борту судов и обеспечивать накопление данных всей предыстории текущих событий для анализа опасных тенденций их изменений (эволюции). Это положение соответствует требованиям Российского морского регистра судоходства к системе мониторинга механических установок на судах. Для достижения этой цели существует достаточно полный набор первичных датчиков, средства преобразования измерений в цифровой формат и соответствующие вычислительные ресурсы для их обработки. На судах уже эксплуатируются бортовые информационно-коммуникационные системы передачи текущих данных вахтенным операторам, смежным системам автоматизированного управления в системы регистрации аварийных ситуаций («черный ящик») и другим судовым потребителям информации. Однако необходимо дополнительно обеспечить экипажи судов результатами статистической обработки текущих параметров технологических процессов с учетом анализа всех предыдущих приборно-измеряемых данных. В статье обсуждаются способы хранения этих данных на судах в «статистически упакованном» виде и машинные методы их обработки с использованием ЭВМ. Объективный приборный контроль и автоматическое прогнозирование опасных тенденций ухудшения технического состояния судового оборудования обеспечит руководство судовладельческих компаний и командование экипажей возможность своевременного планирования текущих задач эксплуатации, включая использование судов по прямому назначению и проведение ремонтно-восстановительных работ по фактическому состоянию техники. Кроме того, повысится безопасность мореплавания, снизятся сроки и стоимость технического обслуживания судов. Указанное направление исследований особенно важно для судов Арктического района плавания, для которых характерны повышенные требования к живучести судов и безопасности мореплавания, функционирование техники в условиях суровой природной среды и значительной удаленности от средств берегового обеспечения.*

*Ключевые слова: суда, оборудование, параметры, имитационное моделирование, статистический анализ, надежность, диагностика, прогноз.*

### Вводная часть

В настоящее время актуальной научно-методической проблемой в области управления жизненным циклом перспективной морской техники является переход от концепции «реагировать и выправлять» к более эффективной концепции — «прогнозировать и упреждать». Исследование надежности и качества морской техники методами статистического анализа измеряемых технологических параметров направлено на решение этой проблемы.

Классические подходы к определению показателей надежности техники в виде, например, оценки вероятности безотказной работы связаны с анализом группы экземпляров оборудования одинакового назначения, функционирующих в течение некоторого интервала времени с регистрацией случайной величины времени до их отказа. В настоящее время статистическая концепция процессов, лежащая в основе теории надежности техники, встречает трудности экспериментальной проверки для сложной и наукоёмкой продукции судостроения, изготавливаемой сравнительно небольшим числом уникальных образцов техники, в то время как срок жизни их составляет десятки лет. Для практического подтверждения высоких требований к надежности морской техники слишком мала серийность (массовость) производства техники и слишком велик реальный интервал времени для наблюдений и измерений. Следствием этих обстоятельств является недо-

статочная статистическая выборка неблагоприятных событий отказов морской техники для проведения доверительного статистического обобщения ее показателей надежности в режиме реального времени.

Дорогостоящие натурные стенды и ускоренные испытания практически никогда не могут создать условия эксплуатации, адекватные реальным, а статистическая выборка таких экспериментов малоубедительна для полных и точных оценок характеристик надежности (безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности). Однако экономическая потребность общества и морская практика позволили сформулировать задачу управления надежностью и качеством морской техники с целью снижения стоимости и сроков ее создания, сервисного обслуживания, а также своевременного обновления изделий в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке продукции судостроения. В зарубежных научно-технических публикациях [1] – [4] это направление исследований связано с разработкой информационно-коммуникационной технологии управления жизненным циклом *PLM (Product Lifecycle Management)*.

В настоящее время бурное развитие вычислительной техники, средств измерений и обработки данных (в том числе применяемых непосредственно на судах) обеспечили возможность контроля и прогнозирования эксплуатационных качеств морской техники непосредственно на борту судна в реальных условиях плавания без увеличения трудоемкости ее обслуживания. Подтверждением этого положения служат натурные испытания опытного образца бортовой автоматизированной информационно-измерительной системы, разработанной ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в ОКР «Мониторинг-Супер» и установленной на научно-экспедиционном судне «Академик Трёшников». Эффективность этой системы проверена в реальных условиях плавания в рамках 58-й Российской Антарктической экспедиции 2012 – 2013 гг. Вычислительная техника позволяет решать этот класс задач на базе статистических модельных исследований с целью оптимального управления сложными объектами морской техники в течение всего жизненного цикла (ЖЦ) эксплуатации судов. Для исследователей рассматриваемой области научных задач существует множество специализированных программных пакетов. Результаты статистического моделирования процессов позволяют оценивать риски (технические, экономические и экологические) при эксплуатации морской техники в реальных условиях и решать задачу обеспечения приемлемого значения рисков на основе более адекватных знаний.

Известно, что существует два принципиально различных подхода к определению показателей надежности – это *методы прямого и косвенного измерений* [5]. Прямым измерением показателя надежности является определение случайного числа отказавших однотипных объектов в зависимости от времени их работы до отказа, что оправдано для простых и малофункциональных устройств. Отличительной особенностью методов прямого измерения показателей надежности является то, что численная оценка вероятности сохранения или потери работоспособности агрегатов и устройств не зависит от их физической природы.

При косвенном измерении показателей надежности технического объекта используют оценку вероятности события сохранения или потери значений некоторых его технологических параметров в пределах допустимых значений в зависимости от времени функционирования этого объекта. Косвенные измерения используются для решения задач с помощью систем функциональной диагностики. Тогда условием потери надежности будет событие увеличения / уменьшения измеряемых технологических (диагностических) параметров выше / ниже некоторых предельно допустимых значений. Показатели надежности, полученные косвенным измерением, дают оценку вероятности более массовых и разнообразных по физической природе неблагоприятных событий или полной потери объектом работоспособности (например, потери прочности из-за старения или износа материалов). При этом имеется возможность различать характеристики надежности даже разных экземпляров однотипного оборудования, формируя технический паспорт всей истории их жизненного цикла. Данная возможность имеет преимущество по сравнению с традиционным усреднением их временных показателей надежности по множеству однотипных образцов техники. Поэтому специалисты возлагают большие надежды на повышение

эффективности системы управления технической готовностью морской техники и судов, снижение сроков и стоимости их сервисного обслуживания на базе развития средств безразборной параметрической диагностики морской техники и соответствующих методов статистической обработки полученных данных.

### Основная часть

Рассмотрим основные допущения и гипотезы в известных методических подходах по исследованию надежности и качества морской техники, которые сдерживают решение задач, сформулированных ранее. Известно, что область исследований, связанных с технической диагностикой, предполагает рассмотрение трех типов задач [5]: задачи *диагностирования* — определения технического состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени; задачи *эволюции* (или *предыстории*) его технического состояния в прошлом до настоящего момента времени; задачи *прогнозирования* (на основе результатов решения первой и второй задач) — предсказания технического состояния, в котором окажется объект в некоторый будущий момент времени.

Статистическое описание параметров технологических процессов для целей контроля технического состояния и диагностики судового оборудования наиболее полно изложено в [6]. Задачу прогнозирования сводят к определению вероятности невыхода /выхода прогнозируемого процесса за установленные границы, когда известны функции распределения случайной величины диагностического показателя  $\xi(t)$  в моменты времени  $t_i (i = 1, 2, 3, \dots, n; t_i \in T_1)$ . Однако на практике законы распределения вероятностей случайной величины диагностических показателей  $\xi(t)$ , как правило, неизвестны до их измерений и соответствующей статистической обработки эмпирических данных. Для сложной наукоемкой морской техники решение этой научно-практической задачи остается в настоящее время актуальной и коммерчески целесообразной.

