

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

ВЕСТНИК

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

Том 17. № 1

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — Т. 17. — № 1. — 156 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки)»;

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)»;

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)»;

2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки).

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в «Вестнике» публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

«Вестник» включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге агентства Урал-Пресс: 37276.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2024

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырко
д-р техн. наук, проф.

**Члены
редакционной
коллегии:**

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 7**

- Каретников В. В., Прохоренков А. А., Андреев Ю. Г.* Повышение навигационной безопасности плавания по затруднительным для судоходства участкам внутренних водных путей при использовании 3D электронных навигационных карт 7
- Моргунов К. П., Колосов М. А., Чинаков П. П.* Использование процессов разжижения и консолидации для регулирования свойств грунтов 21
- Заварзин Р. В., Католиков В. М.* Экспериментальное исследование строения грядового дна в условиях дноуглубительной прорези 33
- Мовчан И. М., Оськин Д. А.* Структура системы управления морским судном в режиме динамического позиционирования и ее программная реализация 49
- Подпорин С. А.* Изменение ветрового режима на судоходных трассах морей России в конце XX – начале XXI вв. 61
- Онищенко И. С.* Обзор развития требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания 75
- Изотов О. А.* Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в зоне хинтерленда морского порта 86
- Дерябин В. В., Сазонов А. Е.* Определение широты места судна по глубинам на основе нейронной сети 94
- Дыда А. А., Пушкарев И. И.* Разработка системы управления автономным судном на основе операционной системы ROS2 105

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 115**

- Цветков Ю. Н., Павлова К. Д., Светловская А. С.* Смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений 115
- Ушаков К. М., Яцук Ю. В., Саченко А. Г.* Исследование буксировочного сопротивления катамарана с упрощенными обводами 127

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макишанов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

С. В. Смоленцев,
д-р техн. наук, проф.

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)..... 138**

Петров А. П., Живлюк Г. Е. Возможность использования
традиционных современных судовых дизельных энергетических
установок в автономном судоходстве..... 138

Ватолин Д. С. Перспективы развития отечественных пропульсивных
комплексов для танкеров-газовозов класса ARC7 148

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 7

Karetnikov V. V., Efimov K. I., Prokhorenkov A. A. Enhancing navigational safety on limiting routes of inland waterways with 3D electronic navigational charts 7

Morgunov K. P., Kolosov M. A., Chinakov P. P. Using liquefaction and consolidation processes to control soil properties..... 21

Zavarzin R. V., Katolikov V. M. Experimental study of the structure of the bottom relief in the conditions of a dredging cut..... 33

Movchan I. M., Oskin D. A. Structure of the control system of a marine vessel in dynamic positioning mode and its software implementation 49

Podporin S. A. Wind regime changes on the shipping routes of the Russian seas at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries 61

Onishchenko I. S. Review of the development of requirements to ensure the safe operation of inland waterway vessels 75

Izotov O. A. Modeling of the distribution of cargo flows of combined shipments in the hinterland area of the seaport..... 86

Deryabin V. V., Sazonov A. E. Depth-aided prediction of vessel latitude based on a neural network..... 94

Dyda A. A., Pushkarev I. I. Development of control system for unmanned surface vehicle based on the ROS2 105

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 115

Tsvetkov Y. N., Pavlova K. D., Svetlovskaya A. S. Wettability of stern-tube tribopairs materials with water 115

Ushakov K. M., Yatsuk Yu. V., Sachenko A. G. Investigation of the towing resistance of a catamaran with simplified hull forms 127

Volume 17. № 1

2025

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
Doctor of Technical Sciences

Members of the editorial board:

A. Ye. Sazonov
Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

R. M. Yusupov
Doctor of Technical Sciences,
Prof., corresponding member
of the Russian Academy of
Sciences

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

M. N. Kirsanov,
Doctor of Phys.-Math. Sciences

M. A. Kolosov,
Doctor of Technical Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY).....	138
<i>Petrov A. P., Zhivljuk G. E.</i> Possibility of using traditional modern marine diesel power plants in autonomous shipping	138
<i>Vatolin D. S.</i> Development prospects for domestic propulsion systems of ARC7 LNG carriers	148

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-7-20

EDN EUJJNV

ENHANCING NAVIGATIONAL SAFETY ON LIMITING ROUTES OF INLAND WATERWAYS WITH 3D ELECTRONIC NAVIGATIONAL CHARTS

V. V. Karetnikov, K. I. Efimov, A. A. Prokhorenkov

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

The review study focuses on piloting vessels on inland waterways that presents persistent challenges due to the influence of variable external factors on vessel passage. Under such conditions, a navigator must possess a clear understanding of the vessel's present state and anticipate its behavior over a predictive time horizon. Therefore, expertise in ship handling is critically important not only for navigating particularly challenging routes but also for routes where extremely low water levels necessitate a reduction in the ship's maximum draught and require minimal ship speed. Routes affected by low water levels, which require a reduction of the permitted draught, are considered limiting routes. These routes, due to their length, can include sections that are difficult to navigate. Extremely low water levels, coupled with unpredictable currents and winds, can amplify the influence of external factors on a vessel. A navigator's thorough assessment of prevailing navigation conditions influenced by external factors is paramount for ensuring the navigational safety of the voyage. A potentially transformative approach to enhance navigational safety is the use of 3D electronic navigational charts (ENCs). Successfully performing essential navigation duties on limiting inland waterways requires proper assessment of modern methods of electronic chart use, and potentially modifying existing methods to perform specific navigation tasks in new ways.

Keywords: inland waterways, piloting, reduced draught, navigation equipment, high-tech cartographic data, Electronic Navigational Charts (ENCs), navigational safety, navigational and hydrographic conditions, hydrometeorological conditions.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., K. I. Efimov and A. A. Prokhorenkov "Enhancing navigational safety on limiting routes of inland waterways with 3D electronic navigational charts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 7–20. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-7-20.

УДК 656.628

ПОВЫШЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ ПО ЗАТРУДНИТЕЛЬНЫМ ДЛЯ СУДОХОДСТВА УЧАСТКАМ ВВП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ

В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Прохоренков

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

Темой обзорного исследования являются особенности выполнения проводки судна по внутренним водным путям, сопряженной со значительными сложностями, вызванными следованием судов в условиях воздействия переменных внешних факторов. Отмечается, что в таких условиях каждый судоводитель должен иметь четкое понимание того, что происходит с судном, находящимся под его управлением не только на текущий момент времени, но и о том, что будет происходить с ним в течение некоторого упреждающего интервала времени. Рассмотрены особенности следования судна как по отдельным участкам ВВП, являющимся затруднительными для судоходства, так и по участкам с характерными для ВВП условиями плавания, требующими при пониженном уровне воды снижения значения проходной осадки судна и минимальной

скорости его движения. Отмечается, что участки, на которых снижение уровня воды вызывает необходимость ограничения проходимой осадки, следует также относить к затруднительным для судоходства. Обращается внимание на то, что снижение уровня воды не исключает влияние неправильных течений, которые в совокупности с действием ветра приводят к возрастанию степени влияния внешних факторов на судно. Полнота оценки судоводителем текущих условий плавания, обусловленных внешними факторами, определяет навигационную безопасность проводки. Отмечается, что одним из радикальных способов повышения навигационной безопасности плавания является применение 3D электронных навигационных карт. Подчеркивается, что внедрение на флоте новой аппаратуры, позволяющей эффективно решать задачи безопасной проводки судна по затруднительным для судоходства участкам, требует проведения исследования методов ее применения, и при необходимости может возникнуть необходимость модифицировать их для выполнения конкретных прикладных задач судовождения.

Ключевые слова: внутренние водные пути, проводка судов, уменьшенная осадка, навигационное оборудование, высокотехнологичные картографические данные, навигационная безопасность, навигационно-гидрографические условия, гидрометеорологические условия.

Для цитирования:

Каретников В. В. Повышение навигационной безопасности плавания по затруднительным для судоходства участкам внутренних водных путей при использовании 3D электронных навигационных карт / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 7–20. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-7-20. — EDN EUJNV.

Введение (Introduction)

Затруднительными для судоходства принято считать такие участки внутренних водных путей (ВВП), которые представляют сложности для проводки судов в течение всей навигации, в том числе в период ее продления, вызванного изменчивостью гидрологического режима. Вопрос поддержания гарантированных глубин может решаться с использованием различных методов, таких, например, как дноуглубление, изменение режимов попусков воды с гидроэлектростанций, изменение расстановки знаков берегового и плавучего навигационного оборудования [1]–[3], использование высокотехнологичных картографических данных [4], [5]. Судоводители являются первыми, кто сталкивается с необходимостью обеспечения безопасности судоходства, они предпринимают повышенные меры предосторожности для проводки судов по таким участкам. Несмотря на наличие существующих методик расчета безопасной скорости судна и параметров его движения с учетом влияния внешних факторов [6], [7] среди основных эффективных мер следует отметить следование судна с уменьшенной осадкой и на минимальной скорости для снижения влияния мелководья.

В районах ВВП со сложными навигационно-гидрографическими и гидрометеорологическими условиями высокоэффективным современным техническим средством судовождения является система отображения электронных навигационных карт и информации (СОЭНКИ). Среди основных качественных преимуществ использования СОЭНКИ в судовождении следует выделить интеграцию данных о движении судна от большого количества датчиков, как внешних, таких как ГНСС, так и автономно работающих на судне, таких как гирокомпас, лаг, эхолот, а также автоматизацию информации, получаемой на основании математической обработки навигационных измерений, и адаптивность работы с навигационно-гидрографической и гидрометеорологической информацией. Несмотря на значительные преимущества работы с СОЭНКИ по сравнению с работой с информацией на бумажных носителях минимальные временные рамки для анализа и принятия решения о выполнении маневра судоводителем, а также объективная сложность установленных процедур работы необходимо отметить следующие недостатки:

- низкая пространственно-временная дискретность некоторых видов навигационно-гидрографической и гидрометеорологической информации;
- перегруженность карты при отображении всех слоев нагрузки карты или высокая плотность отображения отдельных категорий объектов, и, как следствие, сложность чтения карты и, соответственно, визуального ориентирования по карте;

– задержки при необходимости получения оперативной навигационной информации, требующей следования многоступенчатым алгоритмам для задания соответствующих параметров настроек.

Повысить осведомленность судоводителя об условиях плавания на затруднительных для судоходства участках можно за счет работы СОЭНКИ в режиме отображения 3D электронных навигационных карт (ЭНК).

Целью исследования является анализ применения 3D электронных навигационных карт ЭНК для повышения навигационной безопасности плавания по затруднительным для судоходства участкам внутренних водных путей. Важными задачами являются: рассмотрение возможности учета влияния эффектов мелководья при низких уровнях воды по 3D ЭНК, рассмотрение новых методов использования навигационного оборудования применительно к затруднительным для судоходства участкам ВВП, оценка функциональных особенностей 3D ЭНК применительно к специфике судовождения по ВВП, оценка фактических маневренных возможностей судна 3D ЭНК.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Влияние эффектов мелководья при низких уровнях воды. Влияние мелководья проявляется в гидродинамическом взаимодействии не только между корпусом судна и кромками судового хода, но и элементами пространственных навигационных опасностей, а также подводным рельефом. Управляя судном в таких условиях, судоводитель контролирует особенности движения судна «рывками». На прямолинейных участках особенности такого движения проявляются в увеличении амплитуды и периода рысканья, а также возникновении отдельных зарыскиваний судна на углы, превышающие допустимую амплитуду. При прохождении криволинейных участков ощущается влияние мелководья на начальную поворотливость, когда возникают сложности при вхождении судна в поворот, так что при перекладке руля на максимальный угол возрастание угловой скорости происходит медленно. При выходе на прямолинейный участок значительно снижается способность к одерживанию, когда происходит резкое зарыскивание судна.

Продолжительные понижения уровня воды могут наблюдаться также на тех участках, которые за счет навигационно-гидрографических условий (НГУ) и гидрометеорологических условий (ГМУ) плавания считаются затруднительными. Среди характерных сложностей НГУ следует отметить значительную извилистость судового хода, что вызывает сложность применения береговых знаков навигационного оборудования, наличие узкого судового хода в русле значительной ширины, расположение навигационных опасностей сложной формы вблизи кромок судового хода, наличие участков, где гарантированные габариты поддерживаются за счет проведения периодических дноуглубительных работ. Сложность ГМУ определяется действием на одном и том же участке значительных по величине течений, действием неправильных течений, а также значительными колебаниями уровня воды, вызывающими изменение течений как по модулю, так и по направлению.

Участки, на которых проявляется влияние эффектов мелководья при низких уровнях воды, не обязательно относятся к затруднительным, но они могут простираться далеко за пределы участков, затруднительных для судоходства. Таким образом, при снижении уровня воды могут возникать участки значительной протяженности, при проводке по которым суда следуют с предельно-допустимой осадкой и на минимальной скорости. Управление судном в таких условиях оказывает дополнительную нагрузку как на экипаж в целом, так и в особенности на судоводителей, требуя проведения дополнительных мероприятий, направленных на повышение осведомленности судоводителей о фактическом состоянии НГУ и ГМУ.

Особенности навигационного оборудования и методов его использования применительно к затруднительным для судоходства участкам ВВП. Проводка судна по ВВП осуществляется методом визуальной навигации, основанном на определении местоположения и движения судна относительно плавучих и береговых знаков навигационного оборудования. Основной целью оценки местоположения судна является получение не координат места, а местоположения судна в маршрутной системе, т. е. знание бокового отклонения от оси судового хода и дистанции до точки поворота.

Визуальная оценка направлений и дистанций выполняется по прямым линиям, в то время как судовой ход имеет многочисленные криволинейные участки с переменными радиусами и изобатами неправильной формы на прямолинейных участках. Таким образом, судовой ход представляет собой неправильную и поэтому сложную геометрическую фигуру, визуальную моделируемую плавучими и береговыми знаками навигационного оборудования с некоторой достаточной для целей судоходства степенью подобия. Запомнить и удерживать в памяти такую сложную геометрическую фигуру с учетом особенностей не только надводной, но и подводной обстановки является на практике сложно реализуемой задачей.

Система навигационного оборудования ВВП предусматривает использование береговых и плавучих знаков навигационного оборудования. Береговые знаки, как наиболее надежные, создают визуальные поля навигационных параметров, оценивая которые судоводитель может определять местоположение и параметры движения судна относительно границ и направлений судового хода. Плавучие знаки принято считать менее надежными ввиду возможности смещения, однако ориентирование по ним также существенно повышает осведомленность судоводителя о положении навигационных опасностей. Наблюдение за движением судна относительно группы плавучих знаков навигационного оборудования позволяет осуществлять контроль их нахождения на штатных местах, а определение местоположения и параметров движения существенно повышает точность проводки судна. Знаки навигационного оборудования выставляются в соответствии с проверенными схемами таким образом, чтобы в каждый момент времени в поле зрения судоводителя находилось несколько знаков, позволяющих однозначно определять местоположение и направление движения судна относительно направлений и границ судового хода.

Положение судового хода, ввиду сложных гидрологических процессов, может меняться как в течение продолжительных периодов, охватывающих несколько навигаций, так и неоднократно в течение одной навигации [1], [2]. Изменчивость положения судового хода, соответственно, делает необходимым изменять места установки плавучих знаков для сохранения степени подобия между опасными изобатами, ограничивающими судовой ход, и пространством, обозначаемым знаками навигационного оборудования. При таких условиях плавания важным фактором является выбор оптимальной схемы берегового навигационного оборудования, а также мониторинг фактических НГУ и распространение соответствующей информации для обеспечения безопасности судоходства.

При изменении положения судового хода судоводители должны иметь четкое представление о таких изменениях, которые могут проявляться в снижении фактических габаритов судового хода (глубина, ширина, радиус закругления), а также изменении направлений на прямолинейных участках. Таким образом, возникает сложная практическая задача, состоящая в подборе знаков навигационного оборудования, на которые следует ориентироваться в соответствующий период навигации. Решение данной задачи при работе с 3D ЭНК может быть выполнено различными способами в зависимости от степени детализации, необходимой судоводителю, которая обеспечивается способностью 3D ЭНК одновременно освещать надводную и подводную динамическую обстановку, использованием автоматизированных настроек, масштабированием и навигацией по картографическому пространству [8].

Выполняя наблюдение с использованием 3D ЭНК, судоводитель может не только удостовериться в правильном положении самих знаков, но и оценить отдельные особенности ограждения конкретных навигационных опасностей, что является важным для проводки судна по затруднительным для судоходства участкам. 3D ЭНК позволяет не только визуальным образом определять не только положение судового хода применительно к фактическому уровню воды, но и область наибольших глубин в пределах судового хода, а также области опасных глубин в случае снижения уровня воды, когда область опасных глубин применительно к осадке выбранного судна выходит за пределы области, обозначенной кромочными знаками плавучего навигационного оборудования¹.

¹ SRT plc group. Pilotage out of Poole: demonstration video. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vimeo.com/59227199> (дата обращения: 05.12.2024).

Оценка области включает определение ее геометрических размеров, особенностей геометрической конфигурации, местоположения относительно плавучих и береговых ориентиров, а также особенности подводного рельефа в пределах области, выходящей за пределы зоны, обозначенной кромочными знаками плавучего навигационного оборудования (рис. 1). Все это позволяет определить траекторию движения судна так, чтобы навигационные опасности находились на расстоянии, достаточном для оценки местоположения и движения судна и принятия решения о выполнении маневра. При отклонении судна от безопасной траектории судоводитель на основе информации, полученной в процессе визуального наблюдения, имеет возможность оценить особенности влияния внешних факторов и скорректировать движение судна применительно к данным обстоятельствам и условиям плавания. При значительном сближении с кромкой судового хода не рекомендуется резко изменять курс для того, чтобы вывести судно на ось, поскольку при повороте корма будет стремиться сблизиться с кромкой. Поэтому корректировка курса для выхода на ось судового хода выполняется плавно под небольшим углом, оценка таких важных для выполнения этого маневра параметров, как пространство между бортом судна и областью опасных глубин, а также кратчайшее расстояние от отдельных опасностей до оконечности судна выполняются по 3D ЭНК.

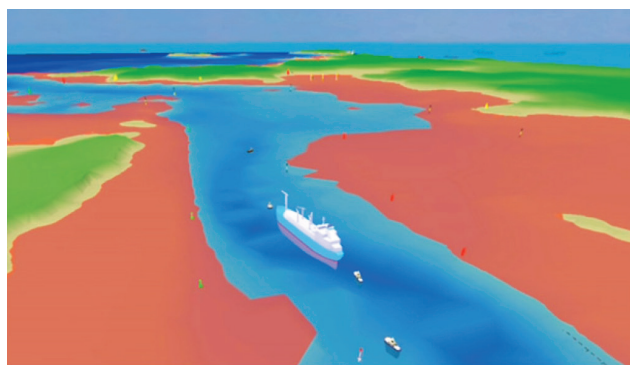


Рис. 1. Пример 3D ЭНК, отображающей область опасных глубин применительно к осадке выбранного судна

При проводке судна по затруднительным для судоходства участкам при лимитирующем влиянии уровня воды важной информацией, получаемой с 3D ЭНК, является положение оконечности судна относительно точки начала или окончания поворота, траектории движения, движение оконечностей судна относительно оси и кромок судового хода (необходимо знать судоводителям в случае чрезмерного уклонения судна или значительного влияния внешних факторов). Для оценки кратчайших дистанций удобно использовать пространственный символ собственного судна, отображаемый в масштабе карты (см. рис. 1), так как он дает возможность выполнять сравнительный анализ дистанций по любому направлению применительно к известным размерам судна [9]. Такое ориентирование обеспечивает возможность выполнения судоводителями заблаговременной и правильной визуальной оценки обстоятельств и условий, в которых находится судно, и принятия решения на маневр.

При проводке судна по ВВП отображение 3D ЭНК в СОЭНКИ позволяет не только уверенно ориентироваться по знакам навигационного оборудования, но и выполнять требования по управлению судном, нарабатывая хорошую судоводительскую практику. При следовании по прямолинейным участкам работа СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК повышает точность следования по створам с использованием наиболее надежного типа навигационного оборудования. При уклонении судна от линии створа дополняют оценку положения судна по плавучим и береговым знакам навигационного оборудования, отображают навигационную информацию для осуществления пердикции управления рулем так, чтобы не допустить значительной амплитуды рыскания и обеспечить точность оценки местоположения судна. При выполнении поворотов в процессе подхода к точке поворота повышают точность удержания курса судна так,

чтобы не допустить как значительного бокового отклонения в сторону поворота, так и зарыскивания в сторону, противоположную повороту. Это обеспечит плавный переход со створа на створ с учетом управляемости судна применительно к преобладающим обстоятельствам и условиям плавания, позволит регулировать скорость судна и работу движителями так, чтобы обеспечить его хорошую управляемость, особенно при переходах со створа на створ.

В процессе выработки 3D ЭНК новых видов навигационной информации делают все необходимое для того, чтобы охарактеризовать системы, способные отображать карты, поддерживающие принятие решений по управлению и маневрированию судном, что может быть полезно как для проводки по ВВП в общем, так и в особенности для проводки по участкам, затруднительным для судоходства [10].

Функциональные особенности 3D ЭНК применительно к специфике судовождения по ВВП. Использование 3D ЭНК в судовождении позволяет изменить учет фактора масштаба карты. При работе со стандартными ЭНК большое внимание уделяется проверке отображения карты в оригинальном масштабе и подстройке масштаба под цели решаемых судоводителем задач. При недомасштабировании, т. е. отображении карты в масштабе, меньшем оригинального, возникает перегруз информацией, когда высокая концентрация картографической информации особенно отличительных глубин делает карту нечитаемой. Задание оригинального масштаба карты не всегда позволяет устранить этот недостаток, вызывая необходимость управления нагрузкой карты за счет отключения отображения слоев картографической информации или отдельных классов объектов. Для более детальной оценки картографической информации возникает необходимость отображения карты в масштабе, большем оригинального. При этом возникает эффект перемасштабирования карты, проявляющийся в отсутствии увеличения количества отображаемой картографической информации ввиду достижения предела точности.

При использовании 3D ЭНК для целей судовождения отсутствует необходимость отслеживания масштаба отображения карты ввиду высокого качества исходных картографических данных. Автоматическая генерализация данных о глубинах при их высокой плотности достигается за счет градиентной наполняемости изображения, когда при просмотре карты с точки обзора, расположенной выше уровня воды, области больших и малых глубин визуально различаются за счет тонального градиента, а при просмотре подводной обстановки из точки обзора ниже уровня воды можно наблюдать как глубины, так и элементы подводного рельефа, разграниченные гармоничным градиентным представлением. При этом высокая заметность области опасных глубин (рис. 2) обеспечивается за счет сочетания цветов создающих контрастный градиентный переход².

СОЭНКИ осуществляет контроль безопасности плавания в автоматическом режиме по параметрам, которые могут задаваться судоводителем на определенный период либо применительно к конкретным обстоятельствам и условиям плавания. При работе СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК за счет заданных математических алгоритмов и на основании периодического обновления данных о фактическом уровне воды формируется область опасных глубин применительно к осадке конкретного судна, отображение которой в существенной степени способствует визуальной оценке.

Большая часть интерфейса при работе СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК занимает область просмотра карты, отображающая графическую информацию, оценка которой за счет высокой точности, качества отображения и простоты управления выполняется судоводителем визуально, что очевидно при сравнении с 3D ЭНК, отображающей навигационную обстановку в общем виде (рис. 2, а), а также с областью опасных глубин применительно к осадке конкретного судна (рис. 2, б). Несмотря на это автоматизированные алгоритмы, интегрированные в СОЭНКИ, осуществляют непрерывный контроль проводки судна по маршруту и навигационной безопасности плавания. В дополнение к визуальному мониторингу движения судна как относительно элементов

² SRT plc group. GeoVS Viewer — Hoegh Osaka grounding in Southampton 3-Jan-2015: instant replay in GeoVS Viewer / 3D VTS display based on the AIS data. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vimeo.com/115963050> (дата обращения 05.12.2024).

маршрута, так и навигационных опасностей, предусмотрен периодический контроль отдельных параметров. Для этой цели вырабатываемые численные данные могут отображаться в специальном окне, место отображения которого в интерфейсе программы может изменяться при помощи выполнения простых действий судоводителя, чтобы не затруднять наблюдения за важной картографической информацией и состав отображаемых данных мог подстраиваться под выполнение конкретных задач судоводителя.

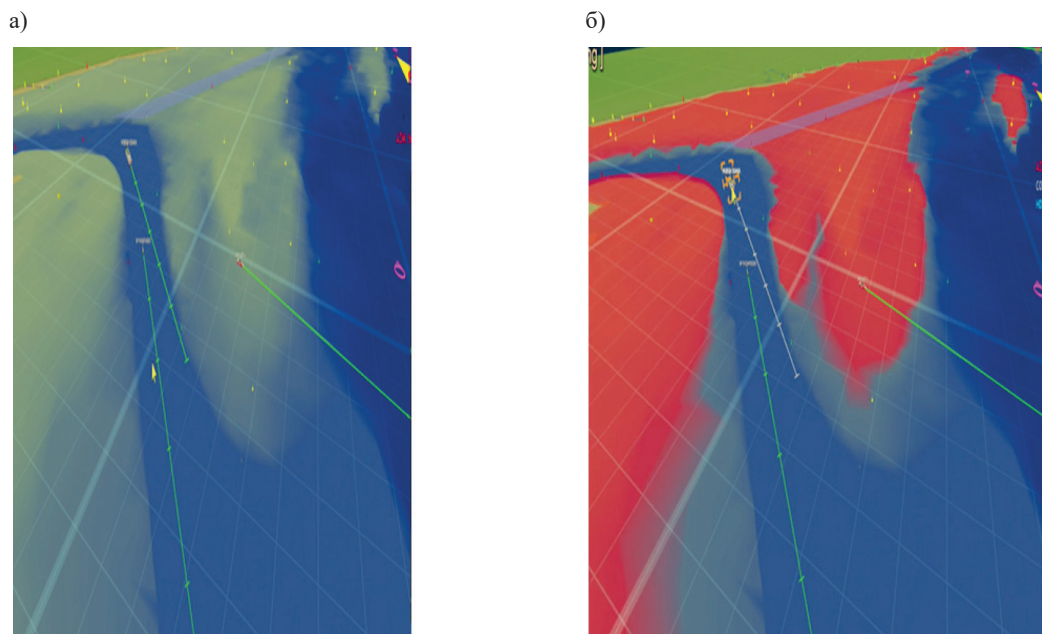


Рис. 2. Область просмотра 3D ЭНК, отображающая навигационную обстановку:
а — в общем виде; б — с областью опасных глубин применительно к осадке конкретного судна

При работе СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК сохраняется возможность визуального отображения элементов контроля следования судна по маршруту и навигационной безопасности. Среди элементов маршрута следует отметить линию пути судна согласно предварительной прокладке, включающей отображение радиусов поворота, линии допустимого отклонения по перпендикуляру к линии пути для прямолинейных и криволинейных участков, путевые точки, точки перекладки руля и начала поворота. Также предусмотрено отображение маршрутных данных в численном виде: расстояние, пеленг и расчетное время следования до ближайшей путевой точки; ожидаемое время прибытия в эту точку; направление и поправку к текущему курсу для выхода в эту точку; текущее направление линии пути и следующее за ним направление согласно предварительной прокладке, а также боковое смещение от линии пути.

Визуальный контроль навигационной обстановки можно выполнять за счет отображения вектора скорости судна в выбранном масштабе времени, векторов скорости носовой и кормовой оконечности, маневровой полосы, занимаемой судном, зоны навигационной безопасности, рассчитываемой в соответствии со строгими математическими алгоритмами и по заданным судоводителем параметрам. Для визуального контроля движения судна по намеченному пути предусмотрена функция визуализации на карте границ допустимого бокового отклонения по перпендикуляру к линии пути. В случае отклонения от линии пути сверх заданного предела, а также при подходе к точке поворота используется сигнализация для того, чтобы судоводитель мог заблаговременно подготовиться к маневрированию.

Отличительной особенностью работы СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК является отображение области опасных глубин, что значительно сокращает количество необходимых настроек, так как при этом отпадает необходимость задавать значения безопасной глубины и изобаты. Судоводитель может воспользоваться функцией для определения на карте областей опасных

глубин (областей с глубиной, меньшей или равной глубине безопасности судна). Приближение судна, согласно карте, к области опасных глубин может контролироваться визуально, но при достижении параметрами безопасности значений менее заданных СОЭНКИ выдаст звуковое предупреждение, сопровождаемое визуальной индикацией, отображаемое в отдельном окне в области просмотра карты. Для независимого от обновления данных об уровне воды контроля запаса воды под днищем СОЭНКИ сопрягается с эхолотом, что позволяет выводить информацию о глубинах на экран в виде кривой рельефа дна. Информация эхолота сохраняется системой и может быть воспроизведена при проигрывании навигационной ситуации в записи.

Судоводитель на основании успешного опыта выполнения проводок судна имеет в памяти визуальные образы положения корпуса судна, видимого с ходового мостика в ключевые моменты проводки, т. е. перед подходом к точке начала крутого поворота или одерживании при выходе на новый прямолинейный участок фиксирует в памяти положение судна относительно ориентиров при следовании в условиях сильных свальных течений, положение судна относительно плавучих навигационных знаков при прохождении мест разделения судового хода, при заходе на участок, имеющий меньшие габариты с участка, имеющего большие габариты. При получении информации, основанной на визуальном наблюдении за движением судна, судоводитель анализирует ее в соответствии с имеющимися знаниями, интегрируя в свой опыт. Информация при этом может быть недостаточно точной ввиду того, что движение судна подвержено влиянию большого количества внешних факторов, действующих одновременно. При этом оценить влияние каждого из них не представляется возможным, так что такую информацию можно охарактеризовать как *неопределенную и неоднозначную*.

Визуальные образы, сформированные при работе с 3D ЭНК, освещающих одновременно надводную и подводную обстановку, помогают судоводителю контролировать проводку судна по лимитирующим судоходство участкам как в общем, так и при прохождении отдельных участков, требующих повышенного внимания. По мере запоминания визуальной информации в памяти судоводителя формируется спектр зрительных образов положения корпуса судна в ключевые моменты проводки, наблюдения и в дальнейшей перспективе.

Оценка фактических маневренных возможностей судна. Оценка навигационной безопасности проводки судна может выполняться априорно на основе существующих методик, результатами использования которых являются численные значения таких параметров движения судна, как безопасная скорость, максимальные углы суммарного дрейфа от ветра и течения, а также ширина маневровой полосы, занимаемой судном при движении. Такие расчеты могут быть выполнены как для типовых случаев движения судна, так и для нестандартных. Проведение численных расчетов дает возможность получить обоснованные ограничения, соблюдение которых позволит обеспечить высокий уровень навигационной безопасности плавания. Таким образом, при проводке судна в расчетных условиях такая проводка практически всегда окажется успешной. Численные расчеты позволяют оценивать безопасность проводки в условиях, когда судоводитель управляет судном при следовании по известному безопасному пути, не затрачивая времени на оценку внешних факторов.

При условии большого опыта проводки по некоторым участкам при наличии различных внешних воздействий, обстоятельств и условий плавания, не отличающихся от расчетных, судоводитель может управлять движительно-рулевым комплексом, практически не затрачивая времени на анализ внешних условий и достаточность действий, т. е. большинство решений и действий выполняются как бы механически. Это означает, что вне зависимости от особенностей использования средств управления судном оно может следовать по маршруту безопасно, при этом работа средств управления судном позволит обеспечить его движение с расчетными параметрами и осуществить данную проводку. Таким образом, оцениваемыми параметрами являются кинематические параметры движения судна без учета конкретных сил, обуславливающих параметры движения.

В условиях плавания, характерных для затруднительных для судоходства участков, судоводителю необходимо затратить время на оценку воздействия внешних факторов, оценить параметры движения, которые необходимо иметь судну для движения по безопасной траектории. Важным является оценка движения судна, а также факторы, обуславливающие такое движение не в абсолютной, а некой относительной системе. Так, при оценке прохождения судна вблизи навигационной опасности наибольшее значение имеет не знание поперечных скоростей движения оконечностей судна, а скорости отклонения судна от безопасной линии пути или скорость сближения с опасной изобатой и тенденции изменения этих параметров.

При выполнении поворота следует выполнять оценку достаточности величины перекладки руля, ориентируясь не только на некое эталонное значение угловой скорости, но и учитывая влияние внешних факторов в момент начала поворота, а также прогностическую оценку их изменения в процессе прохождения поворота. Следовательно, выбор конкретных приемов и способов управления судном может иметь определяющее значение в процессе обеспечения безопасности проводки судна, в особенности при следовании на минимальной скорости в условиях снижения гарантированных габаритов судового хода и в условиях неправильных течений, т. е. при сложных условиях плавания, характерных для затруднительных для судоходства участков.

В процессе принятия решений по управлению судном судоводитель основывается на оперативной навигационной информации, полученной на базе визуального наблюдения за движением судна и оценкой причин, вызывающих такое движение. Большой объем работы судоводителя при проводке судна по затруднительным для судоходства участкам выполняется для выработки оперативных решений по управлению судном. При этом не всегда остается время для их детального анализа, включая эффективность способа выполнения маневров либо эффективность отдельных действий по управлению движительно-рулевым комплексом (ДРК). Управление ДРК по некоторому известному алгоритму, ввиду воздействия внешних факторов, не приводит к движению судна по единственной безопасной траектории, поскольку таких траекторий должно быть несколько и каждая из них будет иметь особенности, обусловленные изменчивостью геометрии области опасных глубин в зависимости от фактического уровня воды. Таким образом, при проводке судна методом визуальной навигации возникает задача дополнения оценки ситуации информацией, позволяющей судоводителю оценивать влияние на движение судна сил, создаваемых органами управления, и сил от воздействия внешних факторов, одновременно выполняя действия по коррекции его движения.

Архитектура оснащения ходовых мостиков современных судов электроникой предполагает наличие многофункциональных дисплеев (рис. 3), предназначенных для отображения различных видов информации, важной для судоводителя в ходе проводки судна³. Особенности работы средств управления судном могут транслироваться на многофункциональных дисплеях отображения работы средств управления, воздействия внешних факторов и параметров движения судна. Данные дисплеи имеют унифицированный интерфейс и отображают информацию упорядоченным образом, так что позволяют оценить движение судна не в абсолютном значении, а применительно к работе органов управления. При необходимости отображения данных в ином виде, обусловленном особенностями решаемых задач, структура отображения и состав информации могут быть сконфигурированы соответствующим образом. Функция конфигурирования отображения информации с учетом особых требований позволяет решить вопрос снабжения судоводителя всей необходимой навигационной информацией в зависимости от выполняемого маневра и обстоятельств плавания, а главное представить всю совокупность необходимых данных в удобном для восприятия и анализа виде.

Действия по управлению судном, предпринимаемые судоводителем, всегда имеют упреждающий характер и потому не полностью определяются реальным воздействием, оказываемым

³ OSI Marine Systems. Naval Operations Mobile Augmented Display [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://osimaritime.com/solutions/tdns/> (дата обращения 05.12.2024).

на судно со стороны внешней среды, т. е. во многом определяются субъективным представлением судоводителя о таком воздействии. Работа только с 3D ЭНК не позволяет оценивать действия внешних факторов, таких как сила ветра, силы гидродинамического взаимодействия с мелководьем, а также силы и моменты от криволинейного течения напрямую. Для судоводителя важное значение имеет оценка возможностей средств управления судном в зависимости от степени воздействия на него внешних факторов, достоверность которой повышается при учете информации от multifunctional дисплеев.

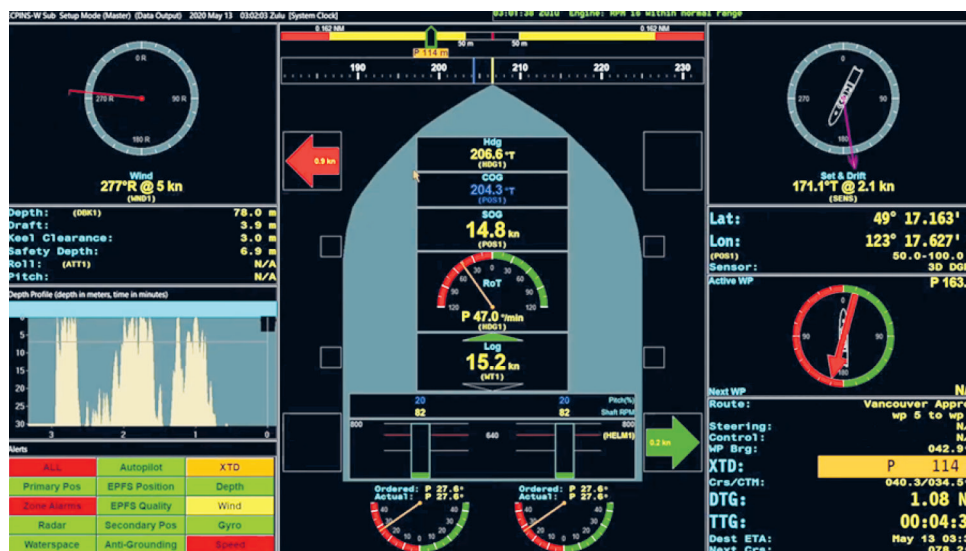


Рис. 3. Вид multifunctional дисплея отображения информации

Высокая интенсивность работы судоводителя в процессе проводки по затруднительным для судоходства участкам не позволяет обращать внимание на незначительные детали, связанные с управлением судном или воздействием внешних факторов, которые могут быть значимыми и, соответственно, использоваться для проводки судна в дальнейшем. Совместное использование СОЭНК в режиме отображения 3D ЭНК и информации от multifunctional дисплеев позволяет расширить понятие *хорошей практики управления судном* за счет апостериорного анализа результатов проводки. Детальный анализ управление судном позволяет установить причинно-следственные связи между воздействием внешних факторов, работой средств управления судном и его движением. Полученные таким образом новые знания интегрируются в систему знаний судоводителя, способствуя дальнейшему развитию его умений и навыков по управлению судном.

Обсуждение (Discussion)

Движение судна представляет собой некую интегрированную величину, состоящую из продольного, поперечного и вращательного движений, суть и понимание которых не представляют трудностей. Однако правильное управление движением судна непосредственно при проводке по затруднительным для судоходства участкам является сложной задачей, решение которой находится в зоне ответственности судоводителя. Движение судна в условиях, характерных для затруднительных для судоходства участков, осуществляется в условиях значительной изменчивости и нестабильности влияния внешних навигационно-гидрографических и гидрометеорологических факторов, когда при традиционных способах представления картографической информации практически не представляется возможным выделить области с резко меняющимися глубинами от значительных, кратных трем осадкам судна, до минимальных, соответствующих значению статической осадки судна и минимальных запасов, позволяющих осуществлять движение судна, визуальную оценку угла поворота траектории, что особенно важно при значительных и частых

изменениях курса при проходе крутых колен и извилистых участков, изменений гарантированной ширины и радиусов закругления судового хода от минимально необходимых до существенно превышающих гарантированные.

Проводка судна по затруднительным для судоходства участкам характеризуется плохим вхождением судна в циркуляцию, нестабильным движением при значительных изменениях курса при переходе с одного прямолинейного участка на другой, плохой способностью к одерживанию, вызванной влиянием ветра и криволинейного течения, рыскливостью при следовании по прямолинейным участкам, что обуславливает необходимость поиска новых методов обеспечения навигационной безопасности плавания. При использовании 3D ЭНК, являющегося в процессе управления судном при проводке по затруднительным для судоходства участкам новым способом, перед судоводителем возникает ряд сложных задач, для правильного решения которых необходимо переосмысление методов работы в процессе несения ходовой вахты.

Среди явных преимуществ использования 3D ЭНК следует отметить снижение количества ручных настроек, применение которых необходимо для компенсации явных недостатков стандартных электронных карт. Так, судоводитель освобождается от необходимости рассчитывать и периодически вводить в систему значения опасной глубины и безопасной изобаты. Снижение количества настроек в совокупности с новым качеством отображения надводной и подводной навигационной обстановки позволяют повысить продуктивность наблюдения, т. е. способность вести наблюдение за некоторой совокупностью знаков берегового и плавучего навигационного оборудования, что является важным для проводки судна по лимитирующим судоходство участкам. Применение автоматизированных функций построения области опасных глубин позволяет настраивать и в дальнейшем автоматически оперативно перестраивать такое отображение, модифицируя таким образом приемы и методы управления судном, основанные на общих закономерностях движения судна применительно к фактическим условиям плавания, а также отдельным их особенностям, характерным для конкретных затруднительных для судоходства участков.

Совместный анализ всех видов информации, доступных как в численном, так и в графическом виде в 3D ЭНК, таких как навигационно-гидрографическая, гидрометеорологическая и численные параметры движения судна совместно с особенностями работы средств управления судном, составляют исчерпывающую информацию, полностью характеризующую движение судна и его управление.

Заключение (Conclusion)

В работе дана оценка особенностей влияния НГУ и ГМУ на затруднительных для судоходства участках ВВП, которые могут оказывать значительное влияние на навигационную безопасность судов следующих под проводкой опытных судоводителей. Основным фактором, лимитирующим судоходство по участкам ВВП, является уровень воды, снижение которого приводит к распространению сложных навигационных условий на участках значительной протяженности, которые при обычных условиях плавания не относятся к затруднительным. Поэтому для проводки судна по таким участкам отсутствуют конкретные рекомендации судоводителям в отношении действий для обеспечения навигационной безопасности плавания.

Работа СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК только за счет управления масштабом, положением точки обзора как относительно пространственного символа собственного судна, так и относительно положения знаков навигационного оборудования позволяет настраивать, корректировать, видоизменять отображение обстановки в некоторой области вблизи судна, и, таким образом, оказывать влияние на визуальное восприятие судоводителем оперативной обстановки. При наличии достаточного опыта работы с системой для получения оперативной навигационной информации сводится к минимуму необходимость использования дополнительных программных инструментов для выполнения измерений или применение сложных настроек в соответствии с многоступенчатыми алгоритмами. Применение СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК

обеспечивает переход от принятия решений на маневр судна на основании обобщенных методик, использование которых не позволяет учесть весь спектр факторов, влияющих на судно, к принятию решений на основании интегрированной виртуальной модели реальной действительности.

Функция отображения 3D ЭНК в СОЭНКИ делает их многофункциональными и адаптируемыми с картографическими системами, обеспечивающими судоводителя всей необходимой информацией для оценки навигационной обстановки и принятия как долгосрочных, так и оперативных решений по управлению судном на затруднительных для судоходства участках. 3D ЭНК позволяют выполнять упреждающую оценку навигационной безопасности плавания как в обычных НГУ и ГМУ, так и при значительно сложных и редко встречающихся их сочетаниях, учитывая особенности работы средств управления судном, поскольку основной акцент в обеспечении навигационной безопасности плавания в таких условиях сделан на оперативной работе средств управления судном.

Работу СОЭНКИ в режиме отображения 3D ЭНК, несмотря на новизну, следует охарактеризовать как высокопродуктивную, ввиду существенного увеличения возможностей по обеспечению судоводителя новой навигационной информацией для проводки судна методом визуальной навигации, что особенно важно для лимитирующих участков судоходства. Совместная оценка навигационной информации от 3D ЭНК и многофункциональных дисплеев позволяет судоводителю оценивать влияние на движение судна сил, создаваемых органами управления, сил от воздействия внешних факторов, одновременно оценивая эффективность действий по корректированию движения судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладков Г. Л.* Современное состояние и развитие внутренних водных путей России / Г. Л. Гладков // Эрозионные и русловые процессы: сб. трудов. — Том выпуск 6 / Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ имени М. В. Ломоносова. — М.: Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2015. — С. 255–277. — EDN WJFUXF.
2. *Колосов М. А.* Варианты технических решений по поддержанию глубин в судоходных шлюзах Городецкого гидроузла / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, С. В. Егоров, Д. А. Пасынков // Речной транспорт (XXI век). — 2024. — № 1(109). — С. 18–22. — EDN OWLTLE.
3. *Родионов А. А.* Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе / А. А. Родионов, В. А. Румянцев, М. П. Федоров [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2022. — Т. 15. — № 4. — С. 109–131. DOI: 10.59887/fpg/abfh-m2n7-9mn6. — EDN LPDZD.
4. *Каретников В. В.* Опыт применения современных инфокоммуникационных технологий для повышения точности речных электронных навигационных карт / В. В. Каретников, Д. Ф. Миляков, С. В. Рудых // Речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5(76). — С. 35–37. — EDN VDAEMT.
5. *Каретников В. В.* Использование мобильных обстановочных комплексов с применением технологий ГЛОНАСС/GPS для обновления государственных электронных навигационных карт ВВП РФ / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев, В. И. Романова // Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 4(54). — С. 53–55. — EDN VGSUHR.
6. *Клементьев А. Н.* Исследование явления динамической просадки речных судов при движении на течении / А. Н. Клементьев, М. Ю. Чурин // Речной транспорт (XXI век). — 2017. — № 2(82). — С. 48–51. — EDN ZHBEIJ.
7. *Duarte H.* Review of practical aspects of shallow water and bank effects / H. Duarte, D. E. Lopez, M. R. Martins, M. Lutzhoft, P. S. Pereira, J. Lloyd // International Journal of Maritime Engineering. — 2016. — Is. 158. — Pp. 177–186.
8. *Каретников В. В.* Применение 3D электронных навигационных карт при авариях, связанных с посадкой на мель, и для их предотвращения в стесненных условиях плавания / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев, О. И. Мокрозуб // Морская радиоэлектроника. — 2020. — № 2(72). — С. 22–28. — EDN APKKAR.

9. Каретников В. В. Лимитирующие гидрометеорологические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для проводки судов «река — море» плавания по внутренним водным путям / В. В. Каретников, Ю. Н. Андрюшечкин, А. А. Прохоренков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464. — EDN CXFIKA.

10. Прохоренков А. А. Повышение эффективности решения задач управления судном в стесненных условиях при использовании морских 3-D электронных навигационных карт / А. А. Прохоренков // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2019. — № 4. — С. 76–85. — EDN NXGLSS.

REFERENCES

1. Gladkov, G. L. «Sovremennoe sostoyanie i razvitie vnutrennikh vodnykh putey Rossii.» *Eroziionnye i ruslovy protsessy: Sbornik trudov* Moskva: Geograficheskiy fakul'tet Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. M. V. Lomonosova, 2015: 255–277.

2. Kolosov, M. A., K. P. Morgunov, S. V. Egorov and D. A. Pasyukov “Variants of technical solutions for maintaining depths in navigable locks of Gorodetsky hydrocomplex.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 1(109). (2024): 18–22.

3. Rodionov, A. A., V. A. Rumyantsev, M. P. Fedorov, et al. “Varianty resheniya problem sudokhodstva na limitirovannom uchastke reki Volgi ot Gorodetskogo gidrouzla do Nizhnego Novgoroda, v tom chisle s uchetom otsenki vliyaniya na sanitarno-epidemiologicheskuyu i ekologicheskuyu situatsiyu v regione.” *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* 15.4 (2022): 109–131. DOI: 10.59887/fpg/abfh-m2n7-9mn6.

4. Karetnikov, V. V., D. F. Milyakov and S. V. Rudykh “Opyt primeneniya sovremennykh infokommunikatsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya tochnosti rechnykh elektronnykh navigatsionnykh kart.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 5(76). (2015): 35–37.

5. Karetnikov, V. V., V. A. Bekryashev and V. I. Romanova “An application of the mobile situational complexes with the help of GLONASS/GPS technology for updating the state electronic navigation charts of the inland waterways (IW).” *Morskaya radioelektronika* 4(54). (2015): 53–55.

6. Klement'ev, A. N. and M. Yu. Churin “Issledovanie yavleniya dinamicheskoy prosadki rechnykh sudov pri dvizhenii na techenii.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 2(82). (2017): 48–51.

7. Duarte, H., D., E. Lopez, MR. Martins, M. Lutzhoft, P. S. Pereira and J. Lloyd “Review of practical aspects of shallow water and bank effects.” *International Journal of Maritime Engineering* 158. (2016): 177–186.

8. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, Yu. G. Andreev and O. I. Mokrozub “Application of 3D electronic navigation charts for prevention and in case of groundings in restricted waters.” *Morskaya radioelektronika* 2(72). (2020): 22–28.

9. Karetnikov, V. V., Yu. N. Andryushechkin and A. A. Prokhorenkov “Limiting hydrometeorological factors when using 3D electronic navigational charts for pilotage of river-sea-going vessels on inland waterways.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.4 (2021): 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464.

10. Prokhorenkov, A. A. “Improving the efficiency of solving the tasks of shiphhandling in narrows when using marine 3-D electronic navigation charts.” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* 4. (2019): 76–85.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru
Ефимов Константин Иванович — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kiefimov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru
Efimov, Konstantin I. — PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kiefimov@gmail.com

Прохоренков Андрей Александрович —
кандидат технических наук, доц.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: a.prokhorenkov@mail.ru

Prokhorenkov, Andrei A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: a.prokhorenkov@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.
Received: Dec. 19, 2024.*

USING LIQUEFACTION AND CONSOLIDATION PROCESSES TO CONTROL SOIL PROPERTIES

K. P. Morgunov, M. A. Kolosov, P. P. Chinakov

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

An analysis of the impact of water from streams and reservoirs on the banks of reservoirs and soil massifs of artificial embankments – dams, dikes, and embankments – was carried out. It has been determined that the main factor influencing the condition of banks and embankment soils is their saturation with water and the formation of filtration flows in soil massifs, sometimes with quite significant gradients. The main processes that determine the state of structures are the processes of loosening and liquefaction of soils and their subsequent consolidation. The processing of reservoir banks continues for periods of 5 to 10 years, while bank stabilization takes much longer – up to 30 years, and in some conditions does not stop at all. The processing of banks causes pollution of water bodies with both mineral particles and wood pulp. The nature of the locations of the reservoirs of power hydroelectric power plants and the measures taken to prepare the reservoir beds for flooding have led to the presence of a significant amount of floating wood in the reservoirs. It is noted that changes in soil properties, in particular, their bearing capacity, when saturated with water lead to non-design settlements of structures that are erected on such soils. Several examples of compaction of foundations of hydraulic structures by the flooding method are considered. Laboratory studies of the deformation of a soil embankment during the filling of a reservoir of the upper pool are described, the natural object for which was the earth dam of the Beloporozhskaya small hydroelectric power station. Filling of the upper pool of the laboratory installation led to deformation of the embankment and its breakthrough. As a result, the embankment structure settled, its soil compacted, and the backfill density increased from 0.801 g/cm³ to 1.830 g/cm³. It has been established that when an embankment is flooded, soil particles experience the action of several forces: their own weight, forces of mutual friction, buoyant Archimedes forces, and forces of hydrodynamic pressure. Under the action of the resultant of these forces, soil particles are rearranged into a denser packing, which increases the strength of the soil and its ability to withstand loads. It is recommended to use the flooding method to improve the properties of soils of embankments and foundations of hydraulic structures.

Keywords: coastal processes, coastal flooding, earth embankments, soil liquefaction, consolidation, filtration flows, biefs of hydraulic structure.

For citation:

Morgunov, Konstantin P., M. A. Kolosov and P. P. Chinakov “Using liquefaction and consolidation processes to control soil properties.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 21–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-21-32.

УДК: 624.131.431.1; 626.17; 627.43

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗЖИЖЕНИЯ И КОНСОЛИДАЦИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

К. П. Моргунов, М. А. Колосов, П. П. Чинаков

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

Выполнен анализ воздействия водотоков и водоемов на берега водохранилищ и грунтовые массивы искусственных насыпных сооружений: плотин, дамб и насыпей. Определено, что основным фактором, влияющим на состояние берегов и грунтов насыпей, является насыщение их водой и формирование в массивах грунта фильтрационных потоков, порой с достаточно значительными градиентами, а основными процессами, определяющими состояние сооружений, служат процессы разуплотнения и разжижения грунтов и их последующей консолидации. Отмечается, что переработка берегов водохранилищ продолжается в течение 5–10 лет, стабилизация берега происходит гораздо дольше — до 30 лет, а в некоторых условиях вообще не прекращается. Подчеркивается, что переработка берегов вызывает загрязнение воды

водоемов как минеральными частицами, так и древесной массой, а характер местностей расположения водохранилищ энергетических гидроузлов и мероприятий по подготовке лож водохранилищ к затоплению обуславливает наличие значительного количества плавающей в них древесины. Отмечается, что изменение свойств грунтов (в частности, их несущей способности) при насыщении водой приводит к непроектным осадкам сооружений, возводимым на таких грунтах. Рассмотрено несколько примеров уплотнения оснований гидротехнических сооружений методом подтопления. Описаны лабораторные исследования деформации грунтовой насыпи при заполнении водохранилища верхнего бьефа, натурным объектом которых явилась грунтовая плотина Белопорожской МГЭС. Обращается внимание на то, что заполнение верхнего бьефа лабораторной установки привело к деформации насыпи и ее прорыву. В итоге осадок конструкции насыпи произошло уплотнение ее грунта и увеличение плотности засыпки с $0,801 \text{ г/см}^3$ до $1,830 \text{ г/см}^3$. Констатируется, что при подтоплении насыпи частицы грунта испытывают действие нескольких сил: собственного веса, сил взаимного трения, взвешивающих архимедовых сил и сил гидродинамического давления. Под действием равнодействующих этих сил происходит переукладка частиц грунта в более плотную упаковку, при которой повышается прочность грунта и его способность к восприятию нагрузок. Рекомендовано использовать метод подтопления для повышения свойств грунтов насыпей и оснований гидросооружений.

Ключевые слова: береговые процессы, подтапливание берегов, грунтовые насыпи, разжижение грунта, консолидация, фильтрационные потоки, бьефы гидроузлов.

Для цитирования:

К. П. Моргунов. Использование процессов разжижения и консолидации для регулирования свойств грунтов / К. П. Моргунов, М. А. Колосов, П. П. Чинаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 21–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-21-32. — EDN GCXADV.

Введение (Introduction)

В процессе строительства и последующей эксплуатации гидротехнических объектов происходит подтапливание, затапливание и размыв грунтовых сооружений: насыпей, дамб, берегов водохранилищ, а также откосов каналов и бьефов гидроузлов.

Берегом принято называть территорию, расположенную выше среднего меженного уровня воды в реке или выше нормального подпорного уровня воды в водохранилище, рельеф которой создан преимущественно (или подвергается коренному преобразованию) под влиянием водотока или водоема. Берега развиваются в неразрывной связи с их продолжением — подводным береговым склоном, представляющим собой прибрежную мелководную часть дна, где размещаются такие характерные формы рельефа, как прибрежная отмель и береговые аккумулятивные формы. Берег и подводный береговой склон образуют береговую зону.

К естественным береговым процессам относятся процессы, так или иначе участвующие в формировании берегов, которые представляют собой различные виды взаимодействия литосферы с гидросферой и атмосферой и характеризуются многообразием и взаимосвязанностью развития. К таким процессам относятся размывы берегов под действием ветровых и судовых волн, русловая и ветровая эрозии, процессы движения пород на склонах под влиянием гравитации, криогенные процессы, различные по генезису аккумулятивные процессы и др. При этом следует учитывать, что берега бьефов и водохранилищ зачастую сложены аллювиальными грунтами — мелкозернистыми и легко размываемыми. Кроме того, искусственные сооружения, возводимые в руслах или на берегах водных объектов, также подвержены воздействию водных потоков. Так, грунтовые насыпи широко применяются в дорожном и мелиоративном строительстве, плотины и дамбы — при формировании напорного фронта в энергетических и судоходных гидроузлах. В такие насыпные сооружения укладываются в основном песчаные материалы, каменная крошка и дробленая горная масса, состоящая из частиц различной крупности.

При заполнении водохранилищ повышается уровень подземных вод, и, следовательно, влажность пород, слагающих берега, увеличивается. В результате меняются физические свойства грунтов. Все это ведет к нарушению равновесия сил, обеспечивающего неподвижность склона. Его неустойчивость увеличивает колебания уровня водохранилища, вызывающие рез-

кие изменения давления грунтовых вод на породы, что приводит к оползням. При взаимодействии с водой в грунтовых массивах как естественных берегов, так и гидротехнических сооружений формируются фильтрационные процессы, сопровождающиеся суффозией, оплыванием и осадками массива, являющиеся, как правило, неравномерными. В грунтах основания и телах искусственных сооружений по окончании их строительства и при насыщении водой происходят процессы консолидации¹. Длительность процессов консолидации грунтов, находящихся в основании гидротехнических сооружений, которая определяется структурой этих грунтов, может быть довольно продолжительной [1], [2].

В статье приведены примеры улучшения прочностных свойств гидротехнических сооружений путем их предварительного затопления. Кроме того, для изучения поведения грунтового массива, из которого сложены гидротехнические сооружения, и изменения его характеристик при насыщении водой были выполнены лабораторные исследования, описанные в настоящей работе.

Задачей исследования является определение характера изменения свойств грунтов оснований и тела гидросооружений при их насыщении водой как в результате природных процессов, так и при специальном затоплении, оценка природы сил и процессов, происходящих при этом в грунтах, а также их влияние на прочностные и фильтрационные свойства конструкций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Разрушение берегов ведет к отступлению береговой линии и формированию нового берегового профиля с более пологим откосом. При этом процесс изменения (разрушения) очертания берегов (абразия) особенно сильно проявляется на участках, где берега сложены лессовыми грунтами. Учет процессов, происходящих в грунтах как естественных береговых формирований водотоков и водоемов, так и грунтовых гидротехнических сооружений, при их насыщении фильтрующимися водами, необходим при разработке правил и условий эксплуатации этих объектов. Более того, порой предварительное искусственное водонасыщение (затопление) таких сооружений позволяет изменять их характеристики в нужном направлении, создавая благоприятные условия для последующей эксплуатации.

Переработка берегов происходит наиболее интенсивно непосредственно после заполнения, в первые годы эксплуатации водохранилищ, а затем постепенно затухает. Период активной переработки занимает обычно 5–10 лет, для стабилизации берега необходим период 20–30 лет [3]. Однако, например, на водохранилищах ГЭС Ангарского каскада, строительство которых было завершено в 1959–1974 гг., до настоящего времени продолжает активно формироваться береговая линия, интенсивно развиваются абразивные процессы, эрозионные и другие негативные геологические явления. Эти процессы не только не затухают, а, наоборот, увеличиваются их размеры и темпы развития.

Размыв берегов водохранилищ гидроузлов оказывает непосредственное влияние на окружающую природную среду. В результате размыва берегов вместе с обвалами грунтов в ложе водохранилищ попадает древесная масса с берегов. Ситуация осложняется тем, что, как показал анализ [3], [4], на стадии подготовки лож водохранилищ в России не было случая проведения лесосводки в полном запланированном объеме, а, например, в ложе водохранилищ Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС работы по лесосводке вообще не проводились. Объем плавающей древесины по Красноярскому водохранилищу составляет 0,104 млн м³, по Саяно-Шушенскому — 1,0 млн м³, по Братскому — 2,2 млн м³, по Усть-Илимскому — 0,9 млн м³ [4]. Несмотря на то, что в процессе очистки водоемов в среднем в год извлекается до 360 тыс. м³ плавающей древесной массы, ее объемы на акваториях водохранилищ не уменьшаются.

Изменение свойств грунтов, в частности, их несущей способности, при насыщении их водой приводит к непроектным осадкам сооружений, возведенных на таких грунтах. Например, известен случай просадки здания Загорской ГАЭС-2 при заполнении водохранилища нижнего бьефа [5]–[7]. Во избежание непроектных осадок насыпи в процессе строительства уплотняют, используя тяжелые

¹ Консолидация грунта — это замедленное уплотнение (повышение плотности) водонасыщенного грунтового слоя во времени, происходящее за счет выжимания воды и сближения грунтовых частиц под воздействием нагрузки.

катки, трамбовку и эффекты вибрации. Однако зачастую для уплотнения насыпей и улучшения их прочностных характеристик наиболее целесообразно проливать такой массив водой.

Результаты (Results)

Лабораторные исследования волнозащитной стенки Красноярского судоподъемника. Исследования изменения характеристик грунта при повышении его водонасыщенности были выполнены в процессе строительства Красноярского судоподъемника². Исследовалось формирование основания под бетонную волнозащитную стенку.

Волнозащитная стенка Красноярского судоподъемника расположена в верхнем бьефе гидроузла и предназначена для защиты верхового судовозного пути от волнения, она также служит основанием для металлических опор, удерживающих контактный провод, обеспечивающий подачу электроэнергии на судовую камеру (рис. 1).



Рис. 1. Волнозащитная стенка верхнего бьефа Красноярского гидроузла
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Стенка железобетонная, разрезная, из монолитных конструкций таврового сечения, состоит из 12 секций, отделенных от верхового опорного устоя поворотного устройства и друг от друга температурными и температурно-осадочными швами.

Основанием волнозащитной стенки служит с первой по седьмую секцию — банкет из уплотненной горной массы; с восьмой по двенадцатую секцию — скальное основание. Общая длина стенки равна 338,91 м; длина стенки на каменном банкете — 204,33 м; длина стенки на скальном основании — 134,58 м; высота стенки переменная (из-за переменных отметок подошвы) — от 7,5 м до 34,0 м. Насыпной банкет из разрыхленного каменного грунта выполнен на высоту 25 м. Стенка устроена на горизонтальной плите, которая опирается на каменную насыпь, уложенную на скальное основание. Материалы для устройства насыпи: камень 30 %, щебень и дресва 70 %³.

Для того, чтобы исключить неравномерные просадки стенки, перед ее возведением был выполнен комплекс мероприятий, а именно: послойная укладка грунта, укатка тяжелыми пневмокатками, а главное — подтопление уложенного грунта. Подтопление было выполнено, когда был завершен полный профиль отсыпки, возведена фундаментная плита и первая очередь волнозащитной стенки (50 % высоты). Подтопление привело к просадке материала на 450–500 мм. Для изучения процессов воздействия взвешивающих сил на грунтовый массив была выполнена серия опытов в лотке с прозрачной стеклянной стенкой (рис. 2).

В процессе проведения опыта осуществлялось подтопление образцов разнородных грунтов с подачей воды снизу вверх. Было установлено, что в разнородных и разнородных грунтах

² Колосов М. А. Лабораторные исследования просадочных свойств крупнообломочных материалов: сб. науч. трудов молодых специалистов. Л., ЛИВТ, 1973. Ч. III. С. 178–188.

³ Колосов М. А. Деформация банкета из крупнообломочного материала в основании волнозащитной стенки судоподъемника Красноярской ГЭС // Труды Гидропроекта. 1974. № 40. С. 199–208.

по мере подъема уровня воды в зоне подтопления идет непрерывный процесс переукладки частиц. При полном водонасыщении придонного слоя этот слой разжижается, и силы трения между частицами резко уменьшаются. Выше полностью разжиженного слоя находится также водонасыщенный слой, в котором под действием веса вышележащих массивов начинается процесс уплотнения — более мелкие частицы укладываются между крупными, в результате чего формируется слой более плотной укладки. Переукладка и уплотнение происходят также и в зоне разжижения [8].

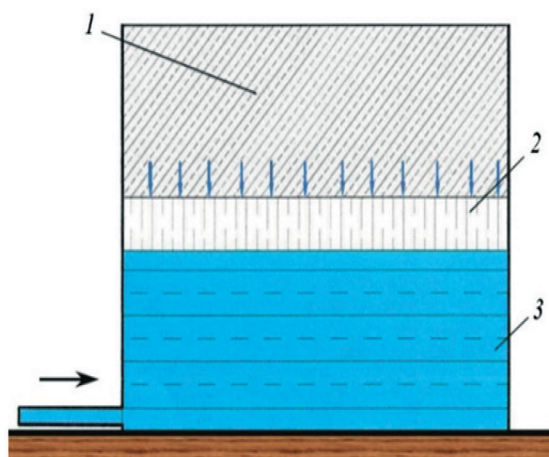


Рис. 2. Схема опыта разжижения грунтов в лотке со стеклянной стенкой:
1 — зона сухого грунта; 2 — зона переукладки частиц грунта под давлением сверху сухого грунта;
3 — зона разжижения грунта

Дальнейший подъем уровня воды приводит к последовательному уплотнению слоев грунта, при этом идет непрерывный процесс «Разжижение + сжатие с формированием более плотной укладки частиц грунта». При строительстве волнозащитной стенки Красноярского судоподъемника после подтопления насыпного основания его деформации стабилизировались, затем было надстроено тело стенки и верхняя плита. Дополнительные деформации при этом составили 50 мм (рис. 3).