При вероятностном прогнозировании используются методы экстраполяции на основе уравнений регрессии для определения величины прогнозируемой переменной в виде математического ожидания  $m_{\xi}(t)$  в моменты времени  $t_j (j = n + 1, n + 2, \dots, n + m; t_j \in T_2)$ . При этом вряд ли следует согласиться с авторами [6, с. 136], что «... на практике значения диагностических параметров наиболее часто распределены по нормальному закону». И далее [6, с. 136], «... если закон распределения нормальный, то вероятностное прогнозирование может быть сведено к прогнозированию изменения математического ожидания». Данное допущение — лишь гипотеза, которая должна быть подтверждена непосредственным статистическим анализом случайных технологических и диагностических процессов по результатам эксплуатации судовой техники. Кроме того, оно никак не совпадает с реальной практикой повышения надежности судовых машин и механизмов, которая представляет безотказность оборудования с учетом его восстановления как нестационарный случайный процесс, включающий последовательные периоды «старения» и восстановления («омоложения») техники.

Математическая статистика [5] разделяет случайные процессы на *стационарные* и *нестационарные типы*. Случайный процесс называется стационарным, если все статистические и смешанные моменты инвариантны (независимы) во времени. В то же время нестационарный случайный процесс отличается наличием тренда линейного или более сложной формы. Основными статистическими характеристиками, имеющими большое значение для описания отдельных реализаций стационарных случайных процессов, являются следующие параметры: среднее выборочное значение и дисперсия, плотность вероятности распределения значений случайной величины, ковариационная функция, функция спектральной плотности мощности стационарной реализации. На коротких интервалах времени, когда выборка временного ряда случайной величины незначительна и тренд не может быть выявлен, процесс может считаться локально стационарным.

В целом реальные физические процессы, протекающие в сложных судовых системах в течение всего срока службы судна, всегда имеют медленные нестационарные изменения вслед-



ствие нестабильности внешних условий эксплуатации судов и внутренних условий нагружения оборудования, воздействия агрессивных рабочих сред, вибрации, старения материалов и т. п. Этот вид нестационарных процессов характеризуется тем, что случайный процесс ведет себя почти как стационарный на интервале времени, не слишком сильно превосходящем время корреляции. Однако в настоящее время при решении практических задач теории надежности действует основное допущение в виде гипотезы постоянной интенсивности отказов оборудования. Это допущение позволяет применить математический аппарат марковских случайных процессов. К сожалению, привлекательность указанной гипотезы связана с преимуществами численного решения только простых инженерных задач. Но, по существу, при таких допущениях игнорируется возможность учета накопления «ущерба» в системе из-за процессов «старения» материалов, ухудшения электрической прочности изоляции, износа кинематических сопряжений в механизмах и тому подобных явлений, существенных для нашей задачи описания нестационарных случайных процессов в характеристиках надежности и потери качества судовой техники.

В то же время система мониторинга технического состояния судового оборудования (в соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства, ч. VII. Механические установки, п. 11.3.6) должна предусматривать решение следующих задач: фиксирование измеренных значений диагностических параметров, анализ тенденций их изменений, прогноз технического состояния объекта контроля. Прогноз состояния выполняется на базе предыстории изменения диагностических параметров с достаточным числом их измерений. Это требование еще не выполняется в полном объеме [7], хоть и сделаны значительные шаги в области разработки и внедрения средств диагностики в морскую практику. До настоящего времени не разработаны эффективные методы статистического анализа технического состояния судового оборудования, эволюции его во времени и прогнозирования опасных тенденций его ухудшения.

Статистический анализ сложного оборудования в целях прогнозирования его технического состояния в значительной степени сдерживается трудностью описания реальных физических явлений, характеризующихся как нестационарные случайные процессы. Во многих случаях в классе нестационарных случайных процессов, соответствующих реальным физическим явлениям, можно выделить особые категории нестационарности, что упрощает задачу их измерения и анализа. Например, некоторые явления случайного характера могут быть описаны *нестационарным* случайным процессом  $\{y(t)\}$ , каждая выборочная функция которого имеет вид  $y(t) = A(t)x(t)$ . Здесь  $x(t)$  — выборочная функция *стационарного* случайного процесса  $\{x(t)\}$ ;  $A(t)$  — детерминированный множитель. Иными словами, такой процесс относится к нестационарным случайным процессам, выборочные функции которых обладают детерминированным трендом. Если нестационарный процесс соответствует конкретной модели такого типа, что потребует статистического подтверждения допустимости подобных гипотез, то для его описания нет необходимости производить осреднение по всему ансамблю. При этом достаточно производить осреднение по каждой выборке на равных интервалах времени (например, через каждые 100 ч выработанного технического ресурса агрегата) и определять линейную скорость изменения детерминированного множителя или их некоторой совокупности.

Таким образом, более общий случай по сравнению с положениями, изложенными ранее, представляет подход статистического описания нестационарного случайного процесса. На рис. 1 представлена иллюстрация нестационарного методического подхода к решению такой задачи на примере возможного изменения температуры газового тракта судового дизеля. Здесь область допустимых значений технологического параметра распределена в интервале от минимального до максимального значения. Кроме того, выделена область контролируемых отклонений текущих значений параметра при срабатывании аварийно-предупредительной сигнализации, аварийной защиты и повреждения оборудования в случае возникновения некоторых предельных (критических) перегрузок по контролируемому параметру.