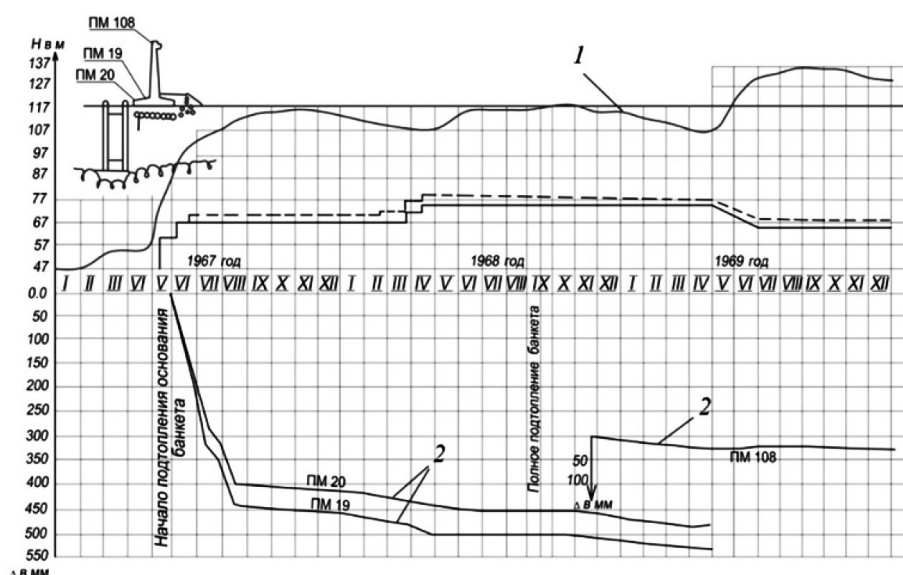


Рис. 3. График деформаций насыпного основания и волнозащитной стенки Красноярского гидроузла:
1 — уровень воды в верхнем бьефе;
2 — отметки поверхностных марок ПМ-19, ПМ-20, ПМ-108

Эти деформации не повлияли на состояние конструкций и напряжения в стенке, поскольку конструкция предусматривала устройство расширенных межсекционных швов шириной 15–50 мм.

Деформации при подтоплении защитной шпору гидроузла АЭС «Руппур». Метод подтопления грунтовой насыпи был использован при строительстве водозаборного узла АЭС «Руппур» (Республика Бангладеш). Строительство атомной электростанции ведет АО «Росатом», а гидротехнические объекты на р. Ганг для АЭС возводит российская компания АО «Оргэнергострой»⁴. Охлаждение элементов АЭС предусмотрено водой из р. Ганг, на которой для этого было устроено водозаборное сооружение (рис. 4).



Рис. 4. Водозаборное сооружение АЭС «Руппур»
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Защитная шпора водозабора представляет собой грунтовую насыпь из мелкофракционного песчаного грунта. Поперечное сечение насыпи устроено из двух ярусов (рис. 5).

Нижний ярус (в пределах от дна до рабочего уровня намывных песков). Укладка грунта выполнялась в воду. Для защиты от размыва песка предусмотрено устройство двух каменных насыпей, напорная грань которых, обращенная к намываемому песчаному материалу, покрыта фильтрующим иглопробивным геотекстилем.

Верхний ярус (в пределах от рабочего уровня до гребня сооружения). Возводился с послойной укладкой песка и уплотнением; толщина слоя 0,4–0,5 м, плотность укладки 1,52–1,59 т/м³, плотность скелета $\rho = 2,66$ г/м³, средняя пористость уложенного грунта $n = 0,4$.

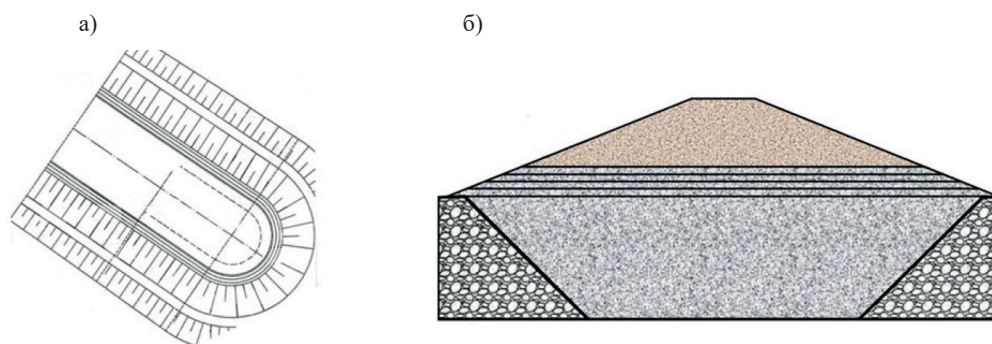


Рис. 5. Защитная дамба гидроузла «Руппур»: а — план; б — поперечный разрез

Для достижения проектной пористости $n = 0,3$ необходимо было уплотнить песчаный грунт. По завершении работ по отсыпке грунта в половодье 2021 г. дамба была подтоплена. Это привело к локальным просадкам гребня и откосов дамбы и повреждению бетонного покрытия (трещины в бетоне).

⁴ <https://ioes.ru/ru/ob-ekty/gidrotekhnicheskie-sooruzheniya>.

Для локализации повреждений в бетонном покрытии рекомендовано было произвести подтопление «сухой» части шпоры посредством принудительной подачи воды на гребень сооружения, что и было выполнено. В результате произошли дальнейшие просадки гребня и откосов дамбы и консолидация ее грунтов. Затем трещины в покрытии дамбы были заделаны. Дальнейших деформаций дамбы на настоящий момент не зафиксировано.

Лабораторные исследования размыва плотины Белопорожской МГЭС. На русловой грунтовой плотине Белопорожской МГЭС-2 (р. Кемь, республика Карелия) в 2020 г. дважды произошёл прорыв грунтовой плотины [9] — рис. 6.

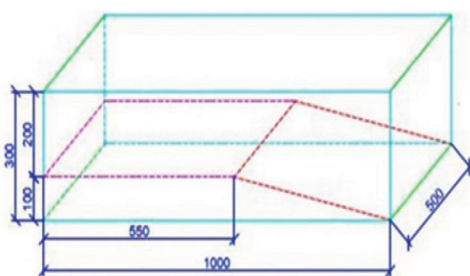


Рис. 6. Прорыв плотины Белопорожской МГЭС-2 24 октября 2020 г.
(Фото заимствовано из открытых источников Интернета)

Причиной этих аварий явился неучет изменения свойств грунта насыпи при его насыщении водой. Устойчивость плотины рассчитывалась с учетом физико-механических характеристик грунта по действующим нормам проектирования. Принятый в проекте коэффициент фильтрации должен был обеспечить фильтрационную прочность и устойчивость сооружения при отсыпке тела плотины из моренных грунтов. Тело плотины было выполнено без противофильтрационных элементов, дренаж тела плотины предусмотрен посредством объемных каменных призм, расположенных в верхнем и нижнем бьефах. Однако коэффициент фильтрации моренных грунтов, включающих мелкие фракции песка и пылеватые частицы, составляет в пределах 0,005–0,0003 м/сут. При таких значениях водоотдача в дренажные системы малоэффективна, что приводит к водонасыщению грунтового тела плотины. Кроме того, водоотдача снижается при некачественном выполнении дренажных призм (засорении посторонними грунтами). Насыщенный водой грунт плотины приобретает свойства «тяжелой» жидкости, происходят процессы разжижения, приводящие к потере устойчивости сооружения.

Для изучения и демонстрации этого процесса в гидротехнической лаборатории ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» были выполнены лабораторные исследования. Лабораторная установка представляла собой лоток с прозрачными стенками — рис. 7.

а)



б)



Рис. 7. Лабораторная установка по изучению подтопления грунта:

а — схема; б — внешний вид

Насыпь формировалась из грунта тела плотины Белопорожского гидроузла: мелко- и среднезернистого песка. Перед засыпкой лабораторным методом определялась исходная плотность грунта, которая составила $1,259 \text{ г/см}^3$. Насыпь формировалась без дополнительного уплотнения грунта, что соответствовало условиям формирования натурной плотины. Геометрические размеры насыпи в лабораторной установке составили: высота $h = 100 \text{ мм}$; ширина по основанию $a = 220 \text{ мм}$; ширина по гребню $b = 500 \text{ мм}$. Объем насыпи, имеющей форму призмы с треугольным основанием, определится в виде

$$V = \frac{1}{2}abh.$$

Зная общий вес насыпанного грунта, можно рассчитать его плотность в засыпке, которая оказалась равной $0,801 \text{ г/см}^3$. Сформированная в лабораторной установке насыпь подвергалась подтоплению со стороны верхнего бьефа с минимальным формированием волны, вода поступала в нижнюю часть установки и медленно поднималась, подтапливая нижнюю часть насыпи.

Подтопление производилось в два этапа. На первом этапе уровень воды перед насыпью подняли до 25 мм . При фильтрации воды через тело насыпи начались оплывание низового откоса и просадка массива грунта. Наблюдался вынос мелкофракционных частиц из тела насыпи в нижний бьеф. Деформации насыпи продолжались в течение некоторого периода времени (при проведении опыта — 14 мин), до формирования более устойчивой формы насыпи и окончания просадки. После окончания деформации откосов насыпи уровень воды в лотке был поднят до 40 мм , и деформации возобновились (рис. 8).



Рис. 8. Деформация насыпи
(уровень воды в верхнем бьефе 40 мм)

Через некоторое время (в опыте — 22 мин) после начала второго этапа произошел прорыв насыпи на участке ее примыкания в стенке установки (рис. 9). Деформация насыпи продолжилась до полного оплывания (в опыте — около 60 мин). По окончании оплывания насыпи воду из верхнего бьефа удалили. При этом уровень воды в нижнем бьефе сохранился, фильтрации через тело насыпи из нижнего бьефа в верхний практически не наблюдалось.



Рис. 9. Прорыв насыпи

Процессы, проходившие в грунте тела насыпи, определяются явлениями разжижения грунта [8]. При полном водонасыщении пористой структуры массива резко уменьшаются силы сцепления (трения) между частицами, и грунт переходит в разжиженное состояние, что вызывает оплывание тела насыпи. Далее под действием веса вышележащих слоев происходит переукладка частиц, что приводит к консолидации и уплотнению грунта. Изменяются форма насыпи и ее вес из-за уноса мелкофракционных частиц, а значит, и плотность. Форма насыпи до и после подтопления приведена на рис. 10.

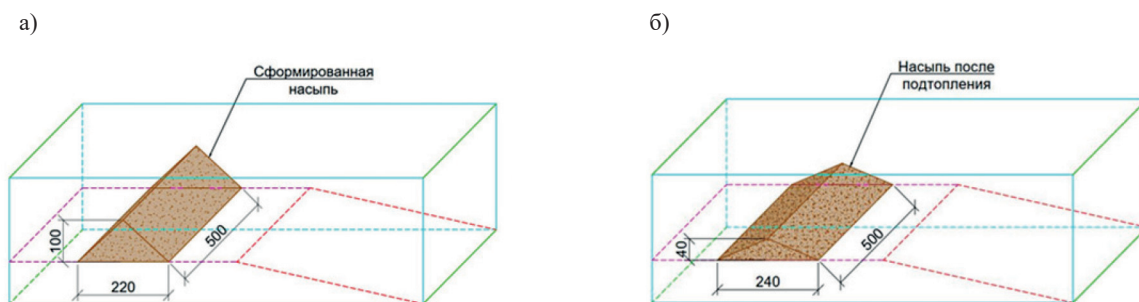


Рис. 10. Форма насыпи: а — до прокачки воды; б — после прокачки воды

Определенная после прокачки плотность грунта тела насыпи составила $1,830 \text{ г/см}^3$, что также свидетельствует об уплотнении и консолидации грунтов, подвергшихся воздействию фильтрационного потока.

Обсуждение (Discussion)

В процессе исследования устойчивости грунтовых сооружений под воздействием на них воды можно отметить следующее. Структура и свойства грунтов, из которых сложены естественные берега водотоков и водохранилищ, а также искусственные гидротехнические сооружения: насыпи, дамбы и грунтовые плотины, во многом определяют напряженно-деформированное состояние как грунтовых массивов, так и расположенных на них сооружений и конструкций.

Формирование водохранилищ после возведения в русле водотока подпорных сооружений приводит к подъему уровня грунтовых вод, насыщению массива грунтовых сооружений и берегов водохранилищ водой, в грунтовом массиве формируется поле фильтрационных потоков с достаточно высокими градиентами напоров. Одной из характерных особенностей рыхлых водонасыщенных несвязных грунтов является их способность переходить в разжиженное состояние [9].

На частицы грунта, окруженные водой, действует взвешивающая (Архимедова) сила. Кроме того, при движении фильтрационного потока в грунте его частицы оказывают задерживающее (тормозящее) воздействие на поток. Это происходит в результате трения двигающейся воды о поверхность частиц, а также отклонения струек воды от прямолинейного направления при столкновении их с минеральными частицами. Кроме того, возникают внутренние сопротивления движущейся воды, вызванные взаимным воздействием струй, имеющих различное направление и скорость движения. Тормозящее влияние скелета грунта вызывает снижение скорости воды по пути фильтрации, вследствие чего появляется фильтрационное давление на скелет, так называемое *гидродинамическое давление*, представляющее собой силу, с которой движущаяся вода воздействует на грунтовый скелет. Сила гидродинамического давления направлена по касательной к линии тока и действует в ту же сторону, что и вода, при этом гидродинамическое давление стремится продвинуть частицы скелета по направлению движения воды.

Взвешивающая сила и сила гидростатического давления совместно воздействуют на частицы скелета грунта. Результирующее действие этих двух сил определяется в результате их векторного сложения. При восходящем фильтрационном потоке фильтрационное и взвешивающее воздействия будут действовать в одном направлении и их влияние суммируется. Реакция песчаных и гравелистых грунтов на эту нагрузку существенным образом зависит от их пористости. Немалое значение имеет также гранулометрический состав грунта.

С точки зрения физических свойств грунтов можно выделить гравитационную, тиксотропную и плавунную природу их разжижения [10]. Основным механизмом *гравитационного разжижения* является увеличение порового давления свободной воды, заполняющей пространство между частицами скелета при динамическом воздействии на грунт. При значительном (вплоть до полного) водонасыщении породы, т. е. полном заполнении порового пространства свободной водой, при увеличении нагрузки на грунтовый массив (например, сил давления со стороны верхнего бьефа при заполнении водохранилища) и небольших коэффициентах фильтрации вода не успевает покинуть поры, в которых она находилась, поровое давление существенно возрастает, что приводит к разрыву контактов между частицами грунта, трение между ними практически исчезает, частицы взвешиваются и грунт, перейдя в состояние суспензии, разжижается. При этом исчезает сопротивление грунта сдвигающим усилиям.

Тиксотропное разжижение определяется способностью грунта под влиянием внешнего воздействия (вибрации, встряхивания) разжижаться, переходить в состояние «тяжелой жидкости», а затем, когда воздействие прекращается, возвращаться в первоначальное состояние, сгущаться и упрочняться. Механизм тиксотропных процессов в грунтах заключается в том, что в случае механического воздействия на систему вода, связанная с частицами грунта силами молекулярных и химических связей, переходит в свободное состояние, из-за чего структурные связи между частицами нарушаются, и система быстро разжижается. В публикации [11] отмечается, что грунты, в которых возникают процессы тиксотропии, характеризуются преобладанием частиц размером не более 0,01 мм, а также наличием в их составе не менее 2 % глинистых частиц. Поэтому тиксотропностью не обладают чистые песчаные и гравийно-галечниковые грунты. Процессы тиксотропного разупрочнения протекают весьма быстро, а длительность тиксотропного восстановления (уплотнения) существенно зависит от химико-минерального состава, дисперсности и влажности грунтов и может изменяться от десятков минут до десятков суток [10].

Плывунные явления характерны для «переходных» (от чистых песков к глинам) видов грунтов, таких как пылеватые пески, супеси и некоторые разности легких суглинков. Плывунные грунты в разжиженном состоянии обладают минимальной вязкостью и наибольшей подвижностью среди всех дисперсных грунтов. Наличие глинистых частиц препятствует быстрому развитию уплотнения системы, что наряду с низкими коэффициентами фильтрации пылеватых песков и супесей обуславливает важную особенность плывунных систем — способность их к длительному нахождению в разжиженном состоянии после прекращения динамического воздействия. Наличие глинистых частиц повышает плывунные свойства за счет «смазывающих» свойств на контактах песчаных зерен и снижения фильтрационной способности грунта.

Процессы консолидации грунтов, т. е. их уплотнения при выжимании воды из порового пространства, также определяются изначальной водонасыщенностью грунта и его фильтрационными характеристиками. При малых коэффициентах фильтрации осадки сооружений, величина и скорость которых определяются процессами консолидации, могут наблюдаться в течение длительного периода времени.

Для ускорения процесса уплотнения и упрочнения грунтов насыпей, повышения их несущей способности (в случае возведения на насыпи сооружений) представляется целесообразным использование механизма искусственного подтопления грунтового массива возводимого сооружения перед вводом его в эксплуатацию. Такой процесс будет заключаться в затоплении построенного сооружения и последующем его осушении для обеспечения ускоренной консолидации. При этом возможно разделение процедуры на этапы в процессе строительства, при котором по мере возведения следует подтапливать построенные части сооружения и осуществлять уплотнение послойно. С этой целью необходимо тщательно и обоснованно подходить к выбору минерального и гранулометрического состава грунта, используемого для формирования насыпного сооружения. При этом должна быть обеспечена как возможность полного водонасыщения грунта насыпи, так и достаточно быстрое и эффективное удаление воды из грунтового массива, его уплотнение и консолидация, обеспечивающие отсутствие последующих деформаций грунтового сооружения.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполненный анализ характеристик грунтов насыпных сооружений, примеров упрочнения таких сооружений и оснований напорных конструкций, располагаемых на грунтовых массивах, позволяет сделать вывод о том, что одним из эффективных способов уплотнения насыпей может служить их подтопление.
2. Кратковременное совместное воздействие сил взвешивания и гидродинамического давления приводит к переукладке частиц грунта, формирующих массив насыпи, и более плотной их упаковке.
3. Предварительное подтопление возведенных сооружений позволяет регулировать прочностные свойства грунтового массива, увеличивая их несущую способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колосов М. А. Консолидация грунтов в основании шлюза — важнейший критерий оценки надежности гидротехнического сооружения / М. А. Колосов, К. П. Моргунов // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 1(89). — С. 44–47. — EDN PWHMWG.
2. Моргунов К. П. Особенности поведения грунтов в основании гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 02–05 июня 2021 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. — С. 66–81 — EDN PQQWRG.
3. Корпачев В. П. Влияние размыва берегов водохранилищ ГЭС на засорение их древесной массой / В. П. Корпачев // Вестник КрасГАУ. — 2008. — № 4. — С. 91–96. — EDN JUGPDL.
4. Корпачев В. П. Проблемы прогнозирования загрязнения и засорения древесной массой и органическими веществами водохранилищ высоконапорных ГЭС / В. П. Корпачев // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 2. — С. 110–113. — EDN IMPIZL.
5. Колосов М. А. О причинах просадки основания строящейся Загорской ГАЭС-2 / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, П. П. Чинаков // Фундаменты. — 2022. — № 1(7). — С. 38–39. — EDN RUCHRZ.
6. Александров А. В. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы / А. В. Александров, Е. Н. Беллендир, С. Я. Лащенко, Р. Ш. Альжанов // Гидротехническое строительство — 2016. — № 7. — С. 2–10. — EDN WHPWUX.
7. Лаврусевич А. А. Развитие подземной эрозии грунтов, примыкающих к бетонным сооружениям (на примере ЗаГАЭС-2) // Гидротехническое строительство / А. А. Лаврусевич, В. П. Хоменко, И. А. Лаврусевич. — 2024. — № 1. — С. 53–57. — EDN SMRLIG.
8. Моргунов К. П. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов // Наука и техника. — 2022. — Т. 21. — № 3. — С. 201–210. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-3-201-210. — EDN JPGRWC.
9. Моргунов К. П. Разжижение грунтов — причина аварий на гидротехнических сооружениях / К. П. Моргунов, П. А. Гарибин // Гидротехника. — 2022. — № 4(69). — С. 9–18. DOI: 10.55326/22278400_2022_4_9. — EDN JMPAQQ.
10. Моргунов К. П. Особенности динамической реакции водонасыщенных грунтов, залегающих в основании гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. — С. 45–67 — EDN ZTFZTC.
11. Ступников В. С. Тиксотропия глинистых грунтов / В. С. Ступников, Е. М. Данчук, Л. И. Черкасова // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. — 2020. — № 1. — С. 2. — EDN ZQOUGR.

REFERENCES

1. Kolosov, M. A. and K. P. Morgunov «Konsolidatsiya gruntov v osnovanii shlyuza — vazhneyshiy kriteriy otsenki nadezhnosti gidrotekhnicheskogo sooruzheniya.» *Rechnoy transport (XXI vek)* 1(89). (2019): 44–47.

2. Morgunov, K. P. and M. A. Kolosov. "Osobennosti povedeniya gruntov v osnovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy." *Vodnye puti i ruslovyie protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 02–05 iyunya 2021 goda* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2021: 66–81.
3. Korpachev, V. P. "Vliyanie razmyva beregov vodokhranilish GES na zasorenie ikh drevesnoy massoy." *Vestnik KrasGAU* 4. (2008): 91–96.
4. Korpachev, V. P. "Problemy prognozirovaniya zagryazneniya i zasoreniya drevesnoy massoy i organicheskimi veshchestvami vodokhranilish vysokonapornykh GES." *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* 2. (2004): 110–113.
5. Kolosov, M. A., K. P. Morgunov and P. P. Chinakov "O prichinakh prosadki osnovaniya stroyascheysya Zagorskoy GAES-2." *Fundamenty* 1(7). (2022): 38–39.
6. Aleksandrov, A. V., E. N. Bellendir, S. Ya. Laschenov and R. Sh. Al'zhanov "Likvidatsiya posledstviy osadki zdaniya stantsionnogo uzla Zagorskoy GAES-2 i vosstanovitel'nye raboty." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 7. (2016): 2–10.
7. Lavrusevich, A. A., V. P. Khomenko and I. A. Lavrusevich "Razvitie podzemnoy erozii gruntov, primykayuschikh k betonnyim sooruzheniyam (na primere ZaGAES-2)." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 1. (2024): 53–57.
8. Morgunov, K. P. and M. A. Kolosov "Soil Liquefaction Problems in the Foundations Hydraulic Structures." *Science and Technique* 21.3 (2022): 201–210. DOI: 10.21122/2227–1031–2022–21–3–201–210.
9. Morgunov, K. P. and P. A. Garibin "Soil liquishing is a cause of accidents at hydrotechnical facilities." *Hydrotehnika* 4(69). (2022): 9–18. DOI: 10.55326/22278400_2022_4_9.
10. Morgunov, K. P. "Features of the dynamic reaction of water-saturated soils at the base of hydro-engineering structures." *Vodnye puti i ruslovyie protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023: 45–67.
11. Stupnikov, V. S., E. M. Danchuk and L. I. Cherkasova "Thixotropy of clay soils." *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral* 1. (2020): 2–2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович —

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

Колосов Михаил Александрович —

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

Чинаков Павел Павлович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Morgunov, Konstantin P. —

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

Kolosov, Michail A. —

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

Chinakov, Pavel P —

graduate student
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: pavelchinakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2024 г.
 Received: Dec. 24, 2024.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURE OF THE BOTTOM RELIEF IN THE CONDITIONS OF A DREDGING CUT

R. V. Zavarzin, V. M. Katolikov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

This study analyzes the structure of bedforms that develop within dredged navigation cuts. Numerous observations of channel bed transformation indicate that immediately following sediment excavation, bedforms begin to emerge on the cut bottom, with crest elevations exceeding the designed cut depth. It is concluded that the formation of bedform relief leads to a reduction in navigable channel depth. Observations of channel relief structure in lowland navigable rivers, documented in the authors' previous studies, reveal that the bottom relief consists of dunes and underlying waves, the heights of which are comparable to those of the dunes. Consequently, their formation further contributes to a decrease in the guaranteed depth within the cut. These losses are most significant in areas of extensive dredging where the cuts are long. The aim of this research is to investigate the structure of bottom relief formed under various conditions in a 50-meter hydraulic flume. A comparative analysis of dune parameters showed that the relative height of dunes within the cut is half that of dunes observed in the same areas prior to dredging. Simultaneously, second-order waves were located beneath the dunes, with third-order waves below them. The heights of these waves were similar to those of the dunes. Based on these findings, it is concluded that the design of dredging operations should account for the impact of dunes and waves in the channel relief, which can lead to a reduction in navigable depth. However, it should also be noted that the size of dunes and waves within the dredged cut will be smaller compared to those formed under natural conditions.

Keywords: bedforms, dredged cut, dredging operations, hierarchy of bedforms, dune height, navigable depth loss.

For citation:

Zavarzin Ruslan. V. and V. M. Katolikov "Experimental study of the structure of the bottom relief in the conditions of a dredging cut." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 33–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48.

УДК 556.537

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА В УСЛОВИЯХ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОЙ ПРОРЕЗИ

Р. В. Заварзин, В. М. Католиков

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является анализ строения грядового дна, образующегося в условиях дноуглубительных судоходных прорезей. Отмечается, что многочисленные наблюдения за трансформацией дна прорези свидетельствуют о том, что сразу после выемки грунта на дне прорези начинают формироваться гряды, при этом высотные отметки гребней гряд превышают отметки проектного дна прорези. Сделан вывод о том, что формирование грядового рельефа дна приводит к потере глубины судового хода. Подчеркивается, что наблюдения за структурой рельефа русел равнинных судоходных рек показывают, что донный рельеф состоит из гряд и расположенных под ними волн, высоты которых близки к высотам гряд и, таким образом, их формирование приводит к дополнительной потере гарантированной глубины в прорези. Отмечается, что в наиболее критичном виде такие потери могут наблюдаться на участках капитального дноуглубления, когда прорезь имеет большую длину. Целью работы является исследование структуры донного рельефа, сформированного в различных условиях в 50-метровом гидравлическом лотке. Выполненный сравнительный анализ параметров гряд показал, что гряды в прорези по своей относительной высоте в 2 раза меньше гряд, наблюдавшихся на этих же участках до дноуглубления, при этом под грядами располагались волны II, а еще ниже — III уровня (высоты этих волн близки к высотам гряд). На основе результатов выполненной работы сделан вывод о том, что при проектировании дноуглубительных работ следует учитывать, что гряды и волны руслового рельефа будут приводить к потере гарантированной глубины судового хода, однако в пределах прорези их размеры будут меньше, чем при формировании в естественных условиях.

Ключевые слова: донные гряды, судоходные прорези, дноуглубительные работы, иерархия донных форм, высота гряд, потеря гарантированной глубины, трансформация дна прорези, волны руслового рельефа, капитальное дноуглубление, эксплуатационное дноуглубление.

Для цитирования:

Заварзин Р. В. Экспериментальное исследование строения грядового дна в условиях дноуглубительной прорези / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 33–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48. — EDN HPLWPR.

Введение (Introduction)

Устройство дноуглубительных прорезей является эффективным решением, направленным на увеличение гарантированной глубины судового хода в реках [1]. После создания прорези на ее дне образуются гряды, гребни которых формируются на отметках выше проектного дна прорези. Данное обстоятельство приводит к потере гарантированной глубины. Общепринятым является мнение о том, что высота и длина гряд имеет тесную связь с глубиной потока [2], [3] — с увеличением глубины потока должно происходить увеличение высот и длин гряд. В результате обработки большого количества данных, полученных о равнинных реках, в работе [2] было обнаружено, что отношение высоты гряд к глубине потока в среднем составляет 0,11 при $Fr \leq 0,2$ и 0,13 при $0,2 \leq Fr \leq 0,5$, где Fr — число Фруда. Однако наблюдения за рельефом равнинных судоходных рек показывают, что в дноуглубительных прорезях гряды отличаются своими размерами от гряд, формирующихся в стандартных условиях. Так, например, в дноуглубительных прорезях на р. Пур отношение высоты гряд к глубине потока значительно ниже и составляет 0,048–0,084. При этом до выполнения дноуглубительных работ отношение данных параметров составляло 0,10, о чем свидетельствуют данные отчета о НИР по теме «Исследование северных рек в районе газонефтедобычи для разработок рекомендаций по улучшению судоходных условий» (СПб., 1983. 250 с.) и публикации [4]. Такие значительные расхождения в размерах гряд требуют отдельного исследования.

Согласно подходу, разрабатываемому в рамках гидроморфологической теории руслового процесса, донные гряды (микроформы) являются одной из дискретных форм транспорта донных наносов [5]. Уровнем выше *микроформ* находятся *мезоформы* (побочни, осередки, ленточные гряды), соизмеримые с шириной русла. Наивысший уровень — это *макроформы*, к которым относятся целые участки русла и поймы рек. Из практики производства дноуглубительных работ известно, что мезоформы и макроформы в прорезях формироваться не могут в силу размеров прорезей. Однако, как показало исследование [6], при транспорте донных наносов в виде микроформ формируется волновая форма поверхности раздела, которая также приводит к потере гарантированной глубины. В процессе исследования было выявлено, что находящиеся под грядами волны II уровня имеют высоту, которая на 15–30 % меньше высоты гряд, и длину в 3–4 раза больше длины гряд. Впервые данные формы были обнаружены в исследованиях [7] и [8].

Системы длинных судоходных прорезей, которые могут создаваться на протяжении многокилометровых участков рек, называются *капитальными*. Так, например, на 45-километровом участке р. Волги от Городца до Н. Новгорода одним из вариантов обеспечения необходимой гарантированной глубины является создание серии капитальных дноуглубительных прорезей [9]. При такой значительной длине прорезей их рельеф будет состоять из гряд и волн II и III уровней. Все эти русловые формы будут ограничивать допустимую гарантированную глубину судового хода. Таким образом, появляется необходимость исследования иерархической структуры рельефа дна в условиях капитальной дноуглубительной прорези. В таких специфических условиях волны по своим размерам могут отличаться от волн, образующихся в естественных условиях. Это приводит к необходимости исследования иерархии донных форм, формирующихся в прорези, а также уточнения их размеров. Именно с этой целью были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в настоящей работе.

Задачи данного исследования:

1. Выполнить анализ существующих работ, направленных на исследование руслового рельефа в дноуглубительных прорезях.
2. В рамках экспериментальной работы в гидравлическом лотке исследовать строения донного рельефа, образующегося в различных исходных условиях:
 - ровное песчаное дно;
 - грядовое дно, сформированное в ходе предыдущего эксперимента, с капитальной прорезью, созданной по всей длине рабочего участка лотка;
 - гладкий песчаный рельеф дна, состоящий из двух побочней и переката;
 - грядовый рельеф дна с побочнями, сформированный в ходе предыдущего эксперимента, с эксплуатационной прорезью в районе переката.
3. Выполнить сравнительный анализ размеров гряд и волн руслового рельефа, образующихся в различных условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ существующих работ, направленных на исследование руслового рельефа в дноуглубительных прорезях. Детально процесс образования гряд в прорезях был исследован в диссертационной работе Б. Ф. Сنيщенко «Исследование процесса заносимости судоходных прорезей на реках» (Л., 1964. 144 с.). Наблюдения, выполненные на перекатах таких рек, как Волга и Дон, показали, что через шесть дней после создания прорези гряды на ее дне достигают размеров гряд, наблюдавшихся при естественном строении русла. Затем они продолжают расти, становясь в итоге в два раза выше по сравнению с грядами, наблюдавшимися в бытовых условиях. Параллельно с ростом гряд происходит занесение прорези наносами, однако даже спустя два месяца объем наносов, пришедший с соседних участков, повышает отметки прорези на величину, два раза меньшую, чем повышение, вызванное образованием гряд. Исходя из приведенных наблюдений, в указанной ранее диссертационной работе Б. Ф. Снищенко был сделан следующий вывод: «Главным процессом, определяющим потерю глубины в прорези, является формирование и развитие на ее дне песчаных гряд» (Л., 1964. С. 113).