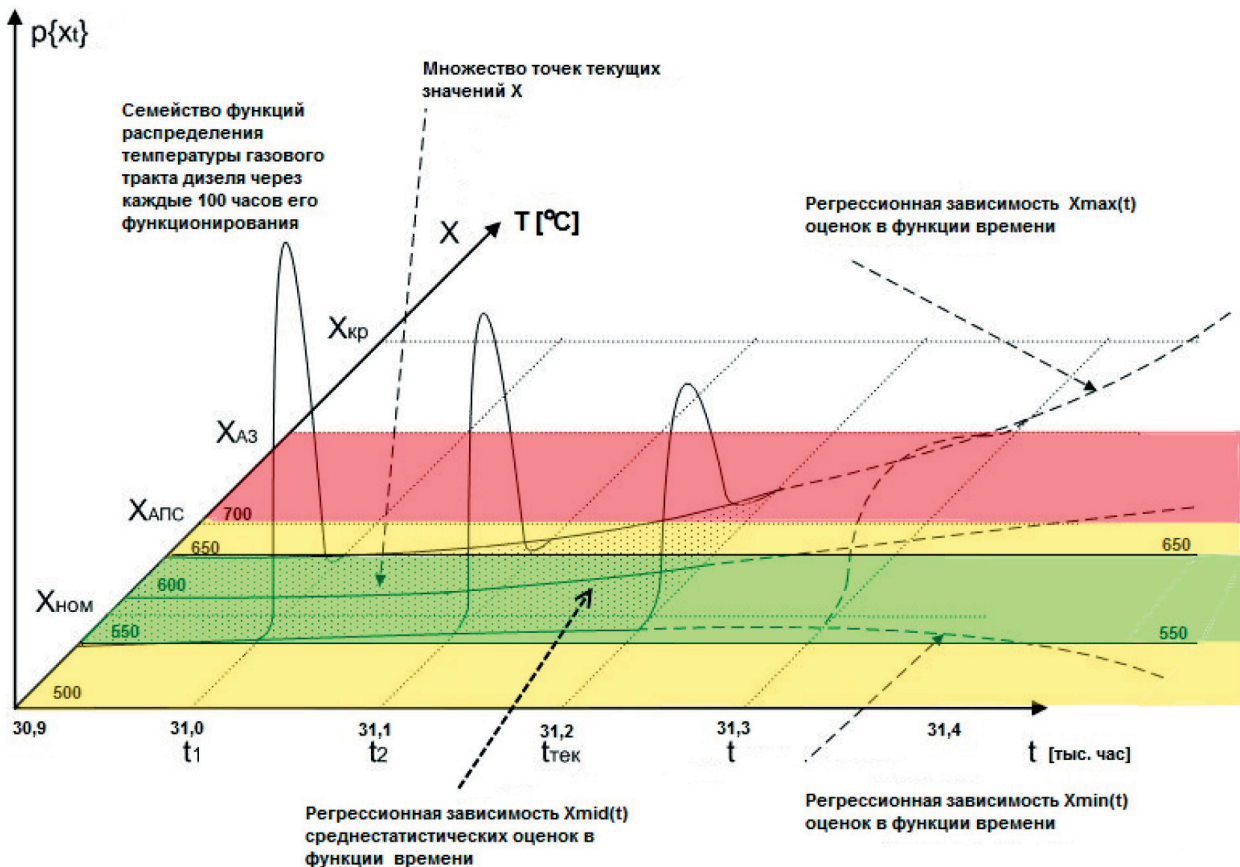


Рис. 1. Пример статистического описания процессов изменения характеристики  $X$  в дискретных интервалах времени через каждые 100 ч с учетом вычислений вероятностей их попадания в область нормальных и недопустимых значений

Будем различать нежелательные изменения текущих параметров технологических процессов и соответствующие изменения общего состояния оборудования по ожидаемому объему и трудоемкости последующих ремонтно-восстановительных работ. Здесь формальным признаком степени опасности повреждения оборудования являются следующие события, имеющие случайное время их наступления:

- срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации, которое потребует проведения работ (без разборки, без разрегулировки и расцентровки механизма), минимальной трудоемкости или только изменения режима его эксплуатации;
- срабатывание аварийной защиты, которое потребует проведения восстановительных работ с частичной разборкой и заменой второстепенных частей или деталей;
- превышение предельного или критического значения параметра, полученного экспериментальным или расчетным путем, которое потребует замены одной или нескольких основных частей с большим объемом ремонтно-восстановительных работ.

В процессе длительного эксплуатационного этапа жизненного цикла морской техники изменяется и математическое ожидание, и дисперсия случайной величины контролируемого технологического параметра агрегата или судовой конструкции. Кроме того, существует возможность регрессионного описания изменения во времени не только математического ожидания и среднеквадратического отклонения, но и максимального и минимального значений этой случайной величины с учетом допустимой погрешности для регистрации их установившихся значений. Каждая из указанных работ может быть описана интенсивностью восстановления, которые вместе с интенсивностью износа будут влиять на коэффициент готовности оборудования. Тогда статисти-

ческий анализ будем понимать как процедуры вычисления интервальных значений ожидаемых моментов времени, когда оборудование переходит из нормального состояния в указанные ранее нежелательные состояния.

Преобразование численных (точечных) значений эмпирических функций распределения по данным измерений (средних и среднеквадратических отклонений параметра  $X$ ) на границах каждого временного шага в кусочно-линейные зависимости простой регрессии может осуществляться методом наименьших квадратов. Это позволит получить аналитические зависимости выборочных средних, максимальных и минимальных значений температуры  $T$  [°C] в функции времени  $t$  (см. соответствующие кривые на плоскости  $T$  [°C],  $t$  (рис. 1)). Здесь зеленым цветом выделена область нормальных значений, желтым — область допустимых кратковременных отклонений, красным — область срабатывания аварийно-предупредительной сигнализации вплоть до срабатывания аварийной защиты (для прекращения соответствующего технологического процесса).

Принцип построения статистической модели динамики изменения некоторого условного параметра  $X$  поясняет рис. 1. Здесь представлено семейство функций распределения случайной величины параметра  $X$  (случайной величины  $X$ ). Например, численные значения указаны для температуры газового тракта дизеля через каждые 100 ч фактически выработанного технического ресурса. В каждом указанном интервале времени установившиеся текущие значения параметра  $X$  представлены в виде множества точек в пространстве характеристик  $T$  [°C],  $t$ , а соответствующая эмпирическая выборка может быть обработана как локально стационарный процесс. При этом принимается гипотеза, что в общем случае соответствующий тренд на коротких интервалах времени (100 ч) незначителен по сравнению с временным интервалом полного жизненного цикла эксплуатации судна, который может изменяться от 10 до 100 тыс. ч. На рис. 1 для наглядности представлено семейство функций распределения данных измерений как частный случай в виде нормальных законов. В общем случае статистика данных измерений может быть описана как стандартными теоретическими, так и эмпирическими функциями распределения случайных величин технологических параметров.

Далее представлены основные положения по организации имитационного моделирования нестационарных случайных технологических процессов судового оборудования. Статистический анализ технологических процессов по данным измеряемых параметров должен включать ряд вычислительных процедур. Как правило, изменение технологических характеристик судна является достаточно сложным процессом, поэтому для прогноза их изменения используется вероятностный подход. Оборудование, надежность которого контролируется технологическими и диагностическими инструментальными средствами, предлагается описывать *статистической моделью* изменения указанных характеристик в процессе эксплуатации судна. Построение данной модели базируется на принципах, изложенных в работе [5].

Следует отметить, что форма представления больших объемов статистической информации в виде текущих значений параметров всей генеральной совокупности измеряемых данных является недостаточно компактной и удобной для ее хранения. В этом случае целесообразно их хранить в виде численных значений функций распределения (через каждые 100 ч), а также средних выборочных величин, среднеквадратических отклонений, численных значений эксцессов и коэффициентов асимметрии, а также минимальных и максимальных значений. Каждый набор этих средних статистических значений может быть описан кусочно-линейными уравнениями регрессии в функции времени. Эти фактические данные должны отражать всю предысторию развития технологических процессов до текущего момента времени.

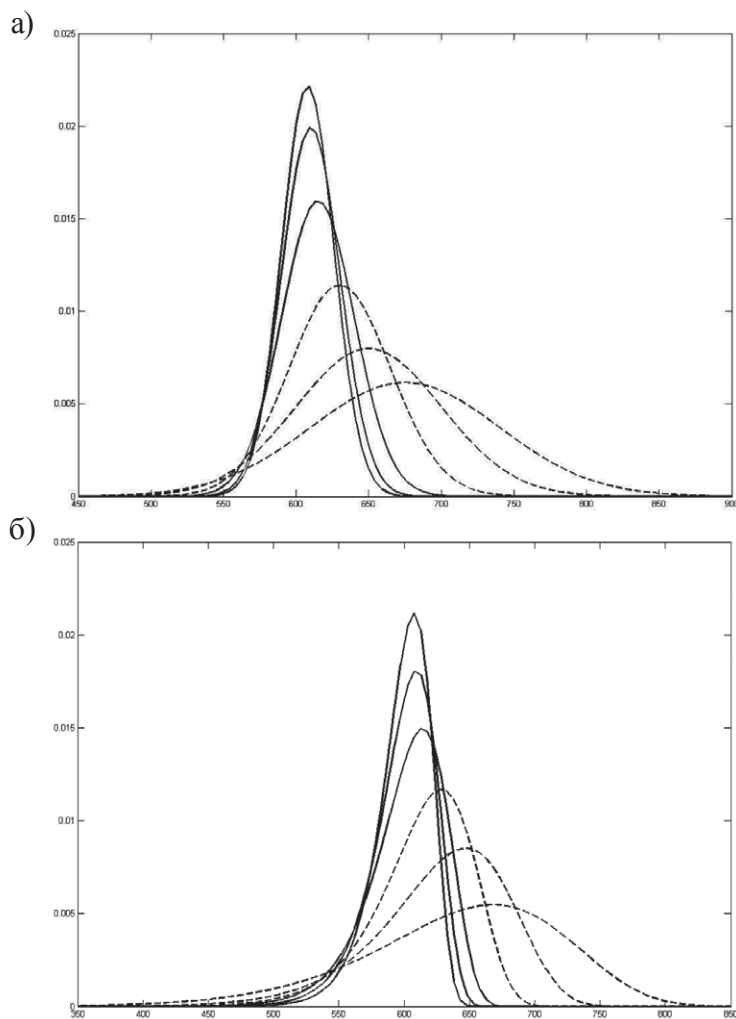
В таблице показан пример представления предыстории технического состояния судового дизеля в формате средневыворочных численных значений эмпирических данных (в части изменения температуры газового тракта для интервала времени 31,0 – 31,5 тыс. ч).

**Данные технического состояния судового дизеля в формате  
средневывборочных численных значений эмпирических данных**

Номер графика	Выработанный ресурс ГД, тыс. ч	Mean $m^*(x)$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Distribution $\sigma^*(x)$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Min $x_{\min}^*$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Max $x_{\max}^*$ $T [^{\circ}\text{C}]$	Ранг угрозы
1	31,0	608	108	554	662	0
2	31,1	610	120	550	670	1
3	31,2	615	150	540	690	2
4	31,3	630	210	525	735	3
5	31,4	650	300	500	800	4
6	31,5	675	390	480	870	4

*Примечания:*  $m^*(x)$  и  $\sigma^*(x)$  — статистические среднее и среднеквадратическое отклонение случайной измеряемой величины  $T$ ;  $x_{\min}^*$  и  $x_{\max}^*$  — минимальное и максимальное статистические значения случайной измеряемой величины  $T$ , которые зафиксированы в областях  $(x_{\max} < X(t_i) < x_{\text{АПС}})$  и  $(x_{\text{АПС}} < X(t_i) < x_{\text{АЗ}})$ , ограниченных соответствующими уставками.

Определение величин всех вышеуказанных прогнозируемых переменных обеспечит более полный объем прогнозных оценок для реальных нестационарных случайных параметров технологических процессов, которые могут существенно отличаться от гипотетических нормальных законов. Выполнение вышеизложенных действий осуществляет переход от статистического описания про-



цессов отказов оборудования к детерминированному регрессионному анализу кусочно-линейных функций статистических средних характеристик этих процессов как функций времени выработки срока службы техники.

На рис. 2 показаны графики теоретических функций распределения вероятностей (сплошные линии) и спрогнозированных значений (штрих-линии), вычисленных по уравнениям регрессии для некоторых наборов статистических средних и среднеквадратических отклонений данных измерений (на интервале времени от 31000 ч до 31200 ч). Упреждающее имитационное моделирование

*Рис. 2.* Проекция ансамбля кривых на плоскость  $p(X), T [^{\circ}\text{C}]$ , иллюстрирующую влияние времени в опасной области температуры газового тракта дизеля на статику «дрейфа»: *а* — средних значений и дисперсий (с использованием нормального распределения); *б* — коэффициента асимметрии (с использованием распределения Вейбулла)

показано на примере возможного изменения данных на интервале времени от 31300 ч до 31500 ч выработанного ресурса с шагом 100 ч, что соответствует численным значениям процессов, приведенных на рис. 1 в аксонометрическом виде.

Статистическая реализация события, когда значение параметра  $CB[X]$  превышает уставки по срабатыванию предупредительной сигнализации и аварийной защиты, должно дополнительно учитываться случайным числом этих нежелательных событий и отказов техники, а также регистрацией времени, затраченного на восстановление работоспособности судового оборудования в море или в береговых условиях.

При рассмотрении распределений, отличных от нормальных, возникает необходимость количественной оценки этого различия. Для этого используют специальные числовые характеристики (в частности, асимметрию и эксцесс). Первое вычисляется как отношение центрального момента третьего порядка к кубу среднеквадратического отклонения, а второе — как отношение центрального момента четвертого порядка к среднеквадратическому отклонению четвертой степени.

Следует отметить, что программно-аппаратные средства имитационного моделирования технологических процессов, использующие распределение Вейбулла, предоставляют наиболее гибкий инструмент исследований надежности по статистическим данным.

### Обсуждение основных результатов

Вышеизложенный вероятностный подход на базе стандартных теоретических функций распределения должен предваряться оценкой их приемлемого (доверительного) использования, т. е. должна осуществляться проверка гипотез о близости их к эмпирическим функциям распределения. Специализированные программные пакеты позволяют по данным измерений оценить доверительные вероятности близости их к стандартным функциям распределения вероятностей по критериям Стьюдента, Фишера, Пирсона и Колмогорова–Смирнова.

В то же время получение доброкачественной оценки данных измерений должно служить необходимым условием для последующих статистических исследований по направлениям поиска рациональных путей повышения надежности техники, ее безотказности и ремонтпригодности. Так, например, представляет интерес вопрос о том, какой технологический процесс в судовом оборудовании является наиболее напряженным по времени выработки его ресурса. Кроме того, представляет интерес вопрос по сравнению надежности однотипной техники, эксплуатирующейся в различных условиях Мирового океана, о влиянии на надежность определенных факторов и технологий сервисного обслуживания судов, степени нестационарности контролируемых параметров основных технологических случайных процессов как фактора морального старения, износа и т. п.

Количественная оценка степени влияния того или иного фактора вызывает значительную сложность особенно при наличии взаимного влияния факторов. Специализированные программные пакеты предоставляют возможность совместного использования группы методов математической статистики: дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа для оценки этого влияния в ходе имитационного моделирования. Таким образом, прогнозные оценки надежности и остаточного ресурса морской техники на базе упреждающего имитационного моделирования технологических параметров (как нестационарных случайных процессов) позволяют сравнить эффективность альтернативных решений, направленных на поддержание заданной технической готовности судов и судового оборудования.

В зависимости от поставленной задачи метод упреждающего имитационного моделирования статистики технологических процессов должен предоставлять прогнозную информацию в следующих режимах:

- краткосрочного прогноза по данным предыстории развития параметров (с шагом 100 ч) в текущем интервале времени 1000 ч;
- среднесрочного прогноза по данным предыстории развития параметров (с шагом 1000 ч) в текущем интервале времени 10000 ч;



– дальнесрочных прогнозов по данным предыстории развития параметров (с шагом 10000 ч) в текущем интервале времени 100000 ч.

### Заключение

Современные научно-методические разработки для систем управления жизненным циклом продукции судостроения на базе марковского анализа и метода Монте-Карло, рекомендованные ГОСТ Р ИСО/МЭК31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска», не удовлетворяют требованиям морской практики Российского морского регистра судоходства. Главная причина такого положения — неучёт реальных физических процессов, отличающихся моральным и физическим устареванием техники. В математической трактовке это означает неучёт нестационарного характера случайных процессов выработки временного ресурса оборудования.