Аналогичные наблюдения за донным рельефом в судоходных прорезях были проведены Г. Л. Гладковым и его коллегами на р. Пур [4], и в НИР по теме «Исследование северных рек в районе газонефтедобычи для разработок рекомендаций по улучшению судоходных условий» (СПб., 1983. 250 с.) Глубина прорезей составила 1 м при общей глубине потока 2,0–4,5 м, отношение ширины прорезей к ширине русла составило в среднем 0,35. Первые измерения рельефа дна производились в бытовом состоянии. Повторные измерения проводились через девять дней после окончания дноуглубительных работ, а затем в течение всего лета с интервалом 5–14 дней. На основе полученных данных были построены графики изменения параметров гряд от глубин потока (рис. 1).

Следует отметить, что после создания прорези гряды на ее дне начали уменьшаться по высоте и длине. Спустя девять дней после создания прорези в траншеях 4–5 при увеличении глубины потока с 3,5 м до 4,5 м, высота гряд уменьшилась с 0,36 м до 0,25 м, длина — с 12,5 м до 10,2 м. Далее в течение 12 дней высота и длина гряд продолжали уменьшаться. Затем в течение оставшихся полутора месяцев наблюдений оставались стабильными по своим размерам и имели среднюю высоту 0,14–0,17 м и среднюю длину 6,6–8,3 м. В этот временной промежуток отношение высоты гряд к глубине потока находилось в диапазоне от 0,048 до 0,084. Далее в работе отношение высоты гряд к глубине потока называется *относительной высотой гряды*.

Некоторое увеличение высот и длин гряд началось лишь спустя 2 месяца после создания прорези, когда ее высотные отметки повысились вследствие занесения. Как отмечается в работе [4], во всем диапазоне изменения уровней воды гряды, расположенные за кромкой прорези (при меньшей глубине), оказались крупнее гряд, расположенных в прорези. На основе ранее изложенного можно сделать вывод о том, что в дноуглубительной прорези формируются гряды меньшего

размера как по сравнению с грядами, находящимися в бытовом состоянии на этом участке, так и с грядами на соседних с прорезью участках.

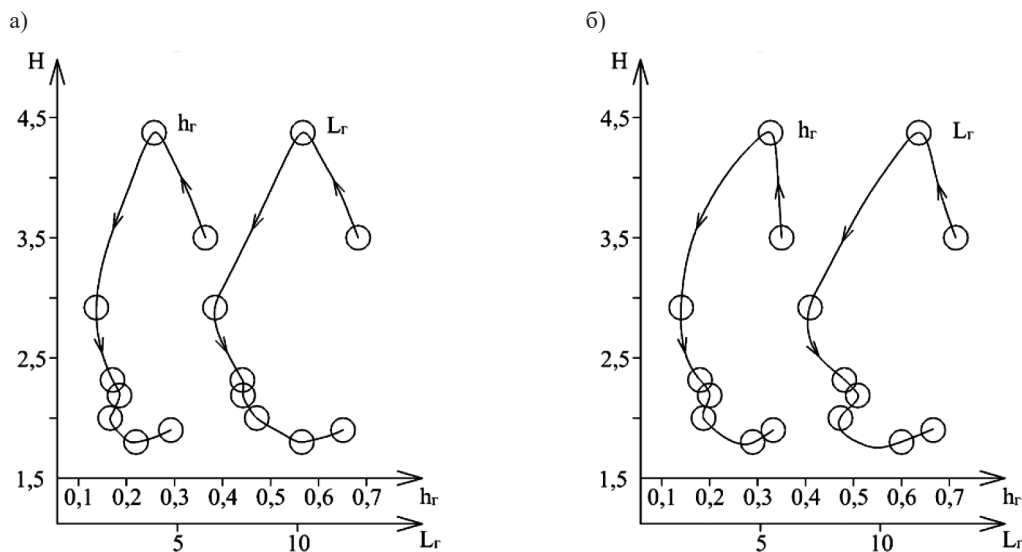


Рис. 1. Изменение высот и длин гряд в зависимости от глубины потока:

a — траншеи 4–5; *б* — траншеи 6–7

(h_r — высота гряд, м; L_r — длина гряд, м;

стрелками на графике обозначена последовательность измерений)

Другими российскими учеными были проведены различные исследования, направленные на изучение процесса потери гарантированной глубины в прорезях. Данные работы были основаны на наблюдениях на реальных реках [10] и использовании экспериментальных установок [11], а также на применении математического моделирования [12]. Кроме этого, были проведены экспериментальные исследования в Руслевой гидравлической лаборатории ГГИ [13], где на ровном грядовом дне осуществлялась выемка грунта в виде карьера, который конструктивно схож с судходной прорезью, и выполнялись наблюдения за трансформацией дна карьера. Во всех этих исследованиях [10]–[13] подробно не раскрывается тема размеров гряд, внимание акцентируется на процессах заносимости прорези наносами и повышения отметок дна.

Для детального исследования строения грядового рельефа дна в дноуглубительной прорези в процессе работы были проведены экспериментальные исследования в гидравлическом лотке длиной 50 м. Исследование состоит из проведения четырех экспериментов при различных условиях, в частности моделируются условия капитальной дноуглубительной прорези, а также эксплуатационной прорези на участке переката.

Методика проведения экспериментов. Экспериментальные исследования проводились в руслевой гидравлической лаборатории ГГИ по методике, разрабатываемой и многократно апробированной в отделе руслевых процессов ГГИ [14]. Важнейшим условием проведения экспериментов является соблюдение условия динамического равновесия. Согласно данной методике скоростное поле потока и характеристики руслевых форм фиксируются после того, как система «поток – деформируемое дно» достигнет динамически равновесного состояния. Критерием такого состояния является неизменность уклона водной поверхности, равенство объема наносов, подаваемых в поток, и наносов, выносимых за пределы рабочего участка лотка, а также неизменность параметров руслевых форм во времени и по длине рабочего участка лотка [14].

Эксперименты проводились в 50-метровом гидравлическом лотке с металлическим дном и стеклянными стенками (ширина лотка 2,0 м, высота стенок 0,7 м, дно горизонтальное, максимальный расход воды 47 л/с). Подача воды в лоток осуществлялась из мерных баков с треугольным водосливом с тонкой стенкой. Для успокоения воды, поступающей из баков, применялись металлические сетчатые ящики, заполненные путаной полиэтиленовой нитью. Регулирование глуби-

ны и уровней воды в лотке производилось с помощью концевого водосливного затвора. Общий вид 50-метрового гидравлического лотка приведен на рис. 2.

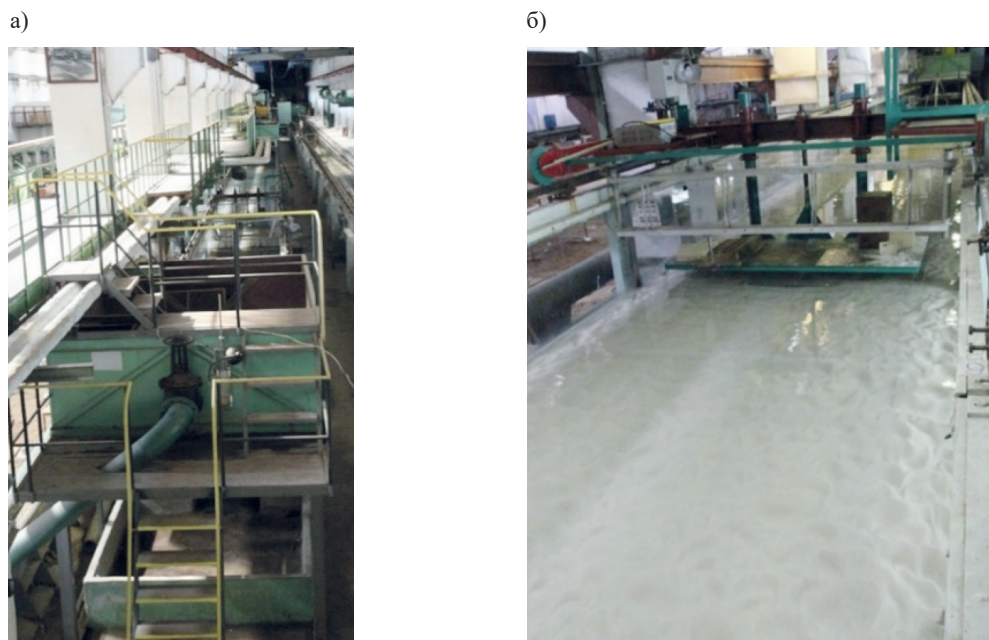


Рис. 2. Вид 50-метрового гидравлического лотка со стороны бака с водосливом (а) и вид тележки с измерительным оборудованием (б)

Для измерения грядового дна и скоростей потока были использованы измерители Vectrino, основанные на использовании доплеровского способа измерения скоростей и расстояния. Данные инструменты хорошо подходят для использования в лабораторных условиях, а также имеют высокую точность измерения скорости [15].

В ходе подготовительных этапов экспериментов осуществлялось формирование гряд по всему рабочему участку лотка. На начальном этапе в лоток подавался необходимый расход воды, в конце лотка с помощью задвижки выставлялся необходимый уровень воды. По прошествии нескольких часов гряды образуются по всему рабочему участку лотка, затем их размеры стабилизируются. Уклоны свободной поверхности также стабилизируются и таким образом поток достигает состояния динамического равновесия. Для обеспечения баланса наносов в лотке на протяжении всех экспериментов в начало рабочего участка лотка подавались донные наносы в объеме, равном объему выноса наносов в конце рабочего участка.

Методика обработки продольников и измерений параметров донных гряд. Для выделения гряд и расположенных под ними волн различных уровней применяется метод последовательной интерполяции. Такой метод выделения форм руслового рельефа применялся при обработке данных рельефа р. Волга в работе [7]. Также данный метод хорошо себя зарекомендовал в работе по данной теме [6]. В настоящей работе этот метод применяется с некоторыми особенностями: при выделении волн I уровня фильтровались малые выступы руслового рельефа, имеющие высоту менее 0,2 см. Таким образом, волны I уровня, исходя из своих размеров (высоте и длине), являются грядами.

Результаты (Results)

Всего было проведено четыре эксперимента в 50-метровом гидравлическом лотке при различном исходном строении песчаного дна лотка (табл. 1). Расход воды был одинаковым во всех экспериментах и составил 47,0 л/с. В качестве донного материала использовался песок средней крупности 0,29 мм. В условиях экспериментов обеспечивалось движение всех фракций донных наносов.

Таблица 1

Условия экспериментов в 50-метровом лотке

Номер эксперимента	Q , л/с	$H_{\text{пот}}$, см	$V_{\text{ср}}$, см/с	Fr	Начальные условия	t , мин
1	47,0	8,0 — средняя по участку	33,6	0,41	Ровное песчаное дно, выполненное с уклоном 1 ‰	1 200
2	47,0	8,0 — вне прорези, 15,5 — в прорези	19,5 27,1	0,22 0,22	Грядовое песчаное дно, сформированное в ходе эксперимента 1. Прорезь по оси русла с шириной 40 см и глубиной выемки 7,5 см	600
3	47,0	8,0 — средняя по участку	27,7	0,31	Гладкое песчаное дно, состоящее из побочной	840
4	47,0	8,0 — средняя по участку, 13,0 — в прорези	24,5 24,4	0,28 0,22	Грядовое песчаное дно с побочными, сформированное в эксперименте 3. Прорезь выполнена на перекате, ширина прорези 50 см, глубина выемки 2–4 см	1 800

Эксперимент № 1 — грядовое дно, сформированное на ровной песчаной поверхности. Исходным строением дна являлась ровная песчаная поверхность, уложенная с уклоном 1 ‰. Длина рабочего участка лотка, покрытого песком, составляла 16 м. В гидравлический лоток подавался расход воды, и при заданной глубине потока на дне формировались гряды. После завершения подготовительного этапа эксперимента № 1 по всей длине рабочего участка лотка сформировались трехмерные гряды. Уклоны свободной поверхности стабилизировались и стали равными 1 ‰.

Для измерения рельефа осуществлялось эхолотирование по центральному продольнику. Длина продольника составляла 10 м. Обработка полученного рельефа выполнялась методом последовательной интерполяции. В результате удалось выделить волны трех уровней (рис. 3).

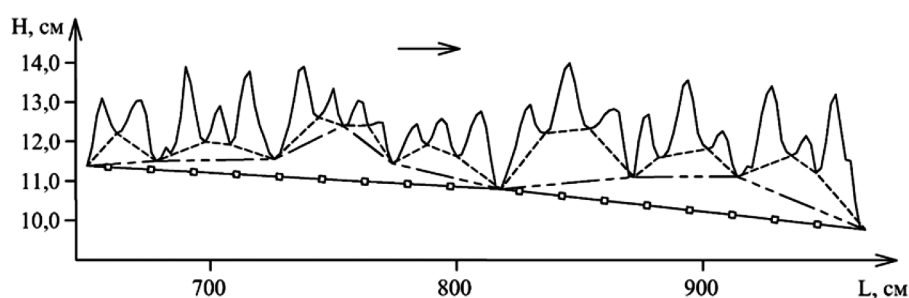


Рис. 3. Грядовый рельеф дна с выделенными волнами (эксперимент № 1):

— — поверхность гряд; — — — — поверхность волн II уровня;
- · - · - — поверхность волн III уровня

Параметры русловых форм приведены в табл. 2. При глубине потока 8 см высота и длина гряд составила в среднем 1,10 см и 13,04 см соответственно. Относительная высота гряд равна 0,14. Волны II уровня имеют высоту 0,96 см и длину 40,91 см, в среднем они оказываются длиннее гряд в 3,14 раза. Волны III уровня имеют высоту 0,72 см и длину 143,45 см. Следует отметить, что при увеличении уровня волн их высота уменьшается в среднем на несколько десятков процентов, а длина волн увеличивается в 3–4 раза.

Таблица 2

Характеристики гряд и волн (эксперименты № 1 и 2)

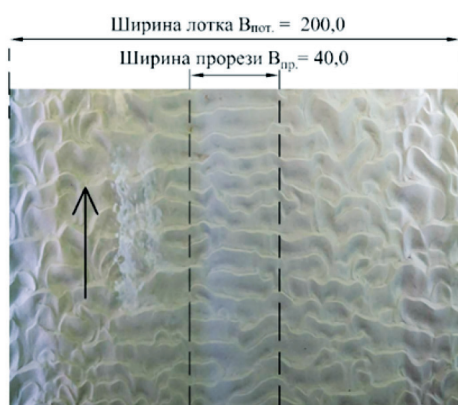
Уровень русловых форм	Характеристики	Эксперимент 1 ($Q = 47$ л/с)	Эксперимент 2 ($Q = 47$ л/с)
		$H = 8,0$ см	Прорезь $H = 15,5$ см
I (гряды)	Число волн	152	250
	Средняя длина гряд, см	13,04	11,90
	Средняя высота гряд, см	1,10	1,02
	Относительная высота гряд	0,14	0,07
II (волны)	Число волн	46	83
	Средняя длина волн, см	40,91	35,11
	Средняя высота волн, см	0,96	0,87
III (волны)	Число волн	11	24
	Средняя длина волн, см	143,45	94,25
	Средняя высота волн, см	0,72	0,60

Таким образом, были получены параметры русловых форм, сформированных в исходных условиях ровного песчаного дна. Целью следующего эксперимента является выявление особенностей донного рельефа, формирующегося в условиях капитальной дноуглубительной прорези, которая создается на грядовом рельефе дна первого эксперимента.

Эксперимент № 2 — капитальная прорезь по всей длине рабочего участка. Для создания дноуглубительной прорези по всей длине рабочего участка по оси лотка осуществлялась выемка песка. Ширина выемки по дну составляла 40 см, глубина — 7,5 см, откосы имели угол естественного откоса. Уклон дна соответствовал уклону песчаного дна соседних участков — 1 ‰.

После 10 часов проведения эксперимента гряды сформировались по всей длине прорези, а их параметры стабилизировались. Схема лотка со сформировавшимся грядовым дном в прорези представлена на рис. 4. Следует заметить, что гряды в прорези имеют двумерную плановую форму, гребни гряд перпендикулярны потоку и перемещаются вниз по течению равномерно по всей ширине прорези. Транспорт наносов осуществляется лишь в границах прорези, на соседних участках гряды не деформируются и не перемещаются. Таким образом, рельеф дна на соседних участках остался неизменным с первого эксперимента.

а)



б)

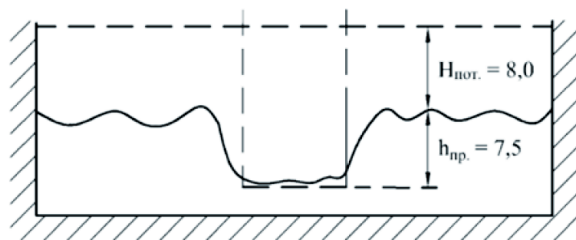


Рис. 4. Вид сверху на грядовый рельеф дна (а) и поперечный разрез схемы лотка (б)
(эксперимент № 2): — — — рельеф дна (показан схематически);
— — — уровень водной поверхности; // — жесткие границы лотка

Измерение скоростей течения проводилось в точках на глубине $0,6H$ над гребнями гряд, где H — глубина потока. Наибольшие скорости течения, которые наблюдаются в границах прорези, равны $27,1$ см/с. На соседних участках скорости составляют $18,5$ см/с (у ПБ) и $20,4$ (у ЛБ). Таким образом, после создания прорези скорости течения в границах прорези уменьшились с $33,6$ см/с до $27,1$ см/с.

Эхолотирование и последующая обработка продольников проводились аналогично эксперименту № 1. Часть одного из измеренных продольников представлена на рис. 5. Видно, что грядовой рельеф прорези имеет аналогичную эксперименту № 1 иерархическую структуру, состоящую из гряд и расположенными под ними волн. Параметры гряд и волн представлены в табл. 2. Средняя высота гряд составила $1,02$ см, средняя длина $11,90$ см. Следует заметить, что абсолютные размеры гряд уменьшились незначительно — всего на 7% , тогда как относительные размеры уменьшились более чем в 2 раза — с $0,14$ до $0,07$. Зависимости между разными уровнями волн, наблюдавшиеся в первом эксперименте, сохраняются. При увеличении уровня волн их высота уменьшается на несколько десятков процентов, а длина увеличивается в 3–4 раза.

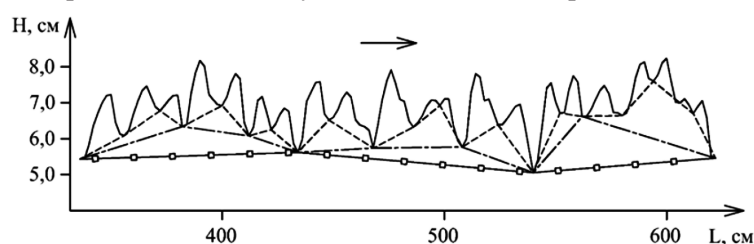


Рис. 5. Грядовой рельеф дна в прорези с выделенными волнами (эксперимент № 2):
— — поверхность гряд; — — — поверхность волн II уровня; — — — — поверхность волн III уровня

В результате анализа донного рельефа в процессе проведения первых двух экспериментов были обнаружены существенные различия в относительных размерах гряд и волн в капитальной прорези по сравнению с грядами и волнами, наблюдавшимися ранее в условиях ровного дна. Целью экспериментов № 3 и 4 являлось исследование особенностей рельефа дна, формирующегося в эксплуатационной прорези на перекате.

Эксперимент № 3 — грядовое дно, сформированное на побочнях. Исходное гладкое песчаное дно в данном эксперименте состояло из двух побочней и переката. Эта поверхность строилась на основе материалов эксперимента № 1, проведенного в рамках диссертационной работы [16]. На начальном этапе эксперимента в лоток подавался необходимый расход воды и затем постепенно по всей длине рабочего участка лотка формировались гряды. По прошествии 14 часов проведения эксперимента гряды наблюдались по всей длине рабочего участка, а режим течения приблизился к режиму, наблюдавшемуся работе [18].

Измерение рельефа дна проводилось по всей длине рабочего участка, по ширине лотка продольники измерялись через каждые 5 см. На рис. 6 показан план части измеренного донного рельефа, где находятся гребни двух побочней и район переката. Все размеры на плане даны в сантиметрах, высотные отметки отсчитываются от дна лотка. Гребни побочней выделены серым цветом.

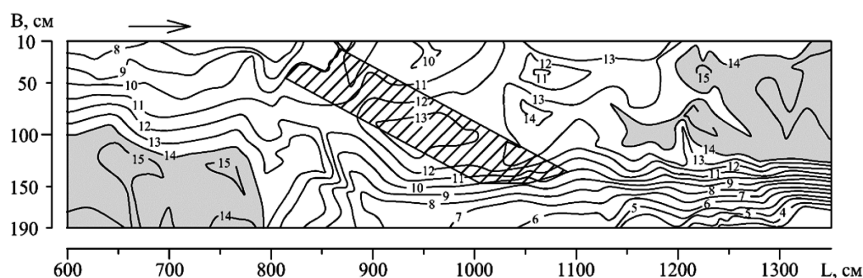


Рис. 6. План рельефа лотка с обозначенным участком создания прорези (эксперимент № 3):
 B — расстояние от левого борта лотка (ЛБ); L — расстояние от начала рабочего участка лотка;
— — — — — границы прорези

Между продольными отметками 800 м и 1200 см и поперечными отметками 60 м и 140 см расположена область переката. Пример грядового рельефа дна, сформированного в данной области, приведен на рис. 7 (бытовое состояние). На каждом измеренном продольнике в данном районе было выделено в среднем по 10–15 гряд, средние высоты гряд приведены в табл. 3.

Таблица 3

Высота гряд в районе проведения дноуглубительных работ

Момент измерения	Характеристики	Расстояние от ЛБ, см								
		60	70	80	90	100	110	120	130	140
До дноуглубления (эксперимент № 3)	h_r , см	1,41	1,32	1,06	1,06	0,95	1,07	1,06	0,89	1,03
	H , см	9,59	8,19	7,72	8,20	7,80	8,17	8,03	9,08	10,88
	h_r/H	0,15	0,16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,10	0,10
Через 10 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	h_r , см	1,22	1,32	1,24	0,81	0,64	0,73	0,73	0,81	0,71
	H , см	8,45	8,47	8,74	10,44	10,98	11,32	12,43	12,58	12,78
	h_r/H	0,15	0,17	0,15	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
Через 20 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	h_r , см	1,06	0,96	1,65	1,06	1,13	0,90	0,93	0,81	0,96
	H , см	8,75	8,19	9,38	9,94	9,83	10,62	11,86	12,57	12,55
	h_r/H	0,12	0,12	0,18	0,11	0,12	0,09	0,08	0,06	0,08
Через 30 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	h_r , см	1,17	1,41	1,14	1,12	0,87	0,64	0,72	1,31	0,69
	H , см	10,94	10,45	9,63	9,34	9,77	10,45	11,86	12,37	12,98
	h_r/H	0,11	0,14	0,12	0,12	0,09	0,06	0,06	0,11	0,05

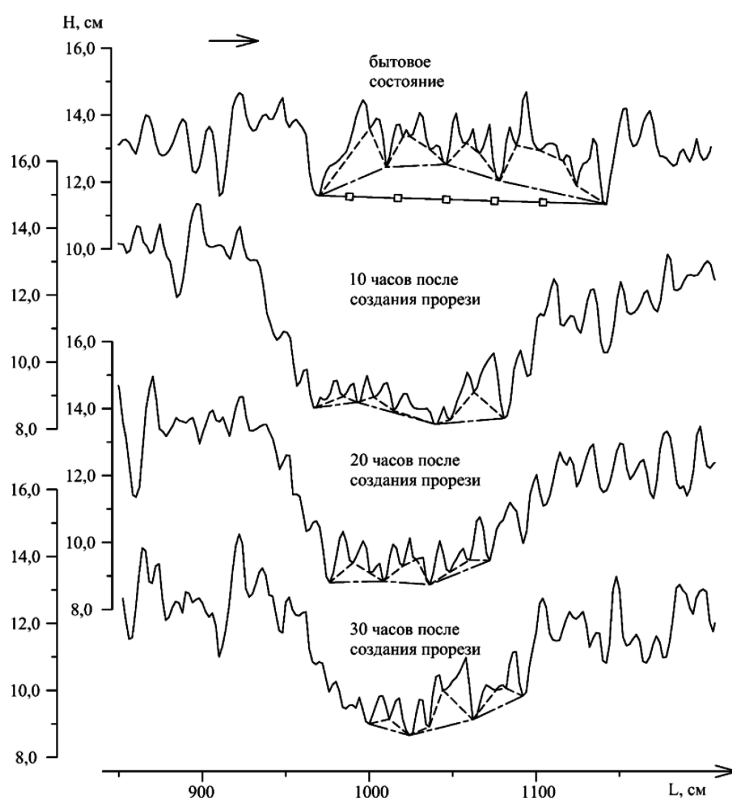


Рис. 7. Грядовый рельеф дна в прорези на расстоянии 120 см от ЛБ в бытовом состоянии, а также спустя 10, 20 и 30 ч после создания эксплуатационной прорези (эксперимент № 4):
— — поверхность гряд; - - - — поверхность волн II уровня, . . . — поверхность волн III уровня

Следует заметить, что гряды имеют высоты в диапазоне 0,89–1,41 см. Заметна тенденция уменьшения высот гряд при отдалении от левого края лотка к правому, что объясняется различным положением продольников относительно частей побочной и, соответственно, различными параметрами потока. Относительные размеры гряд также уменьшаются от левого края к правому от 0,15 до 0,10.

Иерархическое строение рельефа дна аналогично строению, рассматриваемому в предыдущих экспериментах. В рамках данной работы детальному анализу подвергался только район переката. Как видно на рис. 7, под грядами формируются волны донного рельефа II и III уровней. Визуальный анализ показывает, что волны II уровня, как правило, больше гряд по длине в 3–4 раза, тогда как их высоты близки друг к другу, что совпадает с выводами предыдущего эксперимента.

Эксперимент № 4 — эксплуатационная прорезь, созданная на перекате. Целью данного эксперимента является исследование параметров гряд, образующихся на дне прорези. Для этого на перекате была произведена срезка донного слоя толщиной в среднем 2–4 см до высотной отметки 9,5 см. Расположение полученной прорези приведено на рис. 6. После 10 часов проведения эксперимента по всей длине прорези сформировались гряды.

Ввиду неравномерно перемещения донных наносов по ширине лотка верхний участок прорези на продольниках 60, 70 и 80 почти полностью подвергся занесению за 10 часов. Нижняя часть прорези начиная с продольника 90 осталась свободной. На рис. 7 показаны измерения продольника, расположенного на расстоянии 120 см от ЛБ спустя 10, 20 и 30 ч после создания прорези. За временные интервалы между измерениями средние высотные отметки прорези повышаются незначительно, в среднем на 0,3 см. Фиксируется перемещение вышерасположенного откоса прорези в среднем на 7–8 см каждые 10 ч.

Анализируя характер грядового рельефа дна прорези и соседних участков (рис. 8), можно обнаружить, что большая часть гряд имеет трехмерную форму. Однако в районе нижней части прорези рельеф состоит из двумерных гряд, гребни которых отмечены на фотографии. Кроме того, гряды на данном участке прорези повернуты под углом к направлению течения. В правой части лотка (за границами прорези) гряды также направлены вправо. Из этого следует, что для корректного измерения размеров волн руслового рельефа необходимы измерения, выполненные параллельно кромкам прорези. Имеющееся в распоряжении лабораторное оборудование не позволяет выполнять такие измерения. Поэтому по выполненным измерениям рельефа корректно оценить длину гряд и волн руслового рельефа невозможно. Сделано допущение, что измерение высоты гряд на таких продольниках не повлечет ошибки в значениях средней высоты гряд.

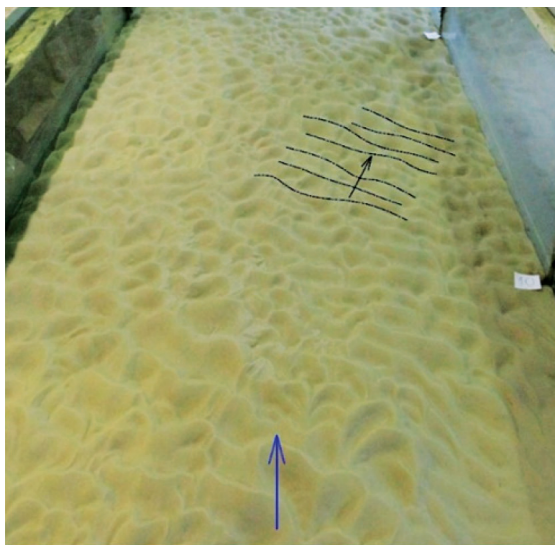


Рис. 8. Грядовый рельеф дна прорези между продольными отметками 800 и 1200 от начала рабочего участка (эксперимент № 4)

Под грядами на продольниках (см. рис. 7) виден волнообразный характер рельефа. Однако для корректного выделения иерархии гряд в прорези выполненные измерения не подходят по ранее указанным причинам. Детально были проанализированы только гряды, расположенные в границах прорези. В среднем на каждом продольнике удалось выделить по 5–10 гряд в прорези. Средние высоты гряд приведены в табл. 3. Следует заметить, что спустя 10 часов отметки дна верхней части прорези на продольниках 60, 70 и 80 повысились. Средняя высота гряд спустя 10 часов достигла значений 1,26 см, относительная высота — 0,16 см, тогда как в бытовом состоянии эти параметры составили 1,26 см и 0,15 см соответственно. Через 20 и 30 часов средние параметры гряд в этом районе не претерпели заметных изменений.

Гряды в нижней части (продольники от 90 до 140) прорези через 10 часов проведения эксперимента имеют среднюю высоту 0,74 см и относительную высоту 0,06 см. Через 20 ч был занесен участок прорези, зафиксированный на продольниках 90 и 100. Как следствие, гряды в этом районе начали расти и достигли высоты, близкой в высоте в бытовом состоянии. В свободной части прорези через 20 часов гряды по своим размерам остаются стабильными, средняя абсолютная высота равна 0,96 см, относительная высота — 0,08 см. Через 30 часов значительных изменений в параметрах гряд не произошло, исключением является продольник 130, где высоты гряд увеличились до 1,31 см. Объясняется это, скорее, ошибкой, причиной которой является малая выборка гряд, так как на соседних продольниках высоты гряды не увеличились.

Обсуждение (Discussion)

В настоящее время как в отечественных, так и зарубежных научных школах ученые сходятся во мнении, что донный рельеф является копией структуры турбулентного потока [5], [14], [17]. Наглядной иллюстрацией этого является связь между параметрами микроформ речного дна и макротурбулентностью руслового потока. Зависимость между параметрами гряд и потока была обнаружена и подтверждена многочисленными исследованиями, проведенными как в лабораторных [18], [19], так и в натурных условиях [17]. В результате обработки большого количества данных рельефа равнинных судоходных рек было обнаружено, что отношение высоты гряд к глубине потока (относительная высота гряд) в условиях малых равнинных рек равно 0,13 (при числе Фруда $0,2 \leq Fr \leq 0,5$) [2], [19]. Отношение длины гряды к глубине потока в среднем находится в диапазоне от 2 до 10 [2].

Результаты эксперимента № 1 показали, что относительная высота гряд в начальных условиях ровного песчаного дна составляет в среднем 0,14. Отношение средней длины гряд к глубине потока составляет 1,86. Гряды, сформировавшиеся в данном эксперименте, по своим относительным размерам близки к ранее найденным зависимостям между глубиной потока и параметрами гряд. Совершенно другие размеры имеют гряды, сформировавшиеся на дне капитальной прорези в эксперименте № 2: средняя относительная высота гряд равна 0,07, относительная длина — 0,77. Следует заметить, что относительные размеры сформировавшихся в прорези гряд почти в 2 раза меньше привычного диапазона данных значений, который известен из работ [2], [20].

Иерархия донных форм как на дне прорези, так и в условиях отсутствия прорези состоит из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. При увеличении уровня волн их длины увеличиваются в 3–4 раза, а высота уменьшается на 10–30 %. Аналогичные наблюдения были сделаны в рамках более ранней работы авторов по данной теме [5]. Необходимо отметить, что вслед за изменением размеров гряд происходит изменение размеров волн и зависимости между размерами гряд и волн на дне прорези сохраняются.

В ходе эксперимента № 3 осуществлялось формирование грядового рельефа на побочной форме дна. Было обнаружено, что гряды, расположенные в районе переката, имеют абсолютные высоты 0,89–1,41 см и относительные — 0,10–0,16. Такие размеры гряд хорошо соответствуют ранее выявленным зависимостям между параметрами гряд и потока.