Для реализации обсуждаемых предложений уже существует достаточно полный набор первичных датчиков, средств преобразования измерений в цифровой формат и соответствующих вычислительных ресурсов для их обработки. На судах уже эксплуатируются бортовые информационно-коммуникационные системы передачи текущих данных вахтенным операторам, смежным системам автоматизированного управления в системы регистрации аварийных ситуаций («черный ящик») и другим судовым потребителям информации [7], [8]. Однако необходимо дополнительно обеспечить экипажи судов результатами статистической обработки текущих данных в море и предсказания опасных тенденций ухудшения технического состояния судового оборудования [9] – [13]. Эта возможность позволит обеспечить своевременное планирование текущих задач эксплуатации, включая использование по прямому назначению и проведение ремонтно-восстановительных работ, а также более объективную оценку объема сервисного обслуживания судна. Кроме того, повысится безопасность мореплавания, снизятся сроки и стоимость технического обслуживания судов. Указанное направление исследований особенно важно для судов Арктического района плавания, для которых характерны повышенные требования к живучести судов и безопасности мореплавания, функционирование техники в условиях суровой природной среды и значительной удаленности от средств берегового обеспечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmad R.* An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application / R. Ahmad, S. Kamaruddin // *Computers & Industrial Engineering*. — 2012. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 135–149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
2. *Shin J-H.* On condition based maintenance policy / J-H Shin, H-B Jun // *Journal of Computational Design and Engineering*. — 2015. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
3. *Zhu W.* Condition-based maintenance policies for a combined wear and shock deterioration model with covariates / W. Zhu, M. Fouladirad, C. Bérenguer // *Computers & Industrial Engineering*. — 2015. — Vol. 85. — Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.cie.2015.04.005.
4. *Do P.* A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions / P. Do, A. Voisin, E. Levrat, B. Iung // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2015. — Vol. 133. — Pp. 22–32. DOI: 10.1016/j.ress.2014.08.011.
5. *Клюев В. В.* Технические средства диагностирования: справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.
6. *Калявин В. П.* Надежность и техническая диагностика судового электрооборудования и автоматики / В. П. Калявин, А. В. Мозгалевский, В. Л. Галка. — СПб.: Элмор, 1996. — 296 с.
7. *Войтецкий В. В.* Управление судовыми энергетическими установками / В. В. Войтецкий // Гл. 6.3. «Энциклопедия машиностроения. Общая методология и теория кораблестроения», т. IV-20, кн. 1. — СПб.: Политехника, 2003. — С. 502–510.
8. *Мясников Ю. Н.* Информационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна / Ю. Н. Мясников, А. А. Иванченко, А. М. Никитин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 405 с.



9. Ковтун Л. И. Мониторинг, упреждающее моделирование и ситуационный анализ аварийных процессов и мер противодействия для систем автоматизированного управления сложными комплексами машиностроения морской техники: программная разработка для ЭВМ / Л. И. Ковтун, Н. А. Шарков, Н. Л. Ковтун. — № 2010613335, от 20 мая 2010 г.

10. Шарков Н. А. Анализ и синтез иерархически-интегрированных человеко-машинных комплексов управления морской техникой в аварийных условиях на базе интеллектуальных технологий / Н. А. Шарков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 49–76.

11. Ковтун Л. И. Супервизорная система автоматизированного управления иерархически структурированными организационно-техническими комплексами морской техники с использованием имитационно-вычислительных симуляторов / Л. И. Ковтун // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 54. — С. 5–48.

12. Шарков Н. А. Имитационное моделирование процессов управления жизненным циклом продукции судостроения с использованием методов нейронечетких систем / Н. А. Шарков, Н. Л. Ковтун // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 78 (362). — С. 171–180.

13. Жиленков А. А. Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования / А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 90–97.

## **SIMULATION STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS OF ENGINEERING PROCESSES ON VESSELS FOR PREDICTION OF RELIABILITY OF EQUIPMENT**

*This article deals with questions of reliability and quality of the vessel electromechanical equipment regarding implementation of functional diagnostics and risks prediction based on the statistical model of the theory of reliability. Implementation of this approach will allow to make more effective management decisions in comparison with traditional practice to react to already happened failures of the equipment. At the same time continuous statistical processing of key parameters of the equipment shall be performed directly on board the vessels and provide accumulation of data of all events for the analysis of dangerous tendencies of their changes. This statement corresponds requirements of the Russian Maritime register of shipping to the vessel diagnostic system. To achieve this there are full range of digital sensors and the appropriate computing resources for processing information from this sensors onboard. Also there are onboard information systems for transferring data to operators, adjacent systems for automated control, blackboxes and other users. However it is necessary to provide the crew of the vessel with results of statistical processing of the current parameters of the equipment taking into account an analysis of previous measured data. This article deals with methods of storage of this data in “statistically packed” type and machine methods of processing of this data. Objective instrument control and automatic prediction of dangerous tendencies in technical conditions of vessel equipment will provide a management of the ship-owning companies and crews with a possibility of planning of the current tasks of maintenance, including use of vessels for the intended purpose and execution of repair works by the actual state of the equipment. Besides, safety of navigation will increase, terms and cost of maintenance of vessels will decrease. This research area is especially important for vessels of the Arctic navigation area, which have increased requirements to survivability and safety of navigation and functioning of the equipment in the severe environment and considerable remoteness from the coast.*

*Keywords: vessels, equipment, parameters, simulation modeling, statistical analysis, reliability, diagnostics, prediction.*

### **REFERENCES**

1. Ahmad, Rosmaini, and Shahrul Kamaruddin. “An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application.” *Computers & Industrial Engineering* 63.1 (2012): 135–149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.
2. Shin, Jong-Ho, and Hong-Bae Jun. “On condition based maintenance policy.” *Journal of Computational Design and Engineering* 2.2 (2015): 119–127. DOI: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
3. Zhu, Wenjin, Mitra Fouladirad, and Christophe Bérenguer. “Condition-based maintenance policies for a combined wear and shock deterioration model with covariates.” *Computers & Industrial Engineering* 85 (2015): 268–283. DOI: 10.1016/j.cie.2015.04.005.

4. Do, P., A. Voisin, E. Levrat, and B. Iung. "A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions." *Reliability Engineering & System Safety* 133 (2015): 22–32. DOI: 10.1016/j.ress.2014.08.011.

5. Kljuev, V. V., P. P. Parhomenko, V. E. Abramchuk, et al. *Tehnicheskie sredstva diagnostirovanija: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1989.

6. Kaljavin, V. P., A. V. Mozgalevskij, and V. L. Galka. *Nadezhnost' i tehničeskaja diagnostika sudovogo jelektrooborudovanija i avtomatiki*. SPb.: Jelmor, 1996.

7. Vojteckij, V. V. "Upravlenie sudovymi jenergetičeskimi ustanovkami." *Jenciklopedija mashinostroenija. Obshhaja metodologija i teorija korablestroenija*. Tom IV-20, Kniga 1. SPb.: Politehnika, 2003: 502–510.

8. Mjasnikov, Ju. N., A. A. Ivanchenko, and A. M. Nikitin. *Informacionnye tehnologii v propulsivnom komplekse morskogo sudna*. SPb.: GUMRF im. admirala S.O. Makarova, 2013.

9. Kovtun, L. I., N. A. Sharkov, and N. L. Kovtun. Monitoring, uprezhdajushhee modelirovanie i situacionnyj analiz avarijnyh processov i mer protivodejstvija dlja sistem avtomatizirovannogo upravlenija slozhnymi kompleksami mashinostroenija morskoy tehniki: software program. № 2010613335; 20 May 2010.

10. Sharkov, N. A. "Analiz i sintez ierarhicheski-integrirovannyh cheloveko-mashinnyh kompleksov upravlenija morskoy tehnikoj v avarijnyh uslovijah na baze intellektualnyh tehnologij." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 54 (2010): 49–76.

11. Kovtun, L. I. "Supervizornaja sistema avtomatizirovannogo upravlenija ierarhicheski struk-turirovannyimi organizacionno-tehnicheskimi kompleksami morskoy tehniki s ispol'zovaniem imita-cionno-vychislitel'nyh simuljatorov." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 54 (2010): 5–48.

12. Sharkov, N. A., and N. L. Kovtun. "Lifetime management simulation for shipbuilding production using the method of neuro-fuzzy systems." *Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova* 78(362) (2013): 171–180.

13. Zhilenkov, A. A., A. A. Zheleznyak, and S. G. Chorniy. "Prospective ways to improve the efficiency of diagnosis reliability parameters of operation of offshore drilling equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 90–97.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Ковтун Николай Львович* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Кунаев Михаил Андреевич* — кандидат  
технических наук, старший научный сотрудник.  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
*kovtun5@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Kovtun Nikolay L'vovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Kunaev Mikhail Andreevich* —  
PhD, senior staff scientist  
Krylov State Research Centre  
*kovtun5@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 1 сентября 2016 г.*

## **К 320-ЛЕТИЮ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА РОССИИ**

**Н. Б. Глебов,**  
первый проректор, канд. техн. наук, доц.,  
капитан 1-го ранга запаса  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

**С. Ю. Развозов,**  
д-р техн. наук, проф., капитан 1-го ранга запаса,  
зав. каф. маневрирования и управления судном  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

**В. А. Богословский,**  
доц. каф. маневрирования и управления судном,  
капитан 1-го ранга запаса  
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

### **ВКЛАД ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА В РАЗВИТИЕ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА РОССИИ**

*Посвящается сотрудникам и выпускникам  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова,  
которые внесли значительный вклад  
в развитие Военно-морского флота России.*

В 2016 г. Военно-морскому флоту России исполнилось 320 лет. Исторически сложилось так, что Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, являющийся приемником двух старейших морских учебных заведений России: Государственной морской академии имени адмирала С. О. Макарова и Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций, всегда тесно взаимодействовал с Военно-морским флотом России. Это проявилось как в период становления учебного заведения, когда первыми преподавателями стали офицеры флота, так и в дальнейшем, когда в течение длительного периода времени в стенах вуза проводилась подготовка кадровых офицеров и офицеров запаса для ВМФ, а профессорско-преподавательский состав принимал участие во многих научных проектах, имеющих оборонную направленность.

В 1876 г. были открыты Мореходные классы Санкт-Петербургского яхт-клуба, положившие начало Государственной морской академии имени адмирала С. О. Макарова. Первым заведующим Мореходных классов был назначен прапорщик Корпуса флотских штурманов А. В. Григорьев. Среди первых преподавателей были капитан-лейтенант (впоследствии капитан 1-го ранга) В. В. Вахтин, старший лейтенант фон Берг В. В., капитан Корпуса корабельных инженеров-механиков Н. О. Беренс, генерал-майор в отставке Корпуса флотских штурманов Д. М. Гончаров, штабс-капитан корпуса корабельных инженеров-механиков Н. Н. Каминский, контр-адмирал в отставке Н. А. Корнилов, полковник по Адмиралтейству А. Н. Лосев, подполковник Корпуса корабельных инженеров-механиков Н. В. Лесников, полковник Корпуса корабельных инженеров-механиков В. П. Мадисов, капитан Корпуса корабельных инженеров-механиков Ф. Ф. Масалов, старший лейтенант Д. Д. Нелидов, лейтенант П. А. Небылов, полковник по Адмиралтейству К. Н. Оглоблинский, старший лейтенант А. А. Паскин, генерал-майор по Адмиралтейству И. В. Студницкий, полковник по Адмиралтейству В. М. Сухомель, генерал-майор по Адмиралтейству И. А. Федоров, генерал-майор по Адмиралтейству Ю. М. Шокальский.

В апреле 1896 г. в официальных документах появилось звание «прапорщик запаса флота». О производстве в чин объявлялось в Высочайшем приказе по Морскому ведомству. Прапорщики запаса флота имели право получить чин подпоручика и поручика в мирное время, если они выдерживали полный офицерский экзамен из специальных предметов, составленный при Морском корпусе или Техническом училище Морского ведомства. После этого экзамена следовало совершить шестинедельное плавание на военных судах. Произведенные в чин таким образом офицеры могли быть направлены из запаса во флот по Адмиралтейству на общих основаниях на имеющиеся вакансии по предоставлению того начальника, в ведении которого они хотели служить.

Среди известных преподавателей, получивших офицерское звание, были Н. А. Сакеллари — видный специалист в области теории и практики кораблевождения, капитан дальнего плавания, профессор, флагман 2-го ранга (в 1901 г. окончил с дипломом 1-й степени физико-математический факультет Новороссийского университета). С 1903 г. Н. А. Сакеллари служил юнкером флота и в 1904 г. сдал экстерном экзамены за полный курс Морского корпуса и был произведен в мичманы. В. Ю. Горяинов, профессор, инженер-капитан 1-го ранга запаса (в 1914 г. окончил СПб. лицей (юридический факультет)). В 1914 – 1915 гг. В. Ю. Горяинов служил юнкером флота на л/к «Севастополь», а в 1915 – 1917 гг. служил на л/к «Севастополь» и крейсере «Олег» вахтенным офицером, младшим штурманом.

В 30-х гг. XX в. часть выпускников, проработавших уже на торговом флоте в должности помощников капитана судна, старших помощников капитанов, были призваны в военно-морской флот и прошли годичное обучение на Специальных курсах командного состава Учебного отряда подводного плавания им. С. М. Кирова. После обучения они были направлены помощниками командиров подводных лодок в военно-морской флот и стали кадровыми военными. Приведем лишь неполный список выпускников, связавших свою жизнь с Военно-морским флотом: В. Н. Алексеев — Герой Советского Союза, Б. К. Бакунин, С. Н. Богорад — Герой Советского Союза, Г. А. Гольдберг, Л. И. Городничий, В. Л. Жернаков, Н. Т. Зиновьев, Ф. И. Колонистов, Л. А. Лошкарёв, А. М. Матиясевич — Герой Советского союза, Ф. Н. Михалкин, В. А. Полешук, С. А. Рогачевский, С. И. Романенко, В. Ф. Тамман, А. А. Холмквист, С. И. Челпанов, П. П. Шеркшнис, А. В. Халатов, Ф. Г. Вершинин — Герой Советского Союза.

В соответствии с Постановлением Государственного Комитета Обороны от 5 марта 1944 г. № 5311 «О мероприятиях по подготовке командных кадров морского флота» и распоряжением Совета народных комиссаров СССР № 10732-р от 16 мая 1944 г. Ленинградский морской техникум был реорганизован в Ленинградское высшее мореходное училище (ЛВМУ). Это учебное заведение было организовано по принципу училища закрытого типа. Оно готовило штурманов дальнего плавания, инженеров-судомехаников, инженеров электромехаников, радиоинженеров для морского флота. В штатном расписании была предусмотрена должность заместителя начальника училища по военно-морской подготовке, а также находились следующие структурные подразделения: военно-морская кафедра (кафедра специальных дисциплин); отдел строевой и физической подготовки (позже — организационно-распорядительный строевой отдел (ОРСО)). В штатном расписании были предусмотрены должности командиров курсантских рот.