Эксперимент № 4 заключался в создании эксплуатационной прорези в районе переката. Наблюдения показали, что верхняя часть прорези была занесена наносами в первые 10 часов, а нижняя оставалась свободной на протяжении всего периода наблюдений. Гряды в верхней части прорези по своим высотам сравнивались с грядами в этом же районе до начала проведения работ. Иная картина наблюдалась в нижней части прорези, которая не подверглась занесению. Абсолютная высота гряд в этом районе находилась в диапазоне от 0,64 до 0,81 см, а относительная — от 0,06 до 0,08. Аналогичная ситуация наблюдалась через 20 и 30 часов — гряды в свободной незанесенной части прорези оставались с высотой, заметно меньшей, чем имели гряды до создания прорези. Средние относительные высоты гряд через 20 часов составляют 0,08, через 30 часов — 0,07, тогда как в бытовом состоянии на этих продольниках средняя относительная высота составила 0,12.

Сравнивая полученные результаты с результатами диссертационной работы Б. Ф. Сنيщенко «Исследование процесса заносимости судоходных прорезей на реках» (Л., 1964. 18 с.), можно обнаружить некоторые несоответствия. Так, согласно сделанным в этой работе выводам, в прорези происходит довольно быстрый рост гряд и их размеры в конечном итоге превышают размеры гряд, наблюдающихся на этом же участке до выполнения дноуглубления, тогда как результаты экспериментов, выполненных в настоящей работе, свидетельствуют о противоположном — гряды в прорези сохраняют свои малые размеры до момента начала активного занесения, затем происходит их рост, достигая размеров, наблюдающихся до создания прорези. Наблюдения, выполненные Г. Л. Гладковым в р. Пур [4], наоборот, соответствуют результатам, полученным в настоящей работе. Относительные высоты гряд на дне прорезей на р. Пур составили 0,048–0,084. При этом увеличение размеров этих гряд происходило по мере занесения прорези. Такие результаты наблюдений полностью совпадают с результатами, полученными в настоящем лабораторном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Дноуглубительная прорезь своей формой меняет гидравлическую структуру потока. Как следствие, грядовой рельеф, являющийся отражением структуры турбулентного потока, также изменяется. Исходя из анализа рельефа дна, полученного в ходе экспериментов, было выявлено, что после создания прорези гряды, сформировавшиеся на ее дне, отличаются по размерам и плановой форме от гряд, наблюдающихся на этом же участке до создания прорези.

Результаты экспериментов № 1 и 2 показали, что гряды на дне капитальной прорези имеют меньшие абсолютные размеры, чем гряды, сформированные ранее при рельефе дна без прорези. Разница в абсолютной высоте и длине не так значительна (составляет всего 7 % и 9 %). Однако относительные размеры гряд различаются в 2 раза. Отношение высоты гряд к глубине потока в прорези (относительная высота гряд) равно 0,07, тогда как до создания прорези это отношение составляло 0,14. Отношение длины гряд к глубине потока также уменьшилось примерно в 2 раза: с 1,63 до 0,76. В обоих экспериментах рельеф дна состоял из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. Под грядами расположены волны II уровня, которые имеют длины, в 3–4 раза превышающие длины гряд, а их высоты меньше гряд на 10–30 %. Ниже формируются волны III уровня, их длины в 3–4 раза больше вышерасположенных волн, а высоты меньше на 10–30 %. Из этого можно сделать вывод о том, что размеры волн II и III уровней зависят в первую очередь от размеров гряд. При уменьшении гряд в условиях прорези волны также уменьшаются.

В работе по исследованию иерархии гряд [6] была выявлена аналогичная иерархическая структура руслового рельефа. Волны II уровня, как в натурных, так и в экспериментальных условиях, были длиннее гряд в 3–4 раза. Однако в условиях реального речного рельефа волнами III уровня могут являться зарождающиеся средние русловые формы либо иные формы, образование которых вызвано влиянием внешних факторов. Таким образом, волны III уровня в натурных условиях могут не соответствовать полученным в ходе экспериментов зависимостям. Размеры волн III уровня будут соответствовать найденным зависимостям только в том случае, если они будут формироваться в исходных условиях ровного песчаного дна. Все указанные особенности рельефа

дна прорези необходимо учитывать при проектировании дноуглубительных работ. Так, например, при проектировании серии капитальных дноуглубительных прорезей на участке р. Волги от Городца до Н. Новгорода [8] следует учитывать, что при больших длинах прорезей их рельеф будет состоять из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. Наличие всех указанных форм будет приводить к потере гарантированной глубины.

В результате моделирования условий побочного рельефа дна с эксплуатационной прорезью в районе переката были сделаны следующие наблюдения. Рельеф дна прорези состоит из двумерных гряд, тогда как за границами прорези гряды трехмерные. В свободной части прорези абсолютные высоты гряд 10–20 % меньше, чем высоты гряды, которые были на этом же участке до создания прорези. Относительные высоты гряд в прорези составляют в среднем 0,06, тогда как до создания прорези этот показатель был в 2 раза больше и равен 0,12. Необходимо отметить, что гряды в верхней занесенной части прорези имеют такие же размеры, как и гряды на этом же участке до создания прорези, тогда как на границе между верхней и нижней частью прорези происходит постепенное занесение, и высоты гряд растут, т. е. по мере занесения прорези и повышения отметок дна гряды восстанавливают свою высоту.

На основе проведенных наблюдений можно сделать вывод о том, что в случае создания эксплуатационной прорези в районе переката следует ожидать, что размеры гряд в границах прорези будут отличаться в меньшую сторону по сравнению с ранее наблюдавшимися грядами на бытовом дне. Рельеф в прорези будет иметь волновые формы, расположенные под грядами. Эти особенности грядового рельефа необходимо учитывать при определении потери гарантированной глубины в прорези.

Для понимания причин нестандартных зависимостей между параметрами гряд и потока в условиях прорези необходимы детальные исследования скоростного поля потока и турбулентных вихрей. Дальнейшие исследования должны сопровождаться подробными измерениями турбулентной структуры потока.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают признательность коллективу русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института за помощь в проведении исследования. Особую благодарность авторы выражают лаборанту В. А. Черненко, оказавшему помощь в проведении измерений в гидравлическом лотке, а также коллективу кафедры водных путей и водных изысканий ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и в особенности заведующему кафедрой Г. Л. Гладкову за консультации в ходе проведения исследования, а также предоставление результатов наблюдений за рельефом р. Пур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: моногр. / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2019. — 432 с. — EDN WIKSCS.
2. Петровская О. А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. ... канд. техн. наук / Ольга Андреевна Петровская. — СПб.: Государств. гидрологический ин-т, 2018. — С. 252.
3. Гладков Г. Л. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63. — EDN VUSNQA.
4. Гладков Г. Л. Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев, Ю. П. Соколов. — СПб., ГУВК, 2005. — EDN QNTIMB.
5. Католиков В. М. Проблемы моделирования деформаций речных русел с учетом дискретного характера транспорта руслоформирующих наносов в реках / В. М. Католиков // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической

конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 44–57 — EDN KKZJQC.

6. Заварзин Р. В. Учет иерархии русловых форм при выполнении дноуглубительных работ в руслах судоходных рек / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: сборник тезисов докладов VII Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 22 мая 2024 года. — Москва: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2024. — С. 122–123. — EDN DZVXHF.

7. Сидорчук А. Ю. Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд / А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42. — № 1. — С. 31. DOI: 10.7868/S0321059615010137. — EDN TCJCEN.

8. Алексеевский Н. И. Морфология и динамика активных гряд в русле реки Терек / Н. И. Алексеевский, А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 147–157. DOI: 10.7868/S0321059617010035. — EDN YIVSNF.

9. Гладков Г. Л. Гидроморфологический режим и судоходные условия в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла: проблема и пути решения / Г. Л. Гладков, К. П. Моргунов, П. А. Гарибин, М. А. Колосов // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 4(95). — С. 24–30. — EDN RDPPUJ.

10. Воронина Ю. Е. Методические подходы оценки заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС и их влияние на обеспечение судоходных глубин участка / Ю. Е. Воронина // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 198–207. DOI: 10.37890/jwt.vi72.294. — EDN JLDMAQ.

11. Калашиников А. А. Проектные решения при устройстве дноуглубительных прорезей / А. А. Калашиников // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306. — EDN QIRXLU.

12. Беликов В. В. Математическая модель транспорта наносов для расчета заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров / В. В. Беликов, Н. М. Борисова, Г. Л. Гладков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — Т. 2. — С. 105–113. — EDN KCPIQX.

13. Гладков Г. Л. Обеспечение устойчивости русел судоходных рек при дноуглублении и разработке русловых карьеров: автореф. дис. ... техн. наук; специальность: 05.22.17 «Водные пути сообщения и гидрография» / Геннадий Леонидович Гладков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — EDN ZJNNDL.

14. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса: монография / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-история, 2011. — 504 с. — EDN QKKGJD.

15. Liu D. The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user's perspective / D. Liu, K. Alobaidi, M. Valyrakis // Acta Geophysica. — 2022. — Vol. 70. — Is. 5. — Pp. 2297–2310.

16. Католиков В. М. Экспериментальные исследования побочного типа руслового процесса: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология» / Виктор Михайлович Католиков. — СПб., Гос. гидролог. институт, 2000. — 24 с. — EDN QDGADV.

17. Best J. The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions / J. Best // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. — 2005. — Vol. 110. — Is. F4. DOI: 10.1029/2004JF000218.

18. Gyr A. Bed forms in turbulent channel flow / A. Gyr, W. Kinzelbach // Applied Mechanics Reviews. — 2004. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 77–93. DOI: 10.1115/1.1584063.

19. Best J. Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field / J. Best // Fluvial Sedimentology VII — John Wiley & Sons, Ltd, 2005. — С. 41–60. DOI: 10.1002/9781444304350.ch3.

20. Костюченко А. А. Особенности процесса и стока донных наносов малых рек / А. А. Костюченко, З. Д. Копалиани // VI Всероссийский гидрологический съезд. Секция 6, 2006. — С. 44–49.

REFERENCES

1. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd edition. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

2. Petrovskaya O. A. Optimizatsiya metodov rascheta raskhoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskiy parametrov rek. PhD diss. SPb.: Gosudarstv. Hidrologicheskiy in-t, 2018.

3. Gladkov, Gennadii L. and P. V. Beljakov. "Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.

4. Gladkov, G. L., M. V. Zhuravlev and Yu. P. Sokolov *Environmental impact assessment of engineering activities on navigable rivers*. Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education St. Petersburg State University of Water Communications. St. Petersburg: A. Kardakov Publishing House, 2005.

5. Katolikov, V. M. "Problems of modeling deformations of river channels in the light of discrete character of transport of bedload in rivers." *Vodnye puti i usloviye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2023: 44–57.

6. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov. "Uchet ierarkhii uslovykh form pri vypolnenii dnouglubitel'nykh rabot v ruslakh sudokhodnykh rek." *Sovremennyye problemy gidravliki i gidrotekhnicheskogo stroitel'stva: Cbornik tezisov dokladov VII Vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo seminara, Moskva, 22 maya 2024 goda*. Moskva: Izdatel'stvo: MISI–MGSU, 2024: 122–123.

7. Sidorchuk, A. Yu. "Otsenka stoka vlekomykh nanosov v rechnom rusle s uchetoм dannyykh ob aktivnoy i passivnoy dinamike gryad." *Vodnye resursy* 42.1 (2015): 31. DOI: 10.7868/S0321059615010137.

8. Alekseevskiy, N. I. and A. Yu. Sidorchuk. "Morphology and dynamics of active bed forms in the Terek R. Channel." *Vodnye resursy* 44.2 (2017): 147–157. DOI: 10.7868/S0321059617010035.

9. Gladkov, G. L., K. P. Morgunov, P. A. Garibin and M. A. Kolosov. "Hydro-morphological regime and navigability in the after bay of the Nizhnii Novgorod waterpower development: problem and solutions." *Transport Rossiyskoy Federatsii* 4(95) (2021): 24–30.

10. Voronina, Yu. E. "Methodological approaches to assessing the siltation of rifts in the downstream section of the Nizhny Novgorod HPP and their impact on ensuring navigable depths of the site". *Russian journal of water transport* 72 (2022): 198–207. DOI: 10.37890/jwt.vi72.294.

11. Kalashnikov, A. A. "Design solution for the dredging slots production." *Russian journal of water transport* 72 (2022): 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306.

12. Belikov, V. V., N. M. Borisova and G. L. Gladkov. "Matematicheskaya model' transporta nanosov dlya rascheta zanosimosti dnouglubitel'nykh prorezey i uslovykh kar'erov." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 2 (2010): 105–113.

13. Gladkov, G. L. Obespechenie ustoychivosti rusel sudokhodnykh rek pri dnouglublenii i razrabotke uslovykh kar'erov. Grand PhD diss. Sankt-Peterburg, 1996.

14. Klaven, A. B., Z. D. Kopalani; A. B. Klaven and Z. D. Kopalani. *Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes*. Sankt-Peterburg: Obschestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Nestor-Istoriya", 2011: 504.

15. Liu, D., K. Alobaidi and M. Valyrakis. "The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user's perspective." *Acta Geophysica* 70.5 (2022): 2297–2310.

16. Katolikov, V. M. Eksperimental'nye issledovaniya pobochneвого tipa uslovogo protsesssa. PhD diss. Sankt-Peterburg, 2000.

17. Best, J. "The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110.F4 (2005). DOI: 10.1029/2004JF000218.

18. Gyr, A. and W. Kinzelbach. "Bed forms in turbulent channel flow ." *Applied Mechanics Reviews* 57.1 (2004): 77–93. DOI: 10.1115/1.1584063.

19. Best, J. "Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field." *Fluvial Sedimentology VII* John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 41–60. DOI: 10.1002/9781444304350.ch3.

20. Kostychenko, A. A. and Z. D. Kopalani "Features of the process and flow of bottom sediments in small rivers." *Reports of the VI All-Russian Hydrological Congress. — Section 6. — Problems of channel processes, erosion and sedimentation*, 2006: 44–49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Заварзин Руслан Витальевич —
младший научный сотрудник
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23
e-mail: zavarzr@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zavarzin, Ruslan V. —
junior researcher
State Hydrological Institute
23 2nd line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg, 199004,
Russian Federation
e-mail: zavarzr@gmail.com

Католиков Виктор Михайлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23
e-mail: v.katolikov@mail.ru

Katolikov, Viktor M. —
PhD, professor
State Hydrological Institute
23 2nd line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg, 199004,
Russian Federation
e-mail: v.katolikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09 января 2025 г.

Received: Jan. 9, 2025.

STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM OF A MARINE VESSEL IN DYNAMIC POSITIONING MODE AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION

I. M. Movchan, D. A. Oskin

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

Currently, dynamic positioning and low-speed maneuvering systems are increasingly in demand and necessary for safe maritime activities. Dynamic positioning systems are widely used mainly in the oil and gas industry, but also in supply vessels, barges and drilling rigs, ocean liners, and cargo ships. The development and analysis of control systems for the effective operation of a ship's control system with dynamic positioning requires the use of a mathematical model of the vessel, on the basis of which a study of synthesized control systems is carried out. The article proposes a general structure for modeling the control system for a vessel with dynamic positioning. The control system is represented by a set of a control object (in our case, a marine vessel), a command input device, a control device (controller), and an information and measuring system. The article considers a mathematical model of plane-parallel motion of a vessel, describing the movement of a vessel in three generalized coordinates: surge, sway, and yaw. As an example, two types of vessels with different propulsion systems are considered: a vessel equipped with two aft azimuth thrusters and a bow tunnel thruster, and a similar vessel, but equipped with a bow azimuth thruster. The forces generated by the propulsion devices of ships are determined through the connection with generalized forces and moments via the thrust allocation matrix for the corresponding kinematic scheme. The given propulsion schemes provide the possibility of holding the vessel in dynamic positioning mode. The description of mathematical models is presented in the form of vector-matrix nonlinear differential equations. The mathematical apparatus used to represent mathematical models of ships allows the use of models for the synthesis and modeling of control systems. The structure of the software implementation of the control system, developed in the Matlab environment, a description of the developed modules, and simulation results are presented.

Keywords: marine vessel, control system, dynamic positioning, low-speed maneuvering, mathematical model, plane-parallel motion, PID control.

For citation:

Movchan, Ivan M. and D. A. Oskin "Structure of the control system of a marine vessel in dynamic positioning mode and its software implementation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 49–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-49-60.

УДК: 656.61, 519.876.2

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ СУДНОМ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

И. М. Мовчан, Д. А. Оськин

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

Темой исследования являются все более востребованные в настоящее время для безопасной морской деятельности системы динамического позиционирования и низкоскоростного маневрирования. Отмечается, что широкое применение системы динамического позиционирования находят не только в нефтегазовой промышленности, но также и на судах снабжения, баржах и буровых установках, океанских лайнерах и грузовых судах. Разработка и анализ систем управления для эффективной работы системы управления судном с динамическим позиционированием требует использования его математической модели, на основе которой производится исследование синтезированных систем управления. В статье предлагается для моделирования общая структура системы управления судна с динамическим позиционированием. Система управления представлена совокупностью объекта управления (в данном случае морского судна), задающего устройства, устройства управления (контроллера), а также информационно-измерительной системы.

В статье рассмотрена математическая модель плоскопараллельного движения судна, описывающая движение судна в трех обобщенных координатах: поступательное продольное движение, боковой снос и рыскание. В качестве примера рассмотрены два типа судов с различными движительными системами: суда, оснащенные двумя кормовыми азимутальными винторулевыми колонками и носовым туннельным подруливающим устройством, и аналогичные суда, оборудованные носовой винторулевой колонкой. Упоры, формируемые движительными устройствами судов, определяются посредством связи с обобщенными силами и моментами через матрицу тяги для соответствующей кинематической схемы. Приведенные движительные схемы обеспечивают возможность удержания судна в режиме динамического позиционирования. Описание математических моделей представлено в виде векторно-матричных нелинейных дифференциальных уравнений. Используемый для представления математических моделей судов математический аппарат позволяет использовать модели для синтеза и моделирования систем управления. Приведены структура программной реализации системы управления, выполненная в среде Matlab, описание разработанных модулей и результаты моделирования.

Ключевые слова: морское судно, система управления, динамическое позиционирование, низкоскоростное маневрирование, математическая модель, плоскопараллельное движение, ПИД-регулирование.

Для цитирования:

Мовчан И. М. Структура системы управления морским судном в режиме динамического позиционирования и ее программная реализация / И. М. Мовчан, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 17. — № 1. — С. 49–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-49-60. — EDN IHGRVG.

Введение (Introduction)

В настоящее время системы динамического позиционирования (ДП) и низкоскоростного маневрирования являются все более востребованными и необходимыми для безопасной морской деятельности. Динамическое позиционирование как процесс управления исследуется и разрабатывается начиная с 70-х гг. XX в. При этом основное внимание уделяется крупным судам, таким как суда снабжения, баржи и буровые установки, океанские лайнеры и грузовые суда в основном для нефтегазовой промышленности. Данная технология позволяет судну в автоматическом режиме удерживать заданный локационный режим без привязки к якорю или внешним воздействиям, что делает ее особенно актуальной в условиях ограниченных маневровых пространств и нестабильных погодных условий.

Суда с возможностями динамического позиционирования пользуются большим спросом как из-за их гибкости, так и из-за хорошей способности сохранять свое местоположение с высокой точностью. Подобные системы применимы также и для маломерных судов и могут быть полезными для улучшения качества управления судами. В условиях увеличения эксплуатационных расходов важно, чтобы суда на месте могли выполнять операции также в более суровых условиях окружающей среды, тем самым максимально увеличивая время эксплуатации [1], [2].

Предметом исследования является программная реализация модели системы управления судном, оснащенным системой динамического позиционирования. В настоящей работе использована математическая модель плоскопараллельного движения судна, управляемого различными движительными системами. Система управления программно реализована в виде ПИД-регулятора. Разработка предназначена для моделирования управляемого движения судна в режиме низкоскоростного маневрирования и динамического позиционирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе [1] отмечается, что система ДП представляет многоконтурную систему управления активными средствами управления (движительным комплексом), обеспечивающую заданное положение судна или его перемещение по выбранной траектории при действии внешних сил, сочетающую три комплекса устройств: измерительного, информационно-командного и движительно-рулевого.

Для моделирования системы ДП рассмотрим структуру, представленную на рис. 1. Предложенная структурная схема представляет собой совокупность объекта управления (в данном

случае морского судна (МС)), оснащенного движительным комплексом, и элементов системы управления: задающего устройства, устройства управления (контроллера), информационно-измерительной системы.

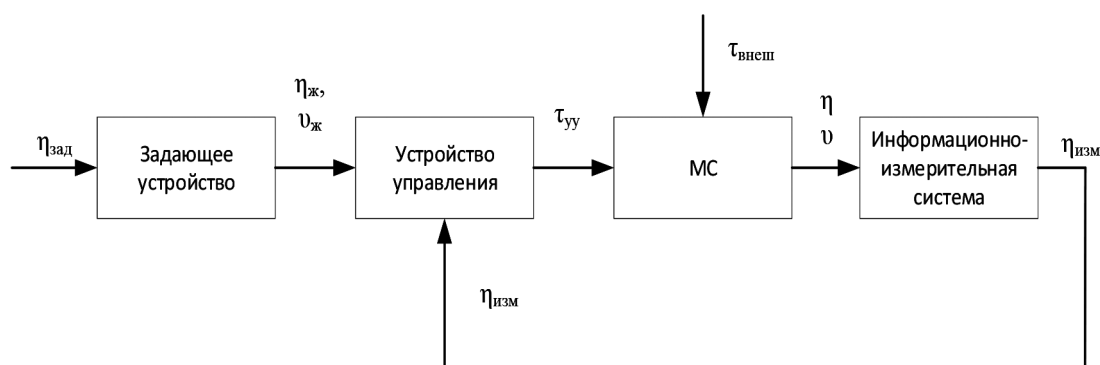


Рис. 1. Структурная схема системы управления судном с системой динамического позиционирования

Модель маневрирования судна в режиме трех степеней свободы. При решении задач навигации, ориентации и управления морскими судами используются разные системы координат. На рис. 2, а приведена так называемая *промежуточная земная, или полусвязная система координат* $Ox_g y_g z_g$, характеризующаяся тем, что ее начало совмещено с центром масс и перемещается с ним в пространстве. Оси ориентированы таким образом, что ось Ox_g ориентирована на север. В математических моделях судов также используется подвижная система координат, полностью связанная с его корпусом и перемещающаяся вместе с ним.

Начало координатных осей обычно располагается в центре инерции аппарата, а оси совпадают с главными центральными осями инерции. В рассматриваемом случае подвижная система координат $Oxyz$ привязана к центру масс судна. Координатная ось Ox всегда направлена по ходу движения судна, т. е. повернута в горизонтальной плоскости на угол заданного курса судна (рис. 2, б).

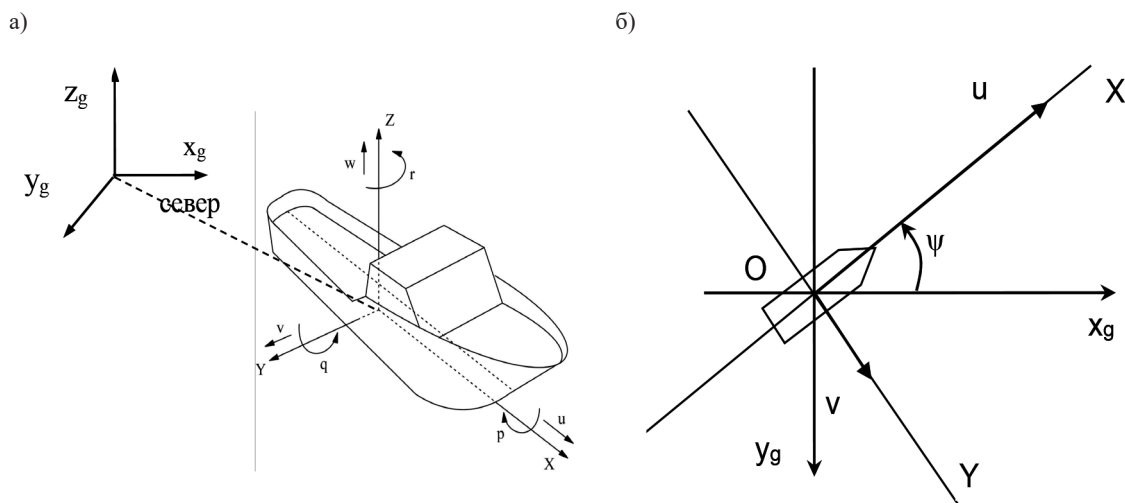


Рис. 2. Модели судна: а — трехмерная модель судна и системы координат (общий вид); б — модель движения судна в горизонтальной плоскости (вид сверху)

Полная модель маневрирования судна содержит дифференциальные уравнения движения в шести степенях свободы, обозначаемых как продольное движение, боковой снос и вертикальная качка для определения положения судна, а также крен, дифферент и рыскание для определения ориентации судна (табл. 1).

Таблица 1

Обозначения, используемые для кинематических моделей морского судна

Описание движения	Координаты и углы Эйлера		Линейные и угловые скорости	
Продольное движение (вдоль оси Ox)	x	η_1	u	v_1
Боковой снос (вдоль оси Oy)	y		v	
Вертикальная качка (вдоль оси Oz)	z		w	
Крен (вращение вокруг оси Ox)	φ	η_2	p	v_2
Дифферент (вращение вокруг оси Oy)	θ		q	
Рыскание (вращение вокруг оси Oz)	ψ		r	

Вектора линейной и угловой скорости (v_1, v_2) относительно системы координат $Oxyz$ могут быть преобразованы, соответственно, в вектора линейной и угловой скорости в фиксированной системе отсчета $Ox_g y_g z_g$ ($\dot{\eta}_1, \dot{\eta}_2$):

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $R_1(\eta_1), R_2(\eta_2)$ — функции углов Эйлера.

Для определения динамических параметров экспериментального морского автономного или дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) воспользуемся упрощенными уравнениями, исходя из предположения, что движения судна ограничены только в горизонтальной плоскости, т. е. креном ($p = 0$) и дифферентом ($q = 0$) можно пренебречь. Перемещение, соответствующее вертикальной качке (вдоль оси Oz), пренебрежимо мало ($w = 0$). Таким образом, рассматриваемое движение судна является плоскопараллельным: поступательное движение вдоль оси Ox , боковой снос (вдоль оси Oy) и рыскание. Уравнения плоскопараллельного движения описывают поступательные движения (вдоль оси OE), рыскание (вращение вокруг оси Oz) и боковой снос (вдоль оси Oy):

$$\eta = [x \ y \ \psi]^T, \quad v = [u \ v \ r]^T.$$

В [3] выполнен обзор и анализ математических моделей движения судов, управляемых с помощью одной или двух винторулевых колонок, и основные задачи, решаемые с помощью данных моделей. При этом для решения задачи ДП такой кинематической схемы не всегда достаточно, поэтому далее рассмотрены математические модели судов, обладающих также носовыми управляющими устройствами.

В ряде работ [4]–[7] приведено описание математической модели судна в виде следующих соотношений:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\eta)v; \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_{yy} + \tau_{вн}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tau_{yy} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — матрица управляющих сил и моментов;

$\tau_{yy} = \begin{bmatrix} F_x & F_y & M_z \end{bmatrix}^T$, $\tau_{вн} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — матрица внешних воздействий;

$R(\eta)$ — матрица вращения относительно оси Oz .

Матрица вращения относительно оси Oz представлена в виде

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица инерции $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ представляет собой сумму матрицы инерции твердого тела M_{RB} и гидродинамической добавленной массы M_A :

$$M = M_{RB} + M_A, \quad (4)$$

$$\text{где } M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix}; M_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{r}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix}.$$

Матрица $C(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ состоит из кориолисовой и центробежной составляющих $C_{RB}(v)$, дополненной матрицей гидродинамических составляющих $C_A(v)$:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v), \quad (5)$$

$$\text{где } C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}; C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u \\ -Y_v v - Y_r r & X_u u & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица $D(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ состоит из демпфирующих сил, которые обычно моделируются как сумма постоянных D_L и некоторых зависящих от скорости составляющих $D(v)$:

$$D(v) = D_L + D(v), \quad (6)$$

$$\text{где } D_L = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{bmatrix}; D_n(v) = \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v|v}|v| - Y_{r|v}|r| & -Y_{v|r}|v| - Y_{r|r}|r| \\ 0 & -N_{v|v}|v| - N_{r|v}|r| & -N_{v|r}|v| - N_{r|r}|r| \end{bmatrix}.$$

В приведенных соотношениях (4)–(6) приняты следующие условные обозначения: m — масса судна, x_G — расстояние от центра вращения (ЦВ) до центра тяжести (ЦТ), I_z — момент инерции относительно оси Oz ;

$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$ — гидродинамические коэффициенты присоединенных масс и инерции;

X_u, Y_v, Y_r, N_r — гидродинамические коэффициенты присоединенных масс кориолисовой и центробежной составляющих;

$X_{u|u}, Y_{v|v}, Y_{r|v}, Y_{v|r}, Y_{r|r}, N_{v|v}, N_{r|v}, N_{v|r}, N_{r|r}$ — коэффициенты демпфирования.

Как отмечается в работе [6], для судна, работающего на скорости, близкой к нулевой (в режиме низкоскоростного маневрирования), принимается допущение $D_n(v) \approx 0$. Таким образом, приведенные уравнения (2)–(6) представляют собой математическую модель МС для плоскопараллельного движения, предназначенную для описания управляемого движения судна в режиме ДП. Модель является многосвязной и нелинейной. Нелинейность обусловлена наличием нелинейных функциональных связей в слагаемом $C(v)v$.

Математическая модель объекта управления является основополагающим элементом синтеза и моделирования систем управления и может быть реализована в широко применяющихся системах, таких как Matlab, Scilab, Simintech и др. [8]–[10].

Задающее устройство (ЗУ) используется для формирования желаемых перемещений судна $\eta_{\text{ж}} = [x_{\text{ж}}(t) \ y_{\text{ж}}(t) \ \psi_{\text{ж}}(t)]^T$ по заданной траектории $\eta_{\text{зад}} = [x_{\text{зад}}(t) \ y_{\text{зад}}(t) \ \psi_{\text{зад}}(t)]^T$ следования судна. ЗУ рекомендуется выбирать в виде звена третьего порядка [4], входной величиной которого являются заданная траектория $\eta_{\text{зад}}$, выходными — желаемые скорости $\dot{v}_{\text{ж}}$ и ускорения $\ddot{v}_{\text{ж}}$. Параметры ЗУ выбираются исходя из ограничений, накладываемых на скорости и ускорения перемещения МС и изменение его ориентации.

Информационно-измерительная система представляет собой совокупность информационных датчиков и системы сбора и передачи информации [11]. Измеренные координаты судна $\eta_{\text{изм}} = [x_{\text{изм}}(t) \ y_{\text{изм}}(t) \ \psi_{\text{изм}}(t)]^T$ поступают в устройство управления, где сравниваются с желаемыми.

Назначением устройства управления (контроллера) является выработка управляющих воздействий τ на исполнительные устройства объекта управления, в данном случае морского судна. Система распределения рассчитанных силовомоментных воздействий распределяется по движительным устройствам таким образом, чтобы получить требуемое усилие управления. В работе рассмотрены два типа судов с различными кинематическими схемами расположения тяговых устройств. Первый тип судна представлен двумя кормовыми винторулевыми колонками и носовым подруливающим устройством, второй — оснащен носовой винторулевой колонкой.

Внешние воздействия $\tau_{\text{внеш}}$ представляют собой ветроволновые воздействия, действующие на судно, а также течение. Внешние воздействия реализуются в виде формирующего фильтра второго порядка с поступающим на вход случайным сигналом с заданными параметрами¹.

Наиболее распространенными приводами для судов, использующих вращающиеся гребные винты, являются:

- азимутальные движители, которые могут использоваться как для управления, так и для приведения в движение (могут поворачиваться на 360° и, следовательно, создавать тягу в любом направлении);
- туннельные подруливающие устройства, которые могут создавать поперечную тягу и обычно устанавливаются на носу и корме судна, где создают наибольший момент (в основном используются для обеспечения низкоскоростного маневрирования).