В ЛВМУ началась подготовка офицеров запаса ВМФ, профиль подготовки которых был определен в соответствии с гражданскими специальностями. Часть выпускников ЛВМУ направляли после окончания училища служить в ВМФ, присвоив воинское звание «младший лейтенант» или «инженер-младший лейтенант».

В 1951 г. в училище был образован Спецфакультет (Военно-морской факультет). На этот факультет было набрано две группы курсантов (4- и 5-го курсов), по 25 человек в каждой группе. Являясь самостоятельным подразделением училища с военным укладом внутреннего распорядка дня, жизни и учебы, факультет готовил офицеров-радиоинженеров для Военно-морского флота. По окончании обучения курсанты сдавали государственные экзамены. Курсантам, окончившим Военно-морской факультет, присваивалось звание «инженер-лейтенант». Первый выпуск состоялся в декабре 1952 г., последний — в феврале 1956 г. уже в ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова. Военно-морскому факультету было присвоено наименование «Войсковая часть 53046».



Большинство выпускников факультета были назначены на инженерные и командные должности в Военно-морской флот, в научно-исследовательские учреждения промышленности и в Министерство среднего машиностроения. В дальнейшем некоторые из них проходили службу в ракетных войсках стратегического назначения. Многие выпускники Спецфакультета — радиоинженеры ВМФ — впоследствии являлись сотрудниками военных НИИ, получили звания капитана 1-го ранга и полковника, защитили кандидатские и докторские диссертации. Среди них капитаны 1-го ранга В. С. Михайлов, Г. К. Чертов, В. Г. Чашин, А. В. Додонов, Е. Н. Востриков, С. Я. Генералов, О. Л. Грибанов, Г. Т. Соловьев. Подготовка офицеров запаса в нашем вузе проводилась до 2008 г. Всего было подготовлено более 18000 офицеров запаса.

Особенно следует отметить заслуги выпускников, посвятивших свою жизнь Военно-морскому флоту и внесших значительный вклад в его развитие.



**Капитан 1-го ранга О. Л. Грибанов** родился в г. Павлодаре. В 1950 г. поступил на Гидрографический факультет. По окончании училища проходил службу в Гидрографической службе Тихоокеанского флота.

В 1984 г. О. Л. Грибанов был переведен в научно-исследовательский институт, где прошел путь от младшего научного сотрудника до начальника отдела. Олег Леонидович разработал новую классификацию гидрографических и геофизических исследований, обосновал (в соавторстве) основные принципы новой технологии съемки грунта дна, участвовал в разработке ряда нормативных документов по навигационно-гидрографическому обеспечению некоторых видов боевой деятельности Военно-морского флота.

После увольнения в запас капитан 1-го ранга О. Л. Грибанов продолжал трудиться в Научно-исследовательском гидрографическо-штурманском институте (НИГШИ) Военно-морского флота. О. Л. Грибанов внес большой вклад в исследование Тихого океана и морей Дальнего Востока.



**Герой Советского Союза капитан 1-го ранга А. Г. Гусаков** родился в деревне Городище Псковской области. В 1959 г. поступил на Судомеханический факультет Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адмирала С. О. Макарова. В 1964 г. окончил училище и начал прохождение службы в частях ВМФ, являлся сотрудником 1202 военного представительства Министерства обороны СССР.

За участие в выполнении специального задания правительства СССР и проявленные при этом мужество и героизм капитану 1-го ранга А. Г. Гусакову Указом Президиума Верховного Совета СССР в 1989 г. присвоено звание Героя Советского Союза.

За время прохождения военной службы капитан 1-го ранга А. Г. Гусаков награжден орденами и медалями СССР.



**Лауреат Ленинской премии, контр-адмирал Е. Я. Бузов** родился в г. Ленинграде. В 1945 г., окончил среднюю школу с золотой медалью и поступил на Радиотехнический факультет Ленинградского высшего мореходного училища. В 1950 г. закончил училище и был направлен на Военно-морской флот. Службу Е. Я. Бузов начал на эскадренном миноносце «Редкий» Камчатской военной флотилии в должности начальника радиотехнической службы.

В последующие годы Е. Я. Бузов закончил Высшие радиотехнические классы ВМФ и продолжил службу в Центральном аппарате ВМФ (пятое управление), при этом вел теоретические исследования в области возможного применения оптических квантовых генераторов (лазеров) в интересах флота.

В 1976 г. капитан 1-го ранга Е. Я. Бузов был назначен заместителем начальника 14-го Института Военно-морского флота по науке. Евгений Яковлевич лично осуществлял научное ру-



ководство научно-исследовательскими работами института по проблемам поиска нетрадиционных направлений развития радиоэлектронного вооружения ВМФ для повышения эффективности средств обнаружения и целеуказания.

В 1984 г. за активное участие в комплексе фундаментальных, прикладных исследований и в создании на их основе новых систем вооружения капитану 1-го ранга Е. Я. Бузову была присуждена Ленинская премия.

Учитывая принципиально новые результаты исследований закономерностей дискретно-временного функционирования центральной нервной системы биологических объектов, для их внедрения на объектах ВМФ, по инициативе Е. Я. Бузова и Ю. А. Смирнова в Министерстве обороны СССР был создан специальный Научно-исследовательский центр, первым начальником которого в 1988 г. был назначен контр-адмирал Е. Я. Бузов.

Контр-адмирал Е. Я. Бузов — лауреат Ленинской премии, кандидат технических наук, действительный член Международной академии информатизации, автор более 80 научных трудов, 17 изобретений и одного научного открытия. Он является Председателем Санкт-Петербургского общественного совета «300 лет Российскому флоту».



**Контр-адмирал А. И. Ветютнев** родился в Волгоградской области. В 1950 г. поступил на Радиотехнический факультет Ленинградского высшего мореходного училища. После третьего курса был зачислен на Военно-морской факультет, который окончил в 1955 г., получив воинское звание «лейтенант». После окончания училища А. И. Ветютнев был откомандирован в Министерство среднего машиностроения, где закончил специальные курсы по основам устройств ядерного оружия и видам его эксплуатации. В последующие годы проходил службу на инженерных и командных должностях в оборонных отраслях промышленности в аппарате военных представительств.

С 1977 по 1982 г. А. И. Ветютнев занимал должности заместителя, начальника Государственного научно-исследовательского испытательного полигона, в 1982 – 1993 гг. являлся начальником Научно-исследовательского института по проблемам видов Вооруженных сил.

Контр-адмирал А. И. Ветютнев — один из авторов научных исследований, планирования, теоретического и экспериментального обоснования предотвращения возможных катастрофических последствий, связанных со сложными техническими системами. Он являлся одним из основоположников разработки теории и практики развертывания в 1972 – 1982 гг. крупномасштабных работ по оценке экологической опасности последствий испытаний боевых радиоактивных веществ на островах акватории Ладожского озера в 1953 – 1954 гг. В 1989 – 1992 гг. А. И. Ветютнев стал одним из авторов оценки радиационно-экологических последствий затонувшей подводной лодки «Комсомолец». Контр-адмирал А. И. Ветютнев — доктор технических наук, профессор, академик МАНЭБ, являлся ответственным редактором по проблеме «Ядерно-радиационная безопасность» в научно-образовательном аналитическом журнале «Жизнь и безопасность», был участником испытаний ядерного оружия. Контр-адмирал А. И. Ветютнев награжден многими орденами и медалями.