На рис. 3 приведены две наиболее распространенные конфигурации движительных систем:

- с двумя кормовыми и одной носовой азимутальной ВРК [6];
- с двумя кормовыми азимутальными ВРК и носовым туннельным подруливающим устройством (ПДУ) [7].

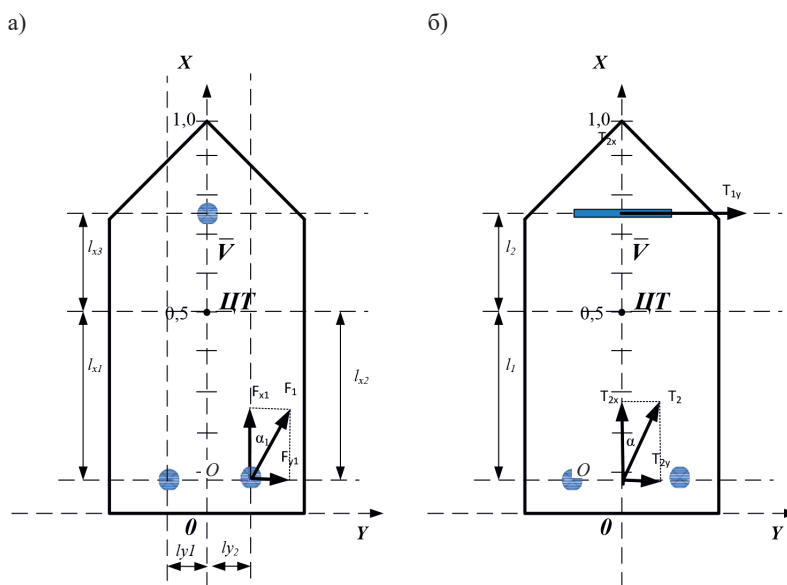


Рис. 3. Конфигурация движительных систем:

- α — три движителя — две кормовых и одна носовая ВРК (α_i — вектор угла поворота i -го движителя; F_i — вектор силы тяги i -го движителя; F_{xi} , F_{yi} — проекции вектора силы тяги i -го движителя в направлении осей Ox и Oy ; l_{xi} , l_{yi} — расстояние от центра тяжести (ЦТ) до i -го движителя в направлении осей Ox и Oy); б — две кормовых ВРК и носовое ПДУ (l_1 — расстояние от центра вращения (ЦТ) до туннельного двигателя ПДУ; l_2 — расстояние от ЦТ до двигателя ВРК; T_{2x} , T_{2y} — соответственно продольная и поперечная силы тяги ВРК; T_{1y} — поперечная сила тяги туннельного двигателя ПДУ; α — угол отклонения движителя ВРК относительно диаметральной плоскости судна

¹ Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.

Для определения сил и моментов, оказываемых движителями на судно $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, настраивается матрица конфигурации тяги. Для этого предполагается, что ЦТ известна и определена, а также известно положение каждого двигателя относительно этой точки. Силы и моменты, действующие на судно, теперь определяются в виде

$$\tau = T(\alpha)F. \quad (7)$$

Здесь $\alpha \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — вектор азимутальных углов;

$T(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ — матрица конфигурации двигателя малой тяги, где $F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — усилие, создаваемое движителями.

Для системы с тремя степенями подвижности и геометрией движителей, представленной на рис. 3, а, размерности будут следующие: $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $U \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ и $T(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Матрица конфигурации тяги для каждого двигателя записывается в виде

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} T(\alpha_1) & T(\alpha_2) & T(\alpha_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\alpha_1) & c(\alpha_2) & c(\alpha_3) \\ s(\alpha_1) & s(\alpha_2) & s(\alpha_3) \\ l_{x1}s(\alpha_1) & l_{y2}c(\alpha_2) - l_{x2}s(\alpha_2) & l_{y3}c(\alpha_3) - l_{x3}s(\alpha_3) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T$ — азимутальные углы;

$u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T$ — управляющие входные данные.

Конфигурация тяги судна выводится из сил и моментов из уравнений движения, определяемых в виде $\tau = [F_x \quad F_y \quad M_z]^T$.

Из рис. 3, б видно, что туннельный двигатель ПДУ обеспечивает силу поперечной тяги и угловой момент рыскания, а двигатель ВРК, в зависимости от его угла относительно диаметральной плоскости судна, обеспечивает силу продольной и поперечной тяги, а также угловой момент рыскания.

Угловой импульс рыскания является результатом произведения сил тяги T_{1y} и T_{2y} и соответствующих плеч l_1 и l_2 от центра вращения судна, как показано на рис. 3, б, откуда можно определить силы и моменты:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_2 \cos(\alpha) \\ f_1 \sin(\alpha) + f_1 \\ f_2 l_2 \sin(\alpha) + f_1 l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} + T_{1y} \\ T_{2y} l_2 + T_{1y} l_1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Приведенные уравнения математической модели судна являются нелинейными, что затрудняет их использование для синтеза систем управления традиционными методами. Как правило, в системах динамического позиционирования используются пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы, методы настройки которых достаточно хорошо известны для линейных систем. Для нелинейных систем нахождение оптимальных коэффициентов ПИД-регуляторов затруднено, поэтому используются, как правило, упрощенные линеаризованные модели. Однако наряду с этим также используются методы адаптивного управления, позволяющие выполнять непрерывную подстройку параметров регуляторов для обеспечения качества управления.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности рассмотренной системы управления (см. рис. 1) в среде Matlab^{2,3} выполнена программная реализация в виде совокупности основных (табл. 2) и дополнительных модулей, реализующих вспомогательные функции.

² Андриевский Б. Р. Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab. СПб.: Наука, 2001. 286 с.

³ Ощепков А. Ю. Математическое и компьютерное моделирование современных систем автоматического управления: учеб. пособие [для вузов]. СПб.: Лань, 2024. 252 с.

Таблица 2

Описание основных модулей программной реализации

Модуль	Функциональное назначение
parameters.m	Модуль задания параметров. Предназначен для инициализации параметров модели системы управления: параметры матриц объекта управления, задающего устройства, движителей, контроллера, внешних воздействий. Используемые переменные описаны как глобальные для возможности использования во всех модулях.
odefun.m	Модуль правых частей дифференциальных уравнений. Предназначен для представления описания правых частей дифференциальных уравнений, описывающих систему управления. Используется как параметр решателя дифференциальных уравнений. Используемые переменные пространства состояний (в обозначениях в программном модуле): $q(1) — q(6)$ — уравнения объекта управления: $q(1) — q(3)$ — положения (x, y) и ориентация (ψ) МС; $q(4) — q(6)$ — скорости поступательного движения (u, v) и рыскания (r) МС; $q(7) — q(15)$ — уравнения задающего устройства: $q(7) — q(9)$ — желаемые положения (x_d, y_d) и ориентация (ψ_d); $q(10) — q(12)$ — желаемые скорости $(u_{\text{ж}}, v_{\text{ж}}, r_{\text{ж}})$; $q(13) — q(15)$ — желаемые ускорения $(\dot{u}_{\text{ж}}, \dot{v}_{\text{ж}}, \dot{r}_{\text{ж}})$; $q(16) — q(18)$ — вспомогательные уравнения интегральной составляющей (для реализации ПИД-регулятора); $q(19) — q(24)$ — уравнения формирующего фильтра, моделирующего внешние воздействия. В модуле реализован расчет управляющих воздействий, формируемых в устройстве управления (используется в совокупности с уравнениями объекта управления).
main.m	Основной модуль программы. Предназначен для вызова модуля инициализации параметров модели системы управления parameters.m, задания параметров решателя дифференциальных уравнений и его вызова. По окончании расчета отображает графики переменных состояния, управляющих воздействий и пространственной траектории движения моделируемого судна (заданной и полученной в результате моделирования).

Для моделирования приняты следующие параметры экспериментального модельного судна [6]:

$$m = 257 \text{ кг}, x_G = 0 \text{ м}, I_z = 297,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$X_u = 6,95, Y_v = 49,5, Y_r = 7,00, N_{\dot{r}} = 24,48;$$

$$X_u = 91,53, Y_v = 3,96, Y_r = 83,41, N_r = 89,52.$$

Для демонстрации работы программы предлагается следующий сценарий: судно перемещается в заданные моменты времени в точки, расположенные по углам квадрата с длиной стороны, равной 2 м. При этом также меняется пространственная ориентация корпуса. Моделирование выполнено на интервале 300 с.

Заданные траектории движения:

$$\eta_{\text{зад}} = \begin{cases} x_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0 \text{ м, если } t \leq 10 \text{ с} \\ \text{или} \\ 2 \text{ м, если } t \geq 140 \text{ с;} \end{cases} \\ y_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0 \text{ м, если } t \leq 60 \text{ с} \\ \text{или} \\ -2 \text{ м, если } t \geq 190 \text{ с;} \end{cases} \\ \psi_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0, \text{ если } t \leq 120 \text{ с} \\ \text{или} \\ \pi / 4, \text{ если } t \geq 180 \text{ с.} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

На рис. 4 приведены графики переходных процессов по положению и скорости при изменении пространственных координат и ориентации морского судна по заданным траекториям.

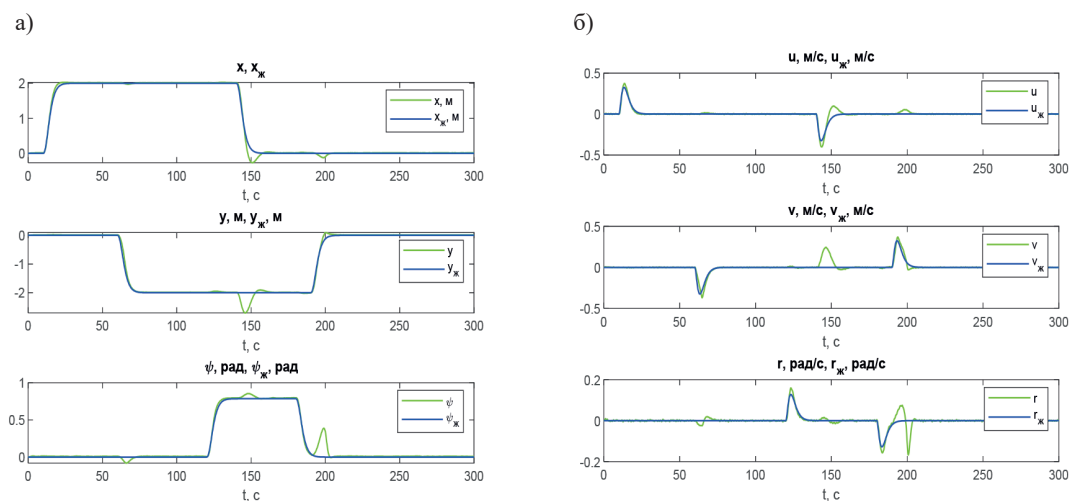


Рис. 4. Желаемые и измеренные положения (а) и скорости (б)

Для стабилизации в системе управления используется ПИД-регулятор в каждом отдельном канале управления. На рис. 5 приведены сигналы управления по каждому каналу. Итоговый результат пространственного движения приведен на рис. 6.

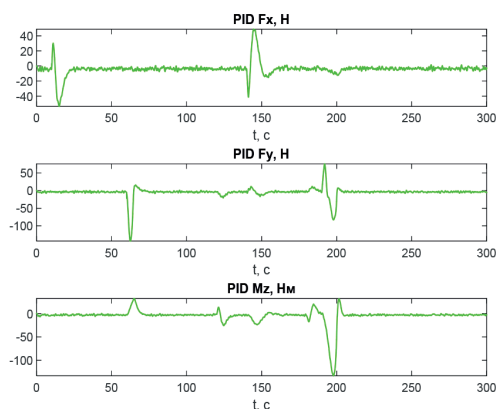


Рис. 5. Сигналы управления (ПИД-регулятор)

Итоговый результат пространственного движения приведен на рис. 6.

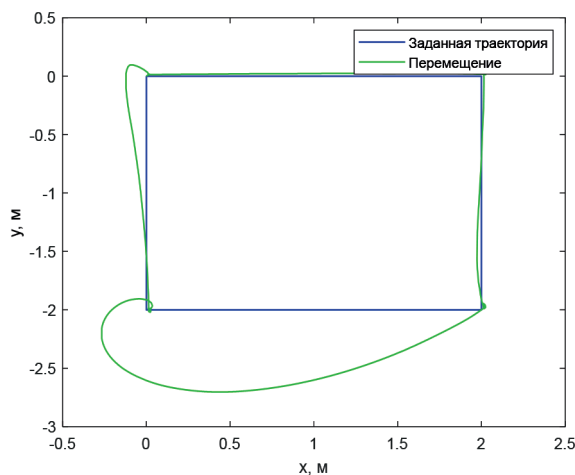


Рис. 6. Пространственные траектории движения

Предложенная программная реализация позволяет продемонстрировать применение модели в системе управления и позволит при соответствующем расширении функционала провести исследование альтернативных алгоритмов управления, построенных с использованием принципов адаптации или интеллектуальных технологий и методов машинного обучения.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрена система управления морским судном в режиме динамического позиционирования и описание ее основных элементов. Представлена модель плоскопараллельного движения судна, используемая в системе управления. Модель, представленная в векторно-матричной форме, является нелинейной в связи с отражением сложных гидродинамических взаимодействий корпуса и движительных устройств с внешней средой. Продолжением исследования является совершенствование или модернизация адаптивных методов управления, реализуемых совместно с методами параметрической идентификации моделей для использования их в задачах синтеза систем управления. Также в ходе дальнейшего исследования планируется решение задачи распределения управляющих воздействий, формируемых устройством управления движительных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархата А. В. Структура и принципы работы систем динамического позиционирования // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. — 2009. — Т. 12. — № 2. — С. 255–258. — EDN KPYRBR.
2. Никитин Е. Д. Анализ и структура систем динамического позиционирования судов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2017. — № 3(21). — С. 85–90. — EDN YPMWQO.
3. Оськин Д. А. Математические модели динамики судов, оснащенных винторулевыми колонками // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 3. — С. 124–132. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132. — EDN ZDREJJ.
4. Fossen T. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / T. Fossen — John Wiley & Sons Ltd, 2011 DOI: 10.1002/9781119994138.
5. Liu Z. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges / Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, C. Yuan // Annual Reviews in Control. — 2016. — Vol. 41. — Pp. 71–93. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
6. Alfheim H. L. Development of a dynamic positioning system for the revolt model ship / H. L. Alfheim, K. Muggerud, M. Breivik, E. F. Brekke, E. Eide, Ø. Engelhardtzen // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 29. — Pp. 116–121. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.479.

7. Øien S. I. T. Dynamic Positioning for Small Autonomouse Surface Vessels: MS diss / S. I. T. Øien. — NTNU, 2016. — 139 p.
8. Donnarumma S. Numerical models for ship dynamic positioning / S. Donnarumma, M. Martelli, S. Vignolo // MARINE VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. — CIMNE, 2015. — Pp. 1078–1088.
9. Таушева У. А. Математическая модель судна для отладки системы управления динамическим позиционированием судна средствами SIMINTECH // Системы управления и обработки информации. — 2018. — № 1(40). — С. 44–49. — EDN YUDZGO.
10. Калинин И. М. Компьютерная модель системы динамического позиционирования судна // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 4(394). — С. 109–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-109-120. — EDN YHEZCX.
11. Оськин Д. А. Информационно-управляющая система сбора и передачи информации для безэкипажного судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 2. — С. 24–31. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-24-31. — EDN MUSCNQ.

REFERENCES

1. Barakhta, A. V. and Yu. I. Yudin “Structure and principles of dynamic positioning systems’ work.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.2 (2009): 255–258.
2. Nikitin, E. D., T. V. Timochkina, V. A. Miklush and N. V. Yagotintseva “D. Analiz i struktura sistem dinamicheskogo pozitsionirovaniya sudov.” *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 3(21) (2017): 85–90.
3. Oskin, D. A., V. V. Bocharova and S. V. Osipov “Mathematical models of dynamics of vessels equipped with power propellers.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* 3 (2023): 124–132. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132.
4. Fossen, Thor I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Willy & Sons Ltd (2011). DOI: 10.1002/9781119994138.
5. Liu, Zhixiang, et al. “Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges.” *Annual Reviews in Control* 41 (2016): 71–93. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
6. Alfheim, Henrik Lemcke, et al. “Development of a dynamic positioning system for the revolt model ship.” *IFAC-PapersOnLine* 51.29 (2018): 116–121. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.479.
7. Øien, Stein-Inge Torset. Dynamic Positioning for Small Autonomouse Surface Vessels. MS diss. NTNU, 2016.
8. Donnarumma, S., M. Martelli and S. Vignolo. “Numerical Models for Ship Dynamic Positioning.” *MARINE VI: Proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. CIMNE, 2015: 1078–1088.
9. Tausheva, U. A. “Mathematical model of a vessel for debugging of vessel’s dynamic positioning control system by means of SIMINTECH facilities.” *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* 1(40) (2018): 44–49.
10. Kalinin, I. M., M. K. Ivanova, L. G. Pautov and A. V. Rudetskij “Computer model of the ship’s dynamic positioning system.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 4(394) (2020): 109–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-109-120.
11. Oskin, D. A., A. A. Gorshkov, S. A. Klimenko and N. A. Pogodin “Information and control system of collecting and transmitting data for unmanned vessel.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2 (2021): 24–31. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-24-31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мовчан Иван Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Оськин Дмитрий Александрович
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: movchan@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Movchan, Ivan M. — Postgraduate
Supervisor:
Oskin, Dmitry A.
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: movchan@msun.ru

Оськин Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: osykinda@msun.ru

Oskin, Dmitry A.
PhD, associate professor
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: osykinda@msun.ru

*Статья поступила в редакцию 04 декабря 2024 г.
Received: Dec. 04, 2024.*

WIND REGIME CHANGES ON THE SHIPPING ROUTES OF THE RUSSIAN SEAS AT THE END OF THE 20TH – BEGINNING OF THE 21ST CENTURIES

S. A. Podporin

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

This article aims to assess wind regime variations in the Russian seas and identify shipping and fishing areas where the frequency of dangerous winds showed statistically significant upward trends. The assessment is based on ERA-5 global atmospheric reanalysis data on hourly mean wind velocity from 1991–2020. The methodology employed standard statistical methods for data processing. The results of the assessment of increased storm risks across all Russian seas are summarized in a table. The study confirms that the wind regime in the Russian seas is non-stationary and responds to global climate variations. The most dynamic changes in wind conditions occur in the open seas (Bering, Barents), which have free exchange with external seas and oceans. The greatest risks to shipping and fishing, associated with an increased frequency of dangerous winds given medium or high climatic norms for this indicator, were identified in the following areas: the northeastern part of the Black Sea, including approaches to the ports of Novorossiysk, Tuapse, and the Kerch Strait area (winter season); the Baltic Sea, including shipping lanes in its central part and the Gulf of Finland (winter season); the Barents Sea (winter-spring season); the southwestern part of the Bering Sea, including sections of transoceanic routes (winter season); and the northwestern sector of the Pacific Ocean, including sections of shipping lanes and fishing areas off the eastern coasts of Kamchatka and the Kuril Islands (winter-spring season). It is noted that ship crews and shipping company personnel should account for the increasing storm risks when planning navigation in these areas (especially those with harsh climates) and take measures to minimize them, including considering alternative routes. Emphasis is placed on the critical importance of the quality of training of ship crews for navigation in storm conditions, icing, steering failure, and assisting vessels in distress.

Key words: navigation safety, dangerous wind, storm, frequency, trend, climate change, risk, shipping lane, fishing area, navigation.

For citation:

Podporin, Sergey A. “Wind regime changes on the shipping routes of the Russian seas at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 61–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-61-74.

УДК 656.61.052: 551.553

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА СУДОХОДНЫХ ТРАССАХ МОРЕЙ РОССИИ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВВ.

С. А. Подпорин

Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

Целью работы является оценка изменений ветрового режима в морях России и выявление районов судоходства и рыболовства, в которых повторяемость опасных ветров статистически показала тенденции к повышению. Оценка выполнена на основе данных глобального атмосферного реанализа ERA-5 о среднечасовой скорости ветра в 1991–2020 гг. Методика исследования предполагала использование стандартных статистических методов обработки данных. Результаты оценки роста штормовых рисков по всем морям России представлены в виде итоговой таблицы. Подтверждено, что ветровой режим в российских морях не является стационарным и реагирует на глобальные климатические изменения. Наиболее динамичные изменения ветровой обстановки происходят в открытых морях (Берингово, Баренцево), имеющих свободное сообщение с внешними морями и океанами. Наибольшие риски для судоходства и рыболовства, связанные с повышением повторяемости опасных ветров при средней или высокой климатической норме данного показателя, выявлены в следующих районах: северо-восточная часть Черного моря, включая

подходы и портам Новороссийск, Туапсе, район Керченского пролива (зимний сезон); Балтийское море, в том числе трассы центральной части моря и Финского залива (зимний сезон); Баренцево море (зимне-весенний сезон); юго-западная часть Берингова моря, включая участки трансокеанских трасс (зимний сезон); северо-западный сектор Тихого океана, включая участки судоходных трасс и районы промысла у восточных побережий Камчатки и Курильской гряды (зимне-весенний сезон). Отмечается, что экипажам морских судов и персоналу судоходных компаний предложено учитывать возрастающие штормовые риски при планировании навигации в указанных районах (особенно с суровым климатом) и принимать меры по их минимизации, в том числе предусматривать альтернативные маршруты переходов. Обращается внимание на то, что особую важность приобретает качество подготовки судовых экипажей при плавании в условиях шторма, обледенения, отказа рулевого управления, оказании помощи судам, терпящим бедствие.

Ключевые слова: безопасность судоходства, опасный ветер, шторм, повторяемость, тенденция, изменения климата, риск, судоходный маршрут, район промысла, навигация.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Изменение ветрового режима на судоходных трассах морей России в конце XX – начале XXI вв. / С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 61–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-61-74. — EDN WOVCT.

Введение (Introduction)

Морской транспорт и сопутствующая портовая инфраструктура являются важнейшим звеном экономического развития Российской Федерации. Помимо транспортных возможностей, моря России предоставляют доступ к уникальным месторождениям полезных ископаемых и биоресурсам. Реализация полного потенциала российских морей возможна при наличии современного и надежного морского флота, обеспечение безопасной эксплуатации которого является неизменным приоритетом государства.

Эксплуатация морского флота происходит в различных климатических и гидрометеорологических условиях, в том числе крайне неблагоприятных. Регулярно сталкиваясь со штормами, ледовой обстановкой и ограниченной видимостью, экипажи судов должны всегда быть готовы к резким изменениям условий плавания. Согласно Международному кодексу по управлению безопасностью (МКУБ)¹, риски для безопасного плавания должны постоянно оцениваться и сводиться к минимуму. Маршруты перехода и районы промысла должны выбираться, по возможности минуя зоны опасных гидрометеорологических явлений. Планируя предстоящий переход, судоводители руководствуются специальными наставлениями, логиями, погодными картами, которые всегда имеются на судне и в судоходной компании.

В условиях глобальных изменений климата, ускорившихся в начале XXI в. [1], нарабатанная в течение десятилетий справочная гидрометеорологическая информация в отдельных районах может быстро терять актуальность, в связи с чем требует постоянного мониторинга и при необходимости обновления. Перемены климата приводят к изменениям атмосферной циркуляции, в отдельных районах способствуя интенсификации штормов, нагонов, затоплению и разрушению портовой инфраструктуры. В связи с этим важно понимать и оперативно отслеживать тенденции изменений гидрометеорологической обстановки на маршрутах переходов и районах промысла с тем, чтобы быть готовыми принять соответствующие меры и минимизировать возникающие риски.

Вопросы влияния климатических изменений на гидрометеорологическую обстановку на морских акваториях, в том числе арктических, широко освещены в профильной научной литературе, например, [2]–[6]. В работе [2] описаны вероятные сценарии изменения ветрового режима в океанах. Так, в Тихом океане отмечается тенденция к росту количества и интенсивности штормов, а также смещение их траекторий от центра к северу. Схожие закономерности в зимний период рассмотрены в работе [7], посвященной спутниковым методам мониторинга ветров в северной части Тихого океана.

¹ Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1900261> (дата обращения: 20.11.2024).

Изменениям ветровой обстановки в арктических морях посвящены работы [8]–[11]. Отмечается, что из-за существенного сокращения площади ледяного покрова, потепления арктического климата и более позднего ледообразования повторяемость сильных ветров в Баренцевом, Карском и Чукотском морях в холодный сезон имеет тенденции к повышению, что, в свою очередь, осложняет работу морского транспорта и приводит к интенсификации опасных явлений (штормов, обледенения судов, быстрого сжатия льда, его дрейфа и др.).

Публикаций, посвященных изменениям ветроволновой обстановки во внутренних морях России, немного. В частности, ситуация в Черном море описана в работе [12], в которой отмечается некоторое снижение интенсивности штормов в западной части моря. При этом вся восточная часть, согласно выводам авторов, подвержена усилению штормовой активности с увеличением среднегодовых высот волн в полях смешанного и ветрового волнения на 0,10–0,15 см/год. Отмечается, что указанные особенности являются следствием изменений ветрового режима. Анализ обстановки в Балтийском море выполнен в работе [13], в которой авторами высказана гипотеза о связи возросшей штормовой активности с активизацией циклонической деятельности и усилением ураганов в Атлантике. В работе [14] коллективом авторов Севастопольского отделения Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова представлены результаты оценки повторяемости сильных ветров в морях России и тенденций их изменения по данным реанализов.

Большинство научных работ посвящено общему описанию климатических изменений в конкретных регионах, в том числе на водных объектах, при этом анализ изменений ветрового режима применительно к районам судоходства и рыболовства, относящимся к (или представляющим интерес для) Российской Федерации, в явном виде не представлен. В этой связи целью настоящей работы является выявление тенденций усиления опасных ветров в районах работы транспортного и рыболовного флота России и оценка связанных с этим навигационных рисков.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ трафика судов в морях России и выявление участков с наиболее интенсивным судоходством.
2. Оценка климатических норм месячной повторяемости опасных ветров (ПОВ) в указанных морях и тенденций их изменения в современном климатическом периоде.
3. Выявление участков судоходных трасс и районов промысла, где средние или высокие климатические нормы ПОВ демонстрируют тенденции дальнейшего роста, а также оценка возникающих навигационных рисков и выработка предложений по их снижению.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Интенсивность транспортных потоков в морях России определена по данным портала Marine Traffic² за 2023 г. С этой целью для каждого моря был сделан скриншот годовой плотности трафика, на основе которого выявлены основные актуальные маршруты движения судов и районы промысла. ПОВ оценивалась как количество часов в месяце, в течение которых среднечасовая скорость ветра превышала определенный (опасный) порог. Ветер представляет опасность, если в результате его действия существенно повышаются риски для морских судов и сооружений, а также объектов береговой инфраструктуры. Во время навигационного перехода опасные ветры, помимо морского волнения, могут способствовать развитию крена судна, смещению или повреждению палубного груза, повышенному рысканию, обледенению судовых конструкций, что дополнительно осложняет работу экипажей судов.

В настоящем исследовании опасным считался ветер со среднечасовой скоростью не менее 11 м/с («сильный» ветер по шкале Бофорта [15]). При продолжительном действии такого ветра в открытых районах морей развивается волнение со средней высотой волн 3 м и максимальной — до 4 м. Плавание в таких условиях представляет серьезную опасность не только для маломерных судов, но и для судов со вторым ограниченным районом плавания.

² Marine Traffic — глобальная карта морских судопотоков. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/> (дата обращения: 20.09.2024).

Непосредственную угрозу для судов, а также морских и портовых сооружений представляют не средние скорости приводного ветра, а порывы (кратковременные увеличения его мгновенной скорости), статистика которых не ведется. Известно, тем не менее, что чем выше ПОВ на некотором участке морской акватории, тем выше повторяемость порывов. Данные о среднечасовой скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря взяты из базы глобального атмосферного реанализа ERA-5³, которая содержит сведения о меридиональных и зональных компонентах вектора среднечасовой скорости ветра с разрешением по координатам $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Данные в базе доступны за каждый час начиная с 00 ч 01.01.1959 г. [16].

Проверка адекватности данных реанализа осуществлена путем их выборочного сравнения с результатами мониторинга характеристик ветра, выполненного в Азово-Черноморском регионе на наблюдательных постах гг. Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Заветное, Керчь, Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Новороссийск, Геленджик и Сочи. Результаты мониторинга получены из архива Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова». Проверка показала, что данные реанализа удовлетворительно соответствуют результатам фактических наблюдений и могут использоваться для выявления качественных закономерностей.

При оценке климатических норм (КН) ПОВ в качестве современного рассматривался период 1991–2020 гг. КН определенного месяца вычислялась как среднее значение ПОВ за все годы рассматриваемого периода. Тенденция межгодовых изменений ПОВ определялась по значению и знаку углового коэффициента линейного тренда временного ряда, составленного из данных за все годы рассматриваемого периода. Тенденция признавалась статистически значимой на определенном отрезке времени в соответствии с критерием Пирсона при условии, что вероятность ошибочности такого вывода не превышала 0,1. Тенденция, признанная значимой, считалась устойчивой, если ее знак совпадал со знаком тенденции для любого входящего в интервал 1991–2021 гг. отрезка времени длиной от 12 до 30 лет с вероятностью не менее 0,9. Подробно методика оценки ПОВ представлена в [14].

Уровни рисков для судоходства и рыболовства, обусловленных ожидаемым усилением опасных ветров, и влияние их определяющих факторов оценивались по четырехбалльной шкале: «отсутствует» или «очень низкий» (–), «незначительный» (*), «значительный» (**), «высокий» (***). Факторы риска и диапазоны их значений для каждой категории представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика факторов риска

Фактор / риск	Отсутствует	Незначительный	Значительный	Высокий
Интенсивность трафика, рейсов/год	< 10	10–100	100–500	> 500
Повторяемость опасного ветра, ч/мес.	< 10	10–100	100–300	> 300
Тенденция к росту месячной ПОВ, ч/год	< 1	1–5	5–10	> 10

Наличие любого риска должно рассматриваться судоходными компаниями и экипажами судов как достаточное условие для принятия мер по его снижению и предотвращению связанных с ним негативных последствий.

Результаты и анализ исследований (Results and Analysis Research)

В рамках решения первой задачи настоящего исследования, по данным портала Marine Traffic, были выявлены районы морей России с наибольшей интенсивностью транспортных потоков. Для примера на рис. 1 приведена карта годовой интенсивности трафика судов в Беринговом море.

³ База данных реанализа ERA5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (дата обращения: 01.03.2024).

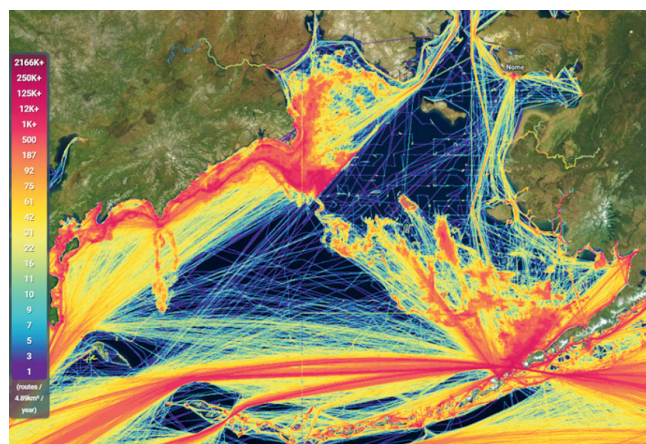


Рис. 1. Распределение плотности морских транспортных потоков в Беринговом море
(<https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/> (дата обращения: 20.09.2024))

Как видно из рис. 1, наибольшая интенсивность трафика в российской части моря наблюдается в Анадырском заливе и в районах активного промысла южнее бухты Грейга (более 500 проходов судов в год). Высокая интенсивность трафика выявлена также в прибрежных районах моря от бухты Грейга до входа в Камчатский пролив, в районах промысла биоресурсов и судоходных трасс, ведущих в Берингов пролив с выходом на Северный морской путь (СМП) и порты Чукотки. При этом следует отметить высокую плотность движения судов по ортодромическим трансокеанским трассам в южной части моря, проходящим вблизи (или через проливы) Алеутской гряды. Анализ судопотоков для других морей России выполнен аналогичным образом.