Многие ученые — преподаватели университета внесли большой вклад в развитие технических средств: как транспортных судов, так и кораблей ВМФ.

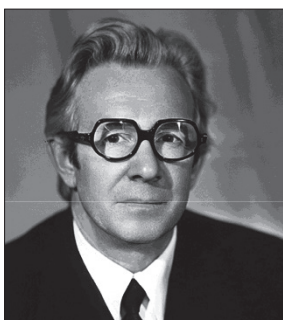


**Кандидат технических наук, доцент, лауреат Государственной премии СССР А. В. Горелейченко** (1909 – 1978 гг.). В 1946 г. А. В. Горелейченко была присвоена Государственная премия СССР за изобретение (в соавторстве) автоматической метеостанции. Для этой станции непосредственно Анатолий Владимирович разрабатывал источники питания. Под его руководством разрабатывалась новая телеизмерительная метеорологическая станция автономного действия. Разработка этой станции осуществлялась по заказу Главного управления Северного морского пути на основе современных достижений электроники. В конце 1957 г. были

проведены ее первые испытания в реальных условиях. В выполнении этой темы принимал участие также канд. техн. наук, доц. М. М. Айзинов.



**Кандидат технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР Н. И. Бородин.** Являясь одним из основоположников и руководителей отечественной научной школы в области комплексной микроминиатюризации дискретных устройств и бортовых вычислительных машин, Н. И. Бородин был главным конструктором разработки бортовой цифровой вычислительной машины четвертого поколения специального назначения. Находясь в должности заместителя главного конструктора, за разработку малогабаритной электронной управляющей машины и управляющих вычислительных комплексов типа УМИ-НХ и внедрение их в первые цифровые управляющие системы был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР.



**Доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР Е. Л. Смирнов.** Область научных интересов: гироскопические навигационные системы, технические средства судовождения. Является автором обобщенной теории роторных вибрационных гироскопов, теории динамически настраиваемых гироскопов и построенных на их основе навигационных систем. В 1987 г. за разработку теории динамически настраиваемых гироскопов и построенных на основе этой теории навигационных систем Е. Л. Смирнов был удостоен почетного звания лауреата Государственной премии СССР.

В 1957 г. в ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова под руководством доктора военных наук, профессора А. П. Ющенко началось проведение научных исследований, на базе которых в 1959 г. была создана научно-исследовательская лаборатория, задачей которой явилась разработка и построение первой навигационной вычислительной машины полностью на полупроводниковых приборах. Для работы в этой области сформировались две группы специалистов: одна — для разработки аппаратного обеспечения, другая — для программного обеспечения. Результаты этих работ, завершенных в 1962 г., были переданы для внедрения Астраханскому заводу вычислительных машин и использованы при создании первых отечественных навигационных машин МВУ-3 и МВУ-3М.

Впервые в мире для решения проблемы создания алгоритмического обеспечения решения задач навигации и прежде всего задачи вычисления координат судна был разработан и изложен оригинальный метод последовательного уточнения координат места судна и навигационных параметров его движения с оценкой их точности. Под руководством доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Академии наук СССР А. Е. Сазонова была разработана теория этого метода и создана основа для решения следующих задач:

- последовательное сглаживание навигационных измерений;
- создание новой теории комплексирования навигационных измерений;
- последовательное определение навигационных параметров движения морских подвижных объектов и т.д.

Большой вклад в развитие этой области морской науки внес широко известный ученый в области «математической навигации» доктор технических наук, профессор Ю. М. Филиппов, которому принадлежит первая статья «Использование одной линии положения для уточнения счислимого места судна», опубликованная в 1957 г. в пятом выпуске «Ученых записок» ЛВИМУ.

Доктор технических наук, профессор Е. Я. Щеголев впервые в СССР сконструировал и изготовил новый радиопеленгатор с визуальным отсчетом.

В 50 – 60 гг. XX в. доктором технических наук, профессором В. Ф. Дьяконовым был выполнен большой объем научных исследований по разработке алгоритмов решения задач мореходной астрономии, которые в дальнейшем были опубликованы в его монографии.

Коллектив кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств под руководством доктора технических наук, профессора К. А. Семенова принимал активное участие в реализации проблемы использования полупроводников в морской приемной и передающей аппаратуре.

Работы доктора технических наук, профессора Ю. И. Никитенко были посвящены оптимизации приемоизмерительной аппаратуры спутниковых РНС и разработке теории использования результатов измерений фазы сигналов спутников для определения угловой пространственной ориентации судна и положения его оси вращения.

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор А. В. Жерлаков является основоположником школы многокомпонентных гироскопов.

Наиболее значительные успехи в области имитационного моделирования процесса обработки радионавигационной информации в морской навигационной бортовой аппаратуре достигнуты доктором технических наук, профессором С. В. Смоленцевым, которому удалось доказать возможность построения адаптивной системы получения статистической модели судна как объекта управления. Созданная им имитационная модель позволила также доказать возможность создания адаптивной системы выбора оптимального дифферента судна, обеспечивающего минимальный расход топлива. Внедрение выполненных исследований в промышленности осуществлялось совместно с ЦНИИ имени А. Н. Крылова, ЦНИИ «Электроприбор», Институтом проблем транспорта РАН.

Заказчиками кафедр ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова являлись такие крупнейшие фирмы, как НИИ «Теоретической кибернетики», НИИ «Прикладной механики» имени академика В. И. Кузнецова, ЦНИИ «Дельфин», ЦНИИМФ.

На кафедре судовых ядерных энергетических установок были разработаны наиболее рациональные схемы судовых паротурбинных установок, рассчитанных на работу при высоких начальных параметрах пара. Было выполнено несколько фундаментальных работ в области ядерных энергетических установок совместно с ВВМИУ им. Ф. Э. Дзержинского, проведены исследования процессов растворения и переноса в первом контуре ЯЭУ азота.

В 1981 г. в ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова была организована отраслевая научно - исследовательская лаборатория судовой магнитоэлектродинамики. Большой объем научно - исследовательских работ был выполнен в лаборатории по заказам Военно-морского флота и судостроительной промышленности.

Под руководством доктора технических наук, профессора Ф. М. Кацмана сотрудники кафедры «Теория и устройство судна» выполнили комплекс научно-исследовательских и практических работ по вопросам пропульсивных качеств судов в реальных условиях эксплуатации. На основе этих исследований были разработаны соответствующие разделы Правил Российского морского регистра судоходства, ведомственные, руководящие технические материалы, государственные и отраслевые стандарты.

В статье приведена лишь небольшая часть научных разработок, выполненных в стенах ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, используемых в интересах Военно-морского флота страны.

Сегодня в Университете продолжают преподавательскую деятельность многие офицеры запаса ВМФ. Среди них капитаны 1-го ранга А. П. Баранов, В. А. Богословский, С. В. Голод, Н. Б. Глебов, А. В. Захаров, А. Б. Каракаев, Б. П. Коротков, В. А. Мирошниченко, С. Ю. Развозов, В. А. Рычков, В. И. Сигида и др.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского  
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Выпуск 5 (39)**

**2016 год**

Выпускающие редакторы  
*Н. А. Карамзина, Т. В. Середова*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*  
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.10.16. Формат 60×90/8  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 29. Тираж 500 экз. Заказ № 550/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7