В рамках решения второй задачи исследования, по данным ERA-5, оценивались климатические нормы и тенденции изменения ПОВ в морях России. Расчеты, построения и описания, связанные с проведением оценки, выполнены в [15]. В качестве примера на рис. 2 приведены карты распределения значений КН в Беринговом море и северной части Тихого океана для месяцев декабрь – май.

Как видно из рис. 2, в современном климатическом периоде в зимние месяцы на акватории большей части Берингова моря, в том числе в районах наиболее интенсивного судоходства, традиционно наблюдаются высокие КН ПОВ, превышающие 200 ч/мес. Ветровая обстановка заметно улучшается к началу лета. Тенденции изменений ПОВ в регионе за тот же период показаны на рис. 3. Видно, что в Беринговом море в современном климатическом периоде в зимние месяцы проявились тенденции к повышению ПОВ, особенно в районах с наиболее интенсивным судоходством (западная прибрежная часть моря, районы Алеутской гряды, через которые проходят трансокеанские трассы, подходы к Берингову проливу). Тенденции, выявленные за 30-летний период (менее 6 ч/год), на первый взгляд, не представляют существенной опасности. Тем не менее понятно, что условия судоходства в регионе не улучшаются. Устойчивость выявленных тенденций выборочно проверялась на меньших интервалах времени. Для примера на рис. 4 показаны тенденции, выявленные в том же регионе в те же месяцы за период 2010–2021 гг.

Данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что за последние 12 лет, относящихся к рассматриваемому климатическому периоду, произошли существенные изменения в динамике развития ветровой обстановки. В отдельных районах Берингова пролива, Анадырского залива и зон рыбного промысла южнее бухты Грейга в декабре и январе ПОВ снижалась со скоростью 10 ч/год и более. При этом в южной, юго-западной и центральной частях моря (особенно в районе Алеутской гряды и трансокеанских судоходных трасс) ветровая обстановка в большинстве месяцев существенно ухудшалась (тенденции к повышению ПОВ превышали 10 ч/год). Исследования на других интервалах времени в целом подтвердили устойчивое ухудшение ветровой обстановки в южной, юго-западной и центральной частях моря и переменные (неустойчивые) тенденции в его западной части. Карты распределений КН и тенденций их изменений для других месяцев и морей России представлены в [15].

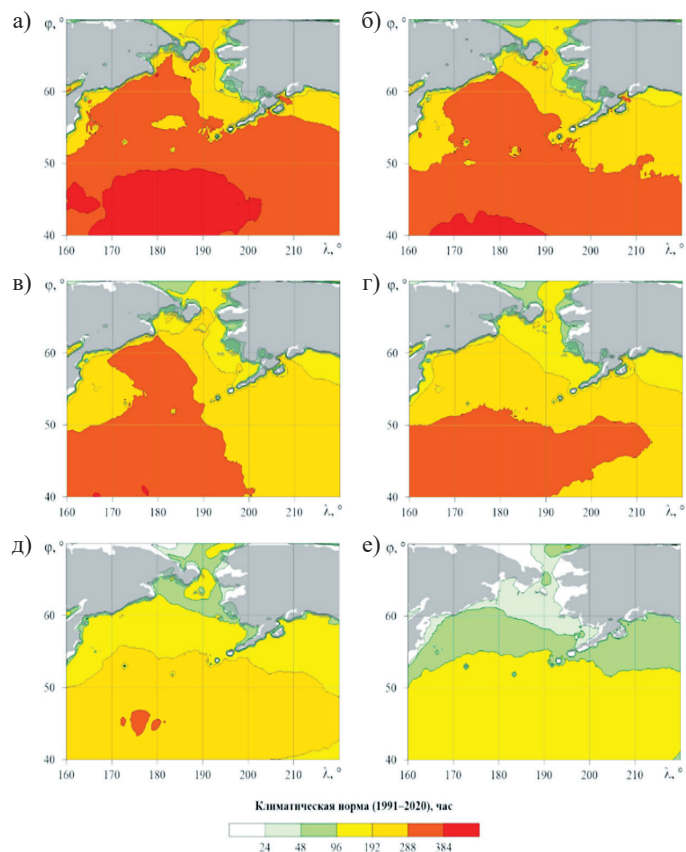


Рис. 2. Климатические нормы повторяемости сильных ветров в Беринговом море и северной части Тихого океана за период 1991–2020 гг. [14] по месяцам: а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март; д — апрель; е — май

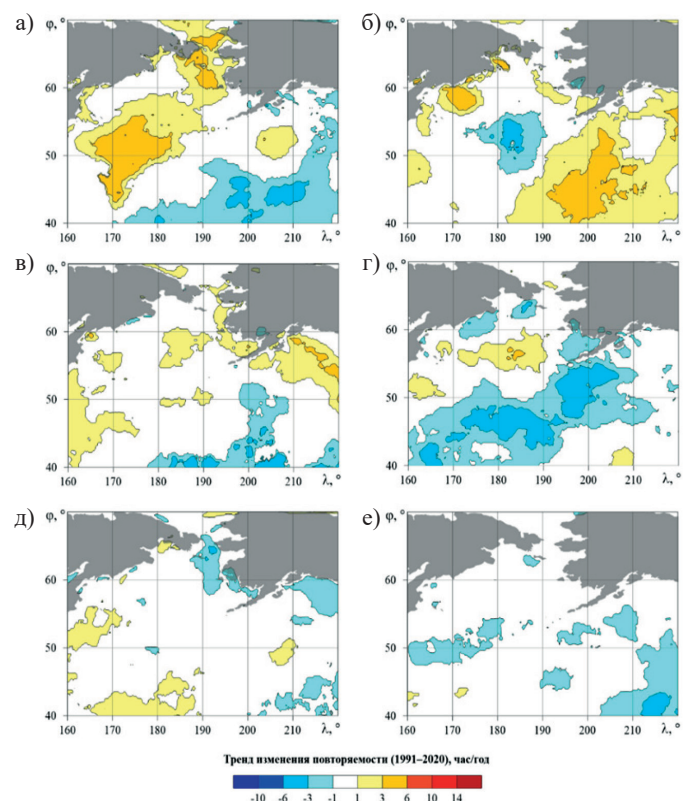


Рис. 3. Тенденции изменения повторяемости сильных ветров в Беринговом море и северной части Тихого океана за период 1991–2020 гг. [14] по месяцам: а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март; д — апрель; е — май

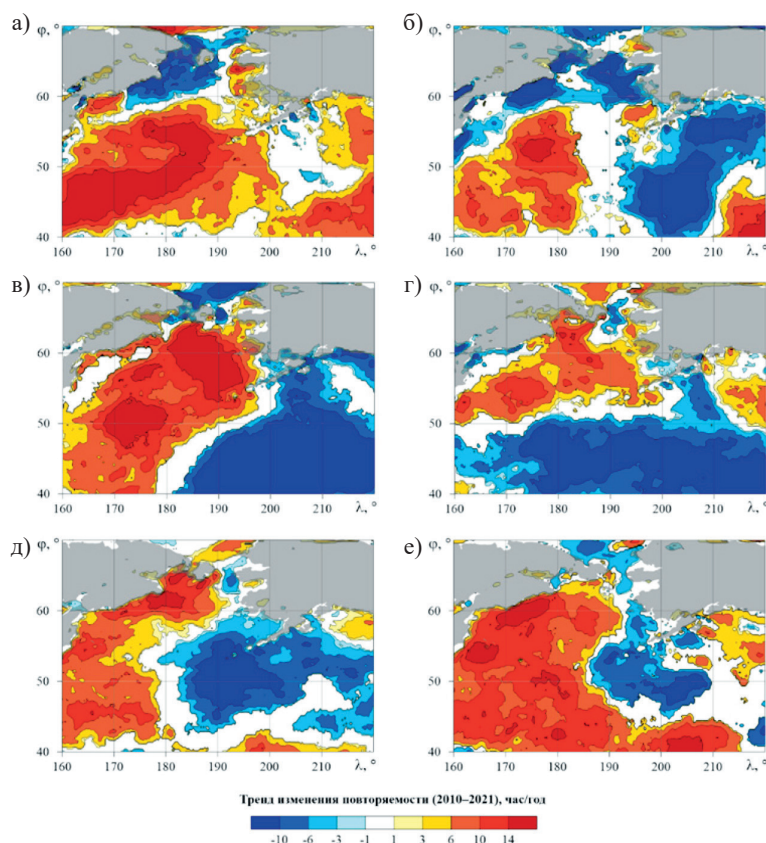


Рис. 4. Тенденции изменения повторяемости сильных ветров в Беринговом море и северной части Тихого океана за период 2010–2021 гг. [14] по месяцам:
а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март; д — апрель; е — май

В рамках решения третьей задачи данного исследования были выявлены районы, в которых одновременно имеет место сочетание трех факторов: высокая КН ПОВ, статистически значимые тенденции к ее дальнейшему росту и высокая интенсивность морского трафика. В таких районах штормовые риски для судоходства будут возрастать, а для их минимизации, очевидно, потребуются определенные корректирующие действия со стороны как судоходных компаний, так и судовых экипажей.

В рассматриваемом примере в Беринговом море и северной части Тихого океана районы с подобным сочетанием факторов в зимние месяцы находятся в юго-западной и центральной частях моря, в том числе в районах Командорских и Андреяновских островов, Олюторского и Каргинского заливов полуострова Камчатка. Через указанные районы проходят важные судоходные трассы и в них активно ведется рыбный промысел.

Судоходным компаниям, эксплуатирующим флот в указанных районах, в своих системах управления безопасностью (СУБ) и СУБ своих судов необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по снижению рисков при плавании в штормовых и ледовых (вблизи Берингова пролива) условиях в холодный период года: дополнительные тренировки персонала (особенно палубного) по управлению судном в условиях волнения, включая подготовку на навигационном тренажере и симуляторе систем аварийной радиосвязи, и обледенения, борьбе с водой, при отказах рулевого устройства и силовой установки, оставлении судна, оказании первой медицинской помощи пострадавшим, а также оказание помощи судам, терпящим бедствие. При планировании трансокеанских переходов из портов восточной Азии в Северную Америку (и наоборот) в холодный сезон следует по возможности отдавать предпочтение не кратчайшим путям, проходящим по дугам большого круга вблизи (или через проливы) Алеутской гряды, а составным маршрутам, проложенным южнее.

Аналогичный подход при оценке и необходимости минимизации штормовых рисков применен и для других морей и районов плавания. Результаты сведены в табл. 2, в которую включены только те районы, где выявлены соответствующие риски и требуется проведение мероприятий по риск-менеджменту.

Таблица 2

Оценка рисков для судоходства из-за увеличения повторяемости опасных ветров в морях России

Район судоходства, промысла	Факторы риска			Степень риска и актуальность дополнительного риск-менеджмента
	Интенсивность трафика	ПОВ	Тенденции роста ПОВ	
		Период	Период	
Черное море				
Подходы и рейдовая зона порта Новороссийск	***	**	*	*
		ноябрь – февраль	январь, февраль, апрель	
Подходы и рейдовая зона Керченского пролива	***	**	**	**
		ноябрь – февраль	ноябрь, февраль устойчивость не подтверждена	
Трасса Новороссийск – Стамбул	***	**	*	*
		декабрь – февраль	январь, апрель	
Подходы и рейдовая зона порта Туапсе	**	**	*	*
		декабрь – февраль	январь, февраль, апрель	
Трасса Туапсе – Стамбул	**	**	*	*
		декабрь – февраль	февраль, апрель	
Азовское море				
Подходы и рейдовая зона Керченского пролива, подходы к порту Темрюк	***	**	**	**
		ноябрь – март	ноябрь устойчивость не подтверждена	
Балтийское море				
Финский залив; судоходные трассы юго-западной части моря	***	**	*	**
		октябрь – март	январь, февраль устойчивость не подтверждена	
Судоходные трассы центральной части моря	***	**	*	**
		октябрь – март	январь – март устойчивость не подтверждена	
Подходы к порту Калининград	**	**	*	*
		октябрь – март	январь, февраль устойчивость не подтверждена	
Белое море				
Пролив Горло	**	**	*	*
		октябрь – январь	январь – апрель	
Баренцево море				
Прибрежная судоходная трасса вокруг мыса Нордкап	***	**	**	**
		ноябрь – март	январь, март – май устойчивость не подтверждена	
Южная часть моря (включая пути к проливам Горло и Карские Ворота)	**	**	***	**
		декабрь, январь	январь, март – май устойчивость не подтверждена	
Судоходные трассы в направлении и вокруг мыса Желания	*	**	***	**
		ноябрь – март	декабрь – май устойчивость не подтверждена	
Северные районы промысла	*	**	***	**
		ноябрь – март	декабрь – май устойчивость не подтверждена	

Окончание табл. 2

Карское море				
Трассы из пролива Карские Ворота в Обскую губу и Енисейский залив	**	**	*	*
		октябрь – декабрь	январь, март – май <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Трассы от мыса Желания в Обскую губу и Енисейский залив	**	**	*	*
		октябрь – декабрь	июнь, октябрь, январь <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Трассы СМП в восточной части моря	*	**	*	*
		октябрь – декабрь	октябрь, январь <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Море Лаптевых				
Все районы	*	*	—	—
		В течение года		
Восточно-Сибирское море				
Судоходные трассы восточной части моря	*	**	*	*
		сентябрь – декабрь	август – ноябрь	
Чукотское море				
Подходы к Берингову проливу	**	**	*	*
		сентябрь – январь	июнь, август, октябрь – декабрь <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Низкоширотная трасса Севморпути (через пр. Лонга)	*	**	*	*
		сентябрь – декабрь	август, ноябрь	
Высокоширотная трасса Севморпути (севернее о. Врангеля)	*	**	*	*
		сентябрь – декабрь	август, октябрь – декабрь	
Берингово море				
Анадырский залив; районы промысла южнее б. Грейга	**	**	*	*
		ноябрь – март	ноябрь – март	
Прибрежные трассы и районы промысла от б. Грейга до входа в Камчатский пролив	**	***	*	**
		ноябрь – март	ноябрь – март	
Трансокеанские трассы в южной части моря	***	***	**	***
		ноябрь – март	ноябрь – март	
Охотское море				
Районы промысла вдоль западного побережья п-ва Камчатка	**	**	*	*
		ноябрь – март	ноябрь, декабрь <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Судоходные трассы и районы промысла в северной и центральной частях моря и заливе Шелихова	**	***	*	*
		ноябрь – март	ноябрь, декабрь <i>устойчивость не подтверждена</i>	
Судоходные трассы и районы промысла вдоль восточного побережья о. Сахалин	**	**	—	*
		ноябрь – март		
Судоходные трассы и районы промысла в Тихом океане вдоль восточного побережья п-ва Камчатка	**	***	**	**
		ноябрь – март	ноябрь – апрель	
Океанские судоходные трассы к востоку от Курильской гряды	***	***	**	***
		ноябрь – март	ноябрь – март	
Японское море				
Все районы	***	*	—	—
		ноябрь – март		

Условные обозначения: — отсутствие фактора риска; * — незначительный фактор риска; ** — значительный фактор риска; *** — высокий фактор риска.

Согласно данным табл. 2, в Черном море тенденции к росту ПОВ наблюдаются в его северо-восточной и восточной части в зимне-весенние месяцы. Резкого ухудшения ветрового режима не происходит, однако учитывая расположение в регионе важных морских портов (Новороссийск, Туапсе, Тамань, Керчь и др.) и высокую интенсивность трафика, судоходным компаниям рекомендуется уделить внимание дополнительной подготовке экипажей к штормовому плаванию и тренировкам по оказанию помощи терпящим бедствие судам. Последнее особенно актуально в связи с круглогодичным допуском в этот район судов класса *река — море*, имеющих ограниченную мореходность, регулярно перевозящих опасные грузы, не всегда находящихся в надлежащем состоянии и укомплектованных компетентными экипажами. Регион известен высокой аварийностью⁴. Все ранее изложенное относится также к подходам к Керченскому проливу со стороны Азовского моря.

На судоходных путях Балтийского моря в холодный сезон (октябрь — март) традиционно наблюдается повышенная ПОВ. В некоторых районах (подходы к Калининграду, Финский залив, центральная часть моря) отмечены тенденции к ее дальнейшему росту, однако их устойчивость не подтверждается. Вместе с тем, учитывая высокую интенсивность трафика и важность региона для экономики страны, даже к неустойчивым тенденциям на данном этапе следует относиться крайне серьезно. Судоходным компаниям необходимо на регулярной основе проводить тренировки экипажей по управлению судном в штормовых условиях, борьбе с обледенением, плаванию в условиях ограниченной видимости и ледовой обстановки.

Климатические изменения особенно заметны в Западном секторе Российской Арктики (Баренцево и Белое моря и западная часть Карского моря). В регионе выявлены тенденции существенного повышения ПОВ. Несмотря на то, что их устойчивость на данный момент не подтверждена, судоходители, выполняющие рейсы в Баренцевом море в зимне-весенний период, должны быть готовы к усилению штормов, явлениям опасного обледенения, а при плавании в условиях ледовой обстановки — к опасным эффектам быстрого сжатия и дрейфа льда.

В Центральном и Восточном секторах Арктики эффект повышения ПОВ менее выражен или отсутствует (море Лаптевых). Некоторые тенденции к росту ПОВ обнаружены в Чукотском море, в восточных частях Карского и Восточно-Сибирского морей в осенний сезон, когда на судоходных трассах, как правило, еще отсутствует устойчивый ледяной покров. Учитывая особо сложные условия плавания в регионе, дополнительный риск-менеджмент, связанный с отработкой слаженных действий в условиях усиления ветра, представляется целесообразным.

В дальневосточном секторе наиболее опасные тенденции выявлены в некоторых районах Берингова и Охотского морей и северо-западной части Тихого океана. В холодный сезон ПОВ в регионе традиционно высоки, а за последние 12 лет рассмотренного климатического периода проявились тенденции к ее дальнейшему резкому повышению вблизи островов Курильского и Алеутского архипелагов и восточного побережья Камчатки. Указанные районы важны с точки зрения рыбного промысла, через них проходят трансокеанские судоходные трассы, осуществляется каботажное плавание и снабжение отдаленных приморских поселений Камчатки и Чукотки. Несмотря на то, что, согласно использованному в настоящей работе критерию, указанные тенденции не везде признаны устойчивыми, факт серьезных изменений ветрового режима в регионе нельзя игнорировать. Судоходным компаниям и экипажам следует по возможности избегать плавания через указанные районы в холодный сезон и по возможности выбирать альтернативные маршруты (или районы промысла).

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Проведенные исследования показали, что угрозы судоходству, вызванные увеличением повторяемости опасных ветров на морских путях и в районах рыболовства, являются реальными. В отдельных районах рост ПОВ происходит особенно быстро, требуя повышенного внимания со стороны судоходных компаний и ведомств, отвечающих за безопасность мореплавания.

⁴ Катастрофа в Керченском проливе станет прецедентом в морском праве. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rg.ru/2024/12/27/reg-ufo/ekspert-katastrofa-v-kerchenskom-prolive-stanet-precedentom-v-morskom-prave.html>.

Полученные результаты в целом соответствуют современным представлениям о последствиях происходящих глобальных климатических изменений. Среди климатологов в настоящее время преобладает точка зрения о том, что повышение температуры морей и океанов приведет к дальнейшему усилению ветров, повышению интенсивности и продолжительности штормов [1], [2], [17]. Наиболее значимые изменения следует ожидать в морях, наиболее открытых географически и имеющих свободное сообщение с внешними морями и океанами. Замкнутость и небольшая площадь морей в целом препятствует резким изменениям их ветрового режима.

Выявленные изменения ветровой обстановки в Западном секторе Российской Арктики адекватно согласуются со сдвигом сроков ледообразования в сторону более поздних дат и общим сокращением площади ледяного покрова [18] и другими факторами [19]. В условиях, когда площадь незамерзающей акватории в холодный сезон увеличилась, проявление тенденций к повышению ПОВ и возникновению более частых и опасных штормов является достаточно ожидаемым. Устойчивость таких тенденций на 30-летнем интервале современного климатического периода подтвердить не удалось, очевидно, потому, что резкие изменения сроков ледообразования и площади ледяного покрова начали происходить только с 2003 г. [18]. Изложенные в настоящей работе результаты оценки ПОВ в целом подтверждают наблюдения и выводы [3]–[6], [9], [11]. Дополнительно установлено, что наибольшие риски для судоходства, связанные с усилением штормовой активности, следует ожидать на трассах восточной и центральной части моря, в проливе Горло и на подходах к нему в зимне-весенний сезон, так как эти риски отнесены к категории «значительные».

Результаты, полученные по Черному морю, соответствуют общему выводу [12] об усилении штормов в восточной части моря. Настоящие исследования, однако, показывают, что тенденции к росту ПОВ на фоне повышенной КН имеют место преимущественно в ее северном и северо-восточном секторах (подходы с севера и юга к Керченскому проливу, подходы к портам Туапсе и Новороссийск). В других секторах такие тенденции либо отсутствуют, либо находятся в диапазоне «незначительные» (менее 5 ч/год). Опасное усиление штормовой активности (риск для судоходства с учетом интенсивного трафика признан «значительным») выявлено на подходах к Керченскому проливу в ноябре и феврале.

Выявленные тенденции к усилению ПОВ в Балтийском море в целом согласуются с выводами, представленными в работе [13]. Вместе с тем предположение ее авторов о непосредственной связи подобного явления с усилением ураганов в центральной Атлантике является дискуссионным. В рамках настоящего исследования уточняется, что наибольшие риски, связанные с увеличением штормовой активности ($КН > 200$ ч/мес. с возрастающим трендом более 10 ч/год), следует ожидать на судоходных трассах центральной части моря и Финского залива в зимние месяцы (риск оценен как «значительный»).

Результаты, полученные по дальневосточным морям, уточняют и дополняют данные [3], [8] об изменении ПОВ в северо-западной части Тихого океана. Установлено, что риски усиления штормовой активности максимальны на судоходных трассах, проходящих восточнее Курильской гряды и полуострова Камчатка, а также на всех трассах, проходящих через проливы (или вдоль) Алеутской гряды в зимний сезон. Дана оценка угроз как «высокие» ($КН > 300$ ч/мес. с трендом роста более 10 ч/год) с ноября по март.

Таким образом, в настоящей работе получены следующие новые результаты:

- выявлены участки судоходных трасс и районы промысла российских морей, где присутствуют риски усиления штормовой активности;
- выполнено категорирование указанных рисков, представлены рекомендации по их минимизации.

Сценарий будущих климатических изменений неизвестен, вместе с тем прогнозные оценки, основанные на современных тенденциях, в настоящее время являются наиболее вероятными. Исходя из этого следует вести долгосрочное планирование задач судоходства, принимать меры по повышению безопасности и эффективности эксплуатации морского флота.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Ветровой режим в морях России не является стационарным и реагирует на происходящие глобальные климатические изменения. Наиболее динамичные изменения ветровой обстановки происходят в открытых морях, имеющих свободное сообщение с внешними морями и океанами (Берингово и Баренцево моря).

2. Наибольшие риски для судоходства и рыболовства, связанные с повышением повторяемости опасных ветров при средней или высокой климатической норме данного показателя, выявлены в следующих районах:

- северо-восточная часть Черного моря, включая подходы и портам Новороссийск, Туапсе, район Керченского пролива (в зимний сезон);
- Балтийское море, включая трассы центральной части моря и Финского залива (в зимний сезон);
- Баренцево море (в зимне-весенний сезон);
- юго-западная часть Берингова моря, включая трансокеанские трассы (в зимний сезон);
- северо-западный сектор Тихого океана, включая трансокеанские трассы и районы рыболовства у восточных побережий Камчатки и Курильской гряды (в зимне-весенний сезон).

3. Экипажи судов и руководители судоходных компаний должны учитывать возрастающие штормовые риски при работе флота в указанных районах (особенно с суровым климатом) и принимать меры по их минимизации, в том числе планировать альтернативные маршруты переходов. Чрезвычайную важность имеет качество подготовки судовых экипажей при плавании в условиях шторма, обледенения, отказа рулевого управления оказании помощи аварийным судам.

4. Эффективным инструментом для оценки климатических изменений являются глобальные атмосферные реанализы, позволяющие выявлять тенденции и закономерности развития ветровой обстановки в разных регионах планеты, в том числе при решении задач планирования и повышения безопасности морского судоходства.

Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена в рамках научной темы «Принципы обеспечения безопасности социально-хозяйственных систем прибрежных территорий России, а также развития ее морского транспорта и рыболовства в условиях реально существующих неопределенностей характеристик дальнейших перемен климата и уровня мирового океана», разд. 3.1.2 «Разработка методических рекомендаций по учету климатической информации при формировании отраслевых планов адаптации к изменению климата» целевой научно-технической программы Росгидромета на 2020–2024 гг.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. Александру Вадимовичу Холопцеву за ценные рекомендации, способствующие улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forster P. M. Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence / P. M. Forster, C. Smith, T. Walsh, [et al.] // Earth Systems Science Data. — 2024. — Vol. 16. — Is. 6. — Pp. 2625–2658. DOI: 10.5194/essd-16-2625-2024.
2. Lobeto H. The effect of climate change on wind-wave directional spectra / H. Lobeto, M. Menendez, I. J. Losada, M. Hemer // Global and Planetary Change. — 2022. — Vol. 213. — Pp. 103820. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2022.103820.
3. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462. — EDN ECQGVQ.
4. Алексеев Г. В. Мониторинг изменений климата в морской Арктике / Г. В. Алексеев, Н. Е. Харланенкова, Н. Е. Иванов, Н. И. Глок // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2024. — Т. 70. — № 1. — С. 33–45. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45. — EDN QZTGKY.
5. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова / В. В. Иванов // Гидрометеорология и экология. — 2021. — № 64. — С. 407–434. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434. — EDN CBNPVQ.

6. Серых И. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер / И. В. Серых, А. В. Толстиков // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2022. — Т. 68. — № 3. — С. 258–277. DOI:10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277. — EDN UDRKSD.

7. Митник Л. М. Мультисенсорное спутниковое зондирование зимних циклонов со штормовыми и ураганскими ветрами в северной части Тихого океана / Л. М. Митник, М. Л. Митник, И. А. Гурвич [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2013. — Т. 10. — № 4. — С. 161–174. — EDN RLOLFV.

8. Суркова Г. В. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века / Г. В. Суркова, А. А. Крылов // Арктика и Антарктика. — 2018. — № 3. — С. 26–36. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395. — EDN YLQTDN.

9. Подпорин С. А. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в западном секторе российской Арктики в зимне-весенний период / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-215-225. — EDN GWPRAF.

10. Подпорин С. А. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в восточном секторе Российской Арктики / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588. — EDN PXBEYV.

11. Курочкин Л. Е. Современные тенденции изменений повторяемости сильных ветров над районами российской Арктики / Л. Е. Курочкин, А. В. Холопцев // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: труды всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 22–23 ноября 2023 года. — Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. — С. 44–55 — EDN XHEDNY.

12. Дивинский Б. В. Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря / Б. В. Дивинский, А. А. Кубряков, Р. Д. Косьян // Морской гидрофизический журнал. — 2020. — Т. 36. — № 4(214). — С. 367–382. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-4-367-382. — EDN QVBMH.

13. Похил А. Э. Ураганы Атлантического океана и штормы Балтийского моря / А. Э. Похил, Е. С. Нестеров, А. В. Федоренко // Энергия: экономика, техника, экология. — 2019. — № 6. — С. 14–25. DOI: 10.7868/S0233361919060041. — EDN FVAZFM.

14. Холопцев А. В. Изменения уровней морей России и повторяемости сильных ветров над их акваториями в конце XX – начале XXI веков / А. В. Холопцев, С. Подпорин, Н. Н. Дьяков. — Севастополь: Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, 2024. — 416 с. — EDN PQQKAT.

15. Huler S. Defining the Wind: The Beaufort Scale, and How a 19th-Century Admiral Turned Science into Poetry / S. Huler. — N-Y.: Crown Publishers, 2004. — 290 p.

16. Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / Hans Hersbach, Bill Bell, Paul Berrisford, et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2020. — Vol. 146. — Is. 730. — Pp. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

17. Prein A. F. Thunderstorm straight line winds intensify with climate change / A. F. Prein // Nat. Clim. Chang. — 2023. — Vol. 13. — P. 1353–1359. DOI: 10.1038/s41558-023-01852-9.

18. Егоров А. Г. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в / А. Г. Егоров, Е. А. Павлова // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — № 4. — С. 389–404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404. — EDN TIAJGM.

19. Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744. — EDN HBNBZU.

REFERENCES

1. Forster, Piers M., Chris Smith, Tristram Walsh, et al. “Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence.” *Earth Systems Science Data* 16.6 (2024): 2625–2658. DOI: 10.5194/essd-16-2625-2024.

2. Lobeto, H., M. Menendez, I. J. Losada and M. Hemer “The effect of climate change on wind-wave directional spectra.” *Global and Planetary Change* 213. (2022): 103820. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2022.103820.

3. Mokhov, Igor I. “Features of modern climate changes in the Arctic and their consequences.” *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.

4. Alekseev, G. V., N. E. Kharlanenkova, N. E. Ivanov and N. I. Glok “Monitoring climate change in the marine Arctic.” *Arctic and Antarctic Research* 70.1 (2024): 33–45. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45.
5. Ivanov, Viktor V. “Contemporary changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with a decrease in sea ice cover.” *Hydrometeorology and ecology* 64 (2021): 407–434. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434.
6. Serykh, Ilya V., and Alexei V. Tolstikov. “Climate change in the western part of the Russian arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind.” *Arctic and Antarctic Research* 68.3 (2022): 258–277. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.
7. Mitnik L. M., M. L. Mitnik, I. A. Gurvich, A. V. Vykochko, et al. “Multisensor satellite sensing of winter cyclones with storm and hurricane winds in Northern Pacific Ocean.” *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 10.4 (2013): 161–174.
8. Surkova, G. V. and A. A. Krylov “Izmeneniya srednikh i ekstremal’nykh skorostey vetra v Arktike v kon-tse XXI veka.” *Arktika i Antarktika* 3. (2018): 26–36. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395.
9. Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Current trends of dangerous winds frequency variation in the western sector of the Russian Arctic in winter-spring period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-215-225.
10. Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Current frequency variation trends of dangerous winds in the Eastern sector of the Russian Arctic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588.
11. Kurochkin, L. E. and A. V. Kholoptsev. “Current trends in changes in the frequency of strong winds over the regions of the Russian Arctic.” *Aktual’nyye voprosy proyektirovaniya, postroyki i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzheniy: Tr. vserossiyskoy nauch.-pr. konf., 22–23 November 2023*. Sevastopol: Izd-vo SevGU, 2023: 44–55.
12. Divinsky, Boris V., Arseniy A. Kubryakov and Ruben D. Kosyan “Interannual Variability of the Wind-Wave Regime Parameters in the Black Sea.” *Physical Oceanography* 27(4): 337–351. DOI:10.22449/0233-7584-2020-4-367-382.
13. Pokhil, A. E., E. S. Nesterov and A. V. Fedorenko “Uragany Atlanticheskogo okeana i shtormy Baltiyskogo morya.” *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* 6. (2019): 14–25. DOI: 10.7868/S0233361919060041.
14. Kholoptsev, A. V., S. Podporin and N. N. D’yakov. *Changes in levels of Russia’s seas and frequencies of strong winds over their waters at the end of the 20th — beginning of the 21st centuries*. Sevastopol’: Gosudarstvennyy okeanograficheskiy institut im. N. N. Zubova, 2024: 416.
15. Huler, S. *Defining the Wind: The Beaufort Scale, and How a 19th-Century Admiral Turned Science into Poetry*. N-Y.: Crown Publishers, 2004.
16. Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, et al. “The ERA5 global reanalysis.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730 (2020): 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
17. Prein, Andreas F. “Thunderstorm straight line winds intensify with climate change.” *Nat. Clim. Chang.* 13 (2023): 1353–1359. DOI: 10.1038/s41558-023-01852-9.
18. Egorov, Aleksandr G. and Yevgenia A. Pavlova “Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century.” *Arctic and Antarctic Research* 65.4 (2019): 389–404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.
19. Tezikov, Aleksandr L. and Evgeniy O. Ol’khovik. “Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor,
leading researcher
Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s
State Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str.,
Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2024 г.
Received: Dec. 23, 2024.

REVIEW OF THE DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS TO ENSURE THE SAFE OPERATION OF INLAND WATERWAY VESSELS

I. S. Onishchenko^{1,2}

¹ — CNIMF, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

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

The article reviews the development of requirements for vessels operating on inland waterways. The key points in the formation of the regulatory framework of the Russian Classification Society in terms of ensuring the safe operation of river vessels, taking into account the specifics of external loads on the hull of the vessel, are considered. The methods and approaches that became the basis of the existing Rules were formed in the 60-70s of the 20th century after the appearance of water reservoirs, the conditions of navigation in which differed significantly from river navigation. The next stage of development was the appearance of mixed (river-sea) navigation vessels based on river vessels operating in large lakes and reservoirs of inland waterways. By the end of the 1970s, mixed navigation vessels became a separate group, for which the requirements of normative documents for the safety of operation differed significantly from those for river vessels. First of all, this concerned the seaworthiness characteristics (stability, strength, freeboard) of the vessel's hull and its equipment, supplies, and devices. At the beginning of the 21st century, a study was carried out on the possibility of operating inland navigation vessels in coastal sea areas and in wind-wave protected areas with a maritime regime of navigation. The results have been applied in the Russian Classification Society's Regulations for roadstead and harbor navigation vessels (Guideline R.015-2006). The article analyses and confirms the necessity to develop a similar algorithm allowing assigning permissible operational restrictions for vessels whose class is lower than the basin class. The conditions for ensuring the safety of vessel operation should be assigned based on adjusted approaches that take into account the specifics of forecasting wind-wave parameters of water areas on inland waterways.

Keywords: navigation safety, inland vessels, mixed navigation vessels, inland waterways, harbor navigation, roader navigation, ship on waves, wind waves.

For citation:

Onishchenko, Irina S. "Review of the development of requirements to ensure the safe operation of inland waterway vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85.

УДК 656.62; 629.017

ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

И. С. Онищенко^{1,2}

¹ — АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

В статье выполнен обзор развития требований, предъявляемых к судам, эксплуатируемым на внутренних водных путях. Рассмотрены ключевые аспекты формирования нормативной базы Российского Классификационного Общества в части обеспечения безопасности эксплуатации речных судов с учетом специфики внешних нагрузок на корпус судна, а также методы и подходы, являющиеся основой существующих Правил Российского Классификационного Общества, сформированные в 60–70-х гг. XX в. после появления водохранилищ, условия плавания в которых значительно отличались от речного судоходства. Отмечается, что следующим этапом развития является появление судов смешанного (река–море) плавания на базе речных судов, эксплуатируемых в крупных озерах и водохранилищах внутренних водных путей; к концу 1970-х гг. суда смешанного плавания были выделены в отдельную группу, для которой требования нормативных документов к обеспечению безопасности эксплуатации стали существенно отличаться

от речных судов (в первую очередь это коснулось мореходных характеристик судна: остойчивости, прочности, надводного борта, корпуса судна и его оборудования, снабжения и устройств). Проанализировано выполненное в начале XXI в. исследование о возможности эксплуатации судов внутреннего плавания в прибрежных морских районах и на защищенных от ветро-волновых воздействий акваториях с морским режимом судоходства, результаты которого нашли применение в качестве «Предписания для судов рейдового и портового плавания» (Руководство Р.015–2006) Российского Классификационного Общества. В статье выполнен анализ и подтверждена необходимость разработки аналогичного алгоритма, позволяющего назначать допускаемые эксплуатационные ограничения для судов, установленный класс которых ниже разряда бассейна. Отмечается, что условия обеспечения безопасности эксплуатации судов при этом должны назначаться на основании откорректированных подходов, учитывающих специфику прогнозирования ветро-волновых параметров акваторий на внутренних водных путях.

Ключевые слова: безопасность судоходства, суда внутреннего плавания, суда смешанного плавания, внутренние водные пути, портовое плавание, рейдовое плавание, судно на волнении, ветровое волнение.

Для цитирования:

Онищенко И. С. Обзор развития требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания / И. С. Онищенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85. — EDN VWLOBD.

Введение (Introduction)

Развитие внутренних водных путей (ВВП) является одной из приоритетных задач последнего десятилетия, которая не утрачивает своей актуальности по сей день¹. Согласно сведениям, приведенным в [1], 78 % водных путей являются безальтернативными для доставки пассажиров и грузов несмотря на относительно низкую долю (около 2 %) всего грузооборота России. Необходимость роста перевозок на ВВП отмечается также в статьях [2]–[5] с учетом высокой конкурентной способности речного флота, а также наличия северных регионов России [6], где водный транспорт является наиболее доступным и надежным средством доставки грузов в отдаленные населенные пункты. В статье [7] отмечается, что наибольший потенциал роста грузовой базы имеется в бассейнах, порты которых тяготеют к зоне Северного морского пути.

В настоящее время в России наблюдается ситуация явной нехватки судов различных типов и назначений, которые могут использоваться при строительстве объектов береговой инфраструктуры. В условиях, когда привлечение зарубежного флота на крупные строящиеся объекты невозможно, чрезвычайно важной является задача организации работы судов отечественного флота. При этом совершенствование нормативной базы и расширение условий эксплуатации судов возможно только при сохранении существующего уровня безопасности плавания.

Обеспечение безопасности эксплуатации судов — комплексное понятие, под которым понимается совокупность технических, организационных, эксплуатационных и правовых средств и методов, направленных на охрану человеческой жизни и имущества на море.

При рассмотрении требований к судну как техническому объекту необходимо выделить следующие направления обеспечения безопасности плавания: прочность элементов корпусных конструкций и корпуса судна в целом; остойчивость и непотопляемость; надводный борт; маневренность судна; противопожарная защита; судовые устройства, оборудование и снабжение; средства навигации, размещаемые на судне; экологическая защита. Большая часть указанных направлений связана с особенностями водных бассейнов, в которых допускается эксплуатация судна. При этом основные мореходные характеристики судна (прочность, остойчивость, надводный борт) обусловлены в первую очередь характеристиками бурности водного бассейна.

Разработкой технических требований к судам внутреннего плавания и судам смешанного плавания, допускаемым к эксплуатации как на ВВП, так и в море, традиционно занимался Российский речной регистр (с 2022 г. Российское Классификационное общество (РКО)). Однако в 1978 г. в практике Российского морского регистра судоходства (РС) появились требования к судам вну-

¹ Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года / Утв. Распоряжением Правительства РФ № 3363-р от 27.11.2021.

треннего плавания, эксплуатирующимся на европейских внутренних водных путях в акватории Дунайского бассейна [8]. При этом, в отличие от требований РКО, которые создавались и совершенствовались с учетом особенностей условий эксплуатации как на ВВП европейской части России, так и в существенно отличающихся от них условиях эксплуатации на сибирских реках, указанные ранее требования РС разрабатывались с учетом европейских документов. При подготовке указанных требований РС учитывались следующие документы:

- технические предписания и положения других классификационных обществ и государственных организаций стран Дунайского бассейна и стран, эксплуатирующих суда внутреннего плавания на системе Дунай – Майн – Рейн;
- Директивы (ЕС) 2016/1629, измененные постановлениями Европейской комиссии (ЕС) 2018/970 и (ЕС) 2019/1668, стандарта ES-TRIN 2019/1;
- Резолюции № 61, 65, 72 и 76 ЕЭК ООН;
- рекомендации Дунайской комиссии в редакции 2014 г., касающиеся технических предписаний для судов внутреннего плавания;
- действующие международные и европейские стандарты, касающиеся электрического оборудования, средств связи, навигации и охраны окружающей среды.

При этом требования европейских нормативных документов существенно отличаются от подходов, заложенных в Правила РКО.

Совершенствование нормативной базы органов, контролирующих обеспечение безопасности флота, осуществляется с учетом анализа эффективности ранее реализованных технических решений, включающий их положительные и негативные последствия. Последний значимый пик активности исследований, обеспечивающих безопасность эксплуатации судов внутреннего плавания, приходится на 90-е гг. XX в. За прошедшие десятилетия технологии, используемые при проектировании и эксплуатации судов, претерпели существенные изменения, однако нормирование допускаемых эксплуатационных ограничений должного развития не получило.

Целью данного исследования является обзор используемых методик и подходов, которые легли в основу действующих требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания, а также выявление способов их совершенствования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Развитие требований, предъявляемых к судам внутреннего плавания как к техническому объекту, проанализированы в настоящей статье на основе практики РКО. Первоначально требования к техническому надзору за судами не зависели от типа и возраста судов, вследствие чего в конце XIX в. возникла необходимость в разработке системы классификации судов внутреннего плавания, аналогичной представленным в зарубежных классификационных обществах. Так, в мае 1899 г. впервые были изданы «Правила для классификации плавающих по Мариинской системе судов и для определения их грузоподъемности». В 1913 г. в России был создан первый самостоятельный орган надзора за техническим состоянием судов — «Общество для классификации морских, речных и озерных судов «Русский Регистр»». Данная организация активно занималась разработкой нормативных документов в части обеспечения безопасности эксплуатации судов. В утвержденных нормах отмечалось, что требования были разработаны на основе имеющегося опыта эксплуатации судов, однако предусматривалась возможность принятия иных решений при предоставлении соответствующих обоснований.

Техническое состояние речных судов в довоенные годы в России считалось неудовлетворительным, что оказывало непосредственное влияние на транспортную и экологическую безопасность судов, а также на сохранность человеческой жизни на флоте. Данное обстоятельство привело к изданию Регистром СССР² новых правил:

² В связи с разделением Министерств Морского и Речного флота 1957 г. были образованы Речной регистр РСФСР и Регистр СССР.

- «Нормы и правила для железобетонного судостроения» — первые в мире нормы прочности в гражданском судостроении (1926 г.);
- «Правила снабжения спасательными средствами судов, плавающих по внутренним водным путям СССР» (1928 г.);
- «Правила устройства, испытания и эксплуатации подъемных механизмов на судах, снарядах и других плавучих сооружениях» (1928 г.);
- «Правила постройки и классификации речных железных сухогрузных барж» (1929 г.);
- «Временные правила постройки корпусов железобетонных речных и озерных судов» (1931 г.);
- «Правила постройки речных стальных несамыходных судов» (1935 г.).

Указанные нормативные документы в части обеспечения требуемых характеристик общей и местной прочности базировались, в первую очередь, на накопленном опыте эксплуатации судов на внутренних водных путях.

В СССР в довоенные и послевоенные годы активно расширялась география судоходства. Так, в условиях вечной мерзлоты, в которой недоступно строительство автомобильных и железных дорог большой протяженности, водный транспорт занял лидирующую позицию. Это повлияло на необходимость изучения параметров водных объектов в удаленных и малонаселенных районах страны. Например, к специфическим особенностям северных и сибирских рек относятся высокие скорости течения, извилистость рек, сильное влияние погодных явлений на глубину судового хода, большие расстояния между объектами инфраструктуры. Эти и другие факторы непосредственно влияли на условия эксплуатации судов на внутренних водных путях. Однако если скорость течения и протяженность трасс плавания можно учесть в общих требованиях к техническим характеристикам судна, то навигационные особенности, вызванные погодными явлениями типа паводков или осушек, требовали постоянного контроля со стороны специальных путевых служб и экипажа.

В европейской части страны водные объекты тоже требовали пристального внимания, так как строительство крупных водохранилищ в 50-е гг. XX в. привело к формированию принципиально новых условий судоходства на внутренних водных путях. Большая площадь водной поверхности, относительно большие глубины и удаленность судового хода от береговой линии не являлись характерными особенностями речного судоходства. Поэтому потребовалось проведение ряда дополнительных исследований условий эксплуатации судов в водохранилищах, которое могло обеспечить безопасность плавания речных судов в новых путевых условиях.

Основным инструментом в совершенствовании работы флота в части обеспечения безопасности эксплуатации судов являлось *динамическое наблюдение*. Именно практический опыт и его многокритериальный анализ позволяли оценить наиболее перспективные пути усовершенствования технических требований к судам и найти новые технические решения для повышения уровня безопасности плавания.

Пересмотр аспектов условий плавания речных судов в водохранилищах и в крупных озерах, характеризующихся возможностью развития значительного волнения, выполнен на основе теоретических исследований, например, по уточнению долгосрочных характеристик волнения. Впоследствии сведения по гидрометеорологическим параметрам и зависящие от них требования к судам внутреннего плавания неоднократно корректировались с учетом накапливаемого опыта эксплуатации судов.

Вместе с тем параллельно развивались теоретические подходы к нормированию безопасности. Так, например, в середине 50-х гг. XX в. была предпринята достаточно неудачная попытка нормирования характеристик прочности корпуса (в первую очередь местной прочности) на основе применения исключительно расчетных способов назначения размеров связей корпуса, обеспечивающих прочность корпусных конструкций. В основу «Норм для расчета прочности»³ был

³ Речной регистр СССР. Нормы для расчета прочности корпусов стальных судов внутреннего плавания СССР (реки, озера, каналы). Л., 1956–1965 с.

положен подход к назначению размеров связей корпуса, базирующийся на применении в основном прочностных критериев при использовании исключительно мягких норм допускаемых напряжений, которые не имели аналогов в правилах других классификационных обществ. При этом в «Нормах прочности» 1956 г. не учитывался запас на износ в течение срока службы, а требования к минимальным толщинам связей были обусловлены, очевидно, только технологическими требованиями при сборке судовых конструкций. Такой подход к назначению размеров связей позволял проектировать корпуса судов с малыми строительными толщинами, что с учетом дефицита металла в те годы, было, возможно, актуально. Как следствие, запасы местной и общей прочности корпуса обеспечивались на момент постройки судна на минимально допустимом уровне.

Отрицательный опыт эксплуатации судов, спроектированных на основе применения только «Норм прочности» 1956 г., широко известен и отражен в работах Н. Ф. Ершова, О. И. Свечникова и О. З. Степанова. По данным инспекций РРР и пароходств, обобщенных в этих работах, на таких судах, даже низких классов, уже в первые годы эксплуатации возникала необходимость проведения ремонта из-за возникновения трещин в обшивке и наборе. Так, например, по данным Доно-Кубанской инспекции РРР, такие повреждения наблюдались у судов пр. 528, М-105, Р135 класса «Р» (строительные толщины 3–5 мм). Аналогичные повреждения, по данным Московского речного пароходства, отмечались у судов пр. Р89 класса «Р», пр. 461 класса «О» (толщины наружной обшивки 6 мм), а также у судов пр. 559 класса «О» (толщины наружной обшивки в средней части судна 4–6 мм). Для поддержания в работоспособном состоянии судов этих и других проектов, спроектированных по «Нормам прочности» 1956 г., необходимы значительные материальные и трудовые ресурсы. Однако большинство этих судов списывались, отслужив лишь незначительную часть своего амортизационного срока службы.

Следует отметить, что в 60-е гг XX в. одновременно с «Нормами прочности» существовала возможность проектирования корпусов судов на основе применения требований Правил РРР, отражающих имеющийся в то время опыт проектирования и эксплуатации судов. Некоторые из судов, построенных в 60-е гг XX в., эксплуатируются вплоть до настоящего времени, например, пр. 21–88, 576, 587 и др. С учетом этого обстоятельства с тех пор при назначении размеров связей корпусных конструкций совместно используются как расчетный подход, основанный на применении прочностных критериев, так и выбор геометрических характеристик связей по требуемым минимальным размерам, отражающий имеющийся опыт эксплуатации судов. При этом последний из них является в большинстве случаев определяющим при выборе требуемых размеров связей корпуса. Однако это касается только вопроса обеспечения местной прочности корпусных конструкций. В части обеспечения общей прочности корпуса основным является расчетный подход, базирующийся в современных требованиях РКО на «полновероятностной» схеме, учитывающей допустимую вероятность реализации нормируемой расчетной нагрузки на каждом из режимов волнения, возможном в процессе длительной эксплуатации судна при заданном эксплуатационном ограничении по допустимому волнению.

Вместе с совершенствованием требований к судам, эксплуатирующимся исключительно на ВВП, под эгидой РРР создавался и новый тип судов: суда смешанного (река–море) плавания, эксплуатация которых предусматривалась как на ВВП, так и в прибрежных морских районах. Первоначально эта задача решалась применительно к судам, выходящим в весьма ограниченные морские районы для обеспечения перегрузки грузов с морских судов на суда внутреннего плавания для обеспечения доставки грузов в пункты, расположенные на реках, водохранилищах и озерах. Затем, учитывая накапливаемый опыт эксплуатации судов внутреннего плавания в море, допустимые районы эксплуатации таких судов были существенно расширены. Это привело в начале 70-х гг XX в. к созданию нового класса судов «М–СП», которые допускаются к эксплуатации в достаточно обширных морских районах (например, круглогодичная эксплуатация на всей акватории Балтийского моря) с ограничением по волнению $h_{3\%} \leq 3,5$ м.

Отличительным подходом к нормированию основных мореходных характеристик (в первую очередь общей прочности) и определению их допустимых условий эксплуатации судов смешанного

плавания является учет возможной ошибки в благоприятном прогнозе волнения. При этом необходимо отметить, что также под эгидой РКО разрабатываются обоснования по установлению разрядности ВВП, которые затем утверждаются Министерством транспорта РФ. Это обеспечивает адекватность устанавливаемых органом классификации технических требований к основным мореходным характеристикам судов и допустимых условий их эксплуатации: района эксплуатации, ограничений по допустимой высоте волны и скорости порывов ветра.

Под ВВП России принято понимать водоемы, находящиеся в пределах границ, установленных Приказом Минтранса № 316⁴. При этом плановая эксплуатация судов на ВВП осуществляется в зависимости от класса судна в бассейнах соответствующего разряда. Критерии определения разрядности описаны как в Правилах РКО, так и в Положении о классификации и об освидетельствовании судов Минтранса РФ. В соответствии с указанными нормативными документами разряды внутренних водных бассейнов классифицируются в зависимости от их ветро-волновых режимов, исходя из следующих условий:

- в бассейнах разрядов «Л», «Р» и «О» высота волны 1 %-й обеспеченности ($h_{1\%}$) высотой, соответственно, 0,6; 1,2 и 2,0 м имеют суммарную повторяемость (обеспеченность) не более 4 % навигационного времени;

- в бассейнах разряда «М» высота волны 3 %-й обеспеченности ($h_{3\%}$) высотой 3,0 м имеет суммарную повторяемость (обеспеченность) не более 4 % навигационного времени.

Такой же подход используется и для ограниченных морских районов, находящихся за границами ВВП, как правило, в устьевых участках рек и примыкающих к ним морских районах. Ранее такие районы трактовались Правилами РРР 2008 г. как участки с морским режимом судоходства. В действующих Правилах РКО такие участки определяются как ВВП, на которых навигационно-гидрографические условия обеспечения плавания судов и безопасности судоходства соответствуют требованиям торгового мореплавания и регламентируются Кодексом торгового мореплавания РФ. Для судов внутреннего плавания, допускаемых к эксплуатации в таких районах, предъявляются дополнительные требования к сигнальным средствам и радиооборудованию.

Следует отметить, что подход, используемый в практике РКО для определения разрядности внутренних водных бассейнов, отличается от применяемого при классификации морских районов. В последнем случае наряду с характеристиками бурности морских районов в рассматриваемые календарные сезоны учитывается также удаленность трасс плавания судов от мест укрытия от неблагоприятных погодных условий. При этом, если первоначально в 60–70-е гг. XX в. бурность района и удаление от мест убежища рассматривались как независимые факторы, то в более поздних исследованиях учитывается совместное влияние этих факторов на безопасность эксплуатации.

Особую роль в этом случае имеет учет возможности попадания судна на волнение, превышающее установленное погодное ограничение по допустимой высоте волны, в результате опасной ошибки в благоприятном прогнозе волнения. Достаточно масштабные исследования в этой области были выполнены в ЛИВТ под руководством Ю. Л. Беляка, Ф. Г. Канделя, Ю. Н. Раскина, В. Н. Шаца при подготовке Приказа № 150 от 25.12.1979 г. о выходе в море судов Министерства Речного флота РСФСР. На основе этих исследований было предложено для описания условной плотности распределения фактических высот волн $h_{3\%}$ при фиксированном прогнозе $h_{3\%}^{np}$ использовать закон распределения Релея. В этом случае обеспеченность $h_{3\%}$ при прогнозируемом волнении $h_{3\%}^{np}$ определяется по зависимости

$$Q(h_{3\%} | h_{3\%}^{np}) = \exp(-(h_{3\%})^2 / E),$$

где $h_{3\%}$ — фактическая высота волны 3 %-й обеспеченности, м;

$h_{3\%}^{np}$ — прогнозируемая высота волны 3 %-й обеспеченности, м;

E — второй начальный момент распределения.

⁴ Приказ Министерства транспорта РФ от 17.08.2012 г. № 316 «Об определении бассейнов внутренних водных путей Российской Федерации». (Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 13.09.2012 г., рег. № 25458). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902369261>.

Позднее возможность использования этого закона для описания распределения $h_3\%$ при фиксированном прогнозе $h_3\%^{пр}$ была подтверждена в работе АО «ИЦС» (Научное сопровождение «Протокола по установлению условий плавания в море судов с классом Российского Речного Регистра»: отчет по договору № I-02.17/5572) на основе данных, полученных при проведении временной эксплуатации судов класса «М–СП» в Северном, Карском, Эгейском, Ионическом и Адриатическом морях.

Обобщение имеющихся сведений по оправдываемости прогнозов волнения в работе АО «ИЦС» позволило установить зависимость параметра E не только от $h_3\%^{пр}$, но и от режимной характеристики волнения h^* (бурности морского района)⁵. Таким образом, параметр E рассматривался как некоторая функция $E = \varphi(h_3\%^{пр}, h^*)$. Подобный подход к учету оправдываемости волнения реализован, в частности, в ранее действовавшей «Методике оценки и нормирования условий эксплуатации судов смешанного плавания в морских районах 1992 г.», упоминаемой в Протоколе-97⁶ в качестве методической базы решения вопросов изменения допустимых условий эксплуатации судов смешанного плавания в море. Этот подход использован также в работах АО «ЦНИИМФ», выполненных под руководством Ю. И. Ефименкова при решении ряда практических задач по классификации новых морских районов с целью расширения районов плавания судов с классом PPP и уточнения общих волновых нагрузок, действующих на корпуса таких судов⁷.

Необходимо отметить, что несмотря на широкое практическое использование данных ранее указанного исследования АО «ИЦС», в известной мере, вопрос об оправдываемости прогнозов волнения является дискуссионным. Так, например, в рамках работы по созданию требований РС к судам ограниченного района плавания ИПСП Г. В. Бойцовым было выполнено исследование по оправдываемости прогнозов волнения в различных районах Японского моря. По результатам этой работы было предложено использовать нормальный закон для аппроксимации условного распределения $h_3\%$ при фиксированной $h_3\%^{пр}$. Однако использование в этой работе данных по оправдываемости волнения только в одном море не позволяет установить зависимость параметров этого закона от характеристики бурности района h^* .

Требования, предъявляемые органом классификации к техническим характеристикам судов и, в первую очередь, к прочности и остойчивости, обусловлены устанавливаемыми допускаемыми условиями плавания судов и, следовательно, подходами, используемыми для определения разрядности как ВВП, так и морских районов. Детализированное описание и результаты реализованных в XIX в. нововведений в части эксплуатации речных судов в морских районах приведены в статье [9] на примере судов малого тоннажа.

Результаты (Results)

Опыт эксплуатации судов, накопленный за последние десятилетия, показывает, что существующий уровень технических требований, предъявляемых РКО к судам как внутреннего, так и смешанного плавания, является достаточным при установленных эксплуатационных ограничениях. Однако следует отметить, что подходы, применяемые для определения допустимых условий эксплуатации в новых условиях, требуют достаточно трудоемких обоснований. В то же время, как показывает опыт, у судовладельцев достаточно часто возникает потребность временной работы судов на ограниченных акваториях, достаточно хорошо защищенных от волнения с волноопасных направлений либо характеризующихся весьма незначительным удалением от мест убежища, где вполне безопасно могут работать суда, класс которых ниже разряда водного бассейна.

⁵ В качестве режимной обеспеченности характеристики волнения h^* использован режим волнения, характеризуемый высотой волны $h = 3\%$, вероятность превышения (обеспеченность) которого в рассматриваемых условиях эксплуатации (район эксплуатации и сезон плавания) составляет 5 %.

⁶ Протокол по установлению условий плавания в море судов с классом Российского Речного Регистра (Протокол-97). Приложение к Приказу Минтранса РФ от 01.08.97 г. № 86, 1997.

⁷ ЦРП PPP. Уточнение требований Правил PPP к дополнительным волновым изгибающим моментам судов смешанного плавания: отчет по договору № ЦРП-05-58-12 (эт. 1–3) / Руковод. работы Ю. И. Ефименков. СПб., 2006. 68 с.

Представляется достаточно очевидным, что выполнять весьма длительную процедуру классификации отдельных заливов, бухт и др. с внесением соответствующих дополнений в Приказ Минтранса⁸ и Правила РКО для ограниченной по времени эксплуатации отдельных судов, нецелесообразно.

Наличие в составе нормативных документов РКО инструмента, позволяющего оперативно решать вопросы допуска судов более низких классов в ограниченные районы бассейнов более высоких разрядов при более жестких эксплуатационных ограничениях, обеспечивающих сохранение существующего уровня безопасности эксплуатации, является весьма актуальным, в первую очередь, для судов внутреннего плавания. Это обусловлено тем, что внутренние водные объекты имеют значительно отличающиеся друг от друга эксплуатационные параметры. Современная система ВВП насчитывает более 100 000 км, а условия эксплуатации судов на них зависят от множества факторов и зачастую имеют локальные специфические особенности, которые не могут быть учтены при существующих подходах к разрядности акваторий. Детальный учет многообразия таких факторов в нормативной базе в настоящее время отсутствует, из-за чего назначение допускаемых условий эксплуатации судов в ограниченных акваториях с учетом обеспечения заданного уровня безопасности плавания является сложной задачей.

Ранее в практике РРР для решения подобного рода задач, связанных с допуском судов более низких классов в бассейны более высокого разряда, для ВВП применялась практика так называемого «эпизодического плавания», закрепленная в Правилах 2008 г. В этом случае к эксплуатации в бассейнах более высокого разряда допускались суда низких классов при условии выполнения дополнительных требований к прочности корпуса, остойчивости, надводному борту, оборудованию, снабжению, а также ограничений по району плавания, ветро-волновому режиму, сезонности, ледовым условиям и др.

Используемый ранее в практике РРР такой относительно гибкий инструмент назначения эксплуатационных ограничений для судов внутреннего плавания имел один явный недостаток. Так, задание индивидуальных условий эксплуатации для отдельных судов на эпизодическое плавание в нехарактерных для класса судна условиях вызывало трудности в части контроля над исполнением заданных ограничений. При этом ответственность за транспортную безопасность такого судна переходила к группе лиц, организовавших отступление от общепринятых нормами условий плавания. Поэтому согласование подобных случаев всегда вызывает опасения у контролирующих органов. В настоящее подобная практика прекращена и тем самым исключена возможность оперативного решения вопроса организации работы судов в ограниченных акваториях внутренних водных бассейнов.

В то же время в системе нормативных документов РКО решение подобных вопросов для морских вопросов возможно на основе применения Руководства Р.015–2006. Этим нормативным документом устанавливаются дополнительные эксплуатационные ограничения по удалению от места убежища, допустимому волнению и разгону волн на акватории, защищенной с волноопасных направлений. При разработке этого нормативного документа в исследовании АО «ЦНИИМФ» система дополнительных эксплуатационных ограничений разрабатывалась таким образом, чтобы при их соблюдении вероятность попадания судов на волнение, превышающее установленное ограничение по волнению для класса судна, не превышало соответствующей вероятности, реализуемой при плановой эксплуатации судов в условиях, соответствующих классу. При этом использовались подходы, аналогичные применяемым в работах [10], [11] и [12]–[14], а также ряде других исследований, учитывающих значимую вероятность ошибки в благоприятном прогнозе волнения.

В сложившейся ситуации разработка документа, аналогичного Руководству Р.015–2006 РКО, или дополнение этого нормативного документа положениями, обеспечивающими возможность

⁸ Приказ Министерства транспорта РФ от 30.05.2016 № 138 «Об утверждении перечней водных бассейнов в зависимости от их разряда». (Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 21.06.2016, рег. № 42577). Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420358949>.

принятия оперативных решений по организации эксплуатации судов на ограниченных акваториях ВВП при незначительном удалении от места убежища или защищенных от волнения, является актуальной. Однако при этом применение подходов, использованных в отчете⁹ при разработке Руководства Р.015–2006, вряд ли возможно из-за практического отсутствия конструктивных для решаемой задачи сведений по оправдываемости прогнозов волнения на ВВП. Это объясняется тем, что оправдываемость прогнозов волнения гидрометеослужбами оценивается как реализация фактического волнения в некотором интервале от прогнозируемой величины, при этом опасная или безопасная ошибка в прогнозе волнения не учитывается. Кроме того, прогнозирование волнения осуществляется преимущественно для больших озер (Ладожское и Онежское озера, озеро Байкал) и крупных водохранилищах.

В связи с ранее изложенным для решения подобной задачи для ВВП необходима разработка принципиально иных подходов, подтверждающих сохранение существующего уровня безопасности при устанавливаемых эксплуатационных судов низкого класса в районах внутренних бассейнов более высоких разрядов.

Выводы (Summary)

На основе выполненного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Анализ путей развития требований, обеспечивающих безопасность эксплуатации судов внутреннего плавания, показал, что значимые вехи в истории речного флота обусловлены прежде всего запросами отрасли. Появление новых методик, формирование подходов и даже возникновение категории судов смешанного (река–море) плавания — это результат поиска технических решений, появившихся в ответ на назревшую необходимость перемен в системе грузопотока России.

2. По мере интеграции вычислительных машин в инженерное дело и развития автоматизированных систем сбора данных о судне и внешних воздействиях на корпус и механизмы, предложенные в 60–70-е гг. XX в. методики и подходы корректировались и уточнялись. В ряде исследований XXI в. были предложены новые подходы к назначению эксплуатационных ограничений для судов внутреннего плавания, однако во всех рассмотренных случаях учитывался реальный опыт работы флота.

3. В настоящее время в условиях значительного старения судов советской постройки и недоступности привлечения зарубежного флота к строительству объектов береговой инфраструктуры представляется целесообразным уделить особое внимание совершенствованию нормативной базы. Именно формирование гибких систем назначения допускаемых эксплуатационных ограничений позволит оптимизировать работу судов при условии обязательности сохранения имеющегося уровня безопасности эксплуатации флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сорокалетова Е. И.* Проблемы и перспективы развития внутренних водных путей РФ / Е. И. Сорокалетова // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2023. — № 1–2(95). — С. 83–91. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-1-2-83-91. — EDN QNADUW.
2. *Шабров В. Н.* Обоснование эффективности комбинированных перевозок автомобилей с участием речного транспорта: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / В. Н. Шабров. — Н. Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2017. — 181 с. — EDN ZRNMKI.
3. *Телегин А. И.* ВБТ в национальной транспортной системе / А. И. Телегин, Г. Н. Чуплыгин, В. Н. Шабров // Транспортное дело России. — 2019. — № 2. — С. 52–54. — EDN GWIZSA.
4. *Онищенко И. С.* Назначение эксплуатационных ограничений для судов портового плавания на внутренних водных путях / И. С. Онищенко, В. В. Каретников // Вестник государственного университета

⁹ АО «ЦНИИМФ». Разработка требований Правил Российского Речного Регистра к условиям плавания судов на рейдах морских портов и в ограниченных прибрежных районах: отчет по договору № 21/04 (этап 4) / Рук. работы Ю. И. Ефименков, 2005. 98 с.

морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 455–463. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463. — EDN MQTLUT.

5. Савинкина А. Р. Современное состояние и актуальные проблемы развития водного транспорта России / А. Р. Савинкина, А. А. Данилина, А. В. Чижикова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2021. — № 11–3(62). — С. 230–234. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-11-3-230-234. — EDN EOUQFN.

6. Гюнтер А. В. Актуальные проблемы развития транспортного флота в Обь-Иртышском бассейне / А. В. Гюнтер // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2019 года. — М.: Изд-во «Перо», 2019. — С. 47–50 — EDN CFMYLO.

7. Дмитриева Е. В. Реки Арктической зоны как вектор развития Северного морского пути. Проблемы и потенциал эксплуатации внутренних водных путей регионов Сибири и Дальнего Востока России / Е. В. Дмитриева, А. П. Маслова // Транспортное дело России. — 2023. — № 4. — С. 57–59. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_57. — EDN PKYXAK.

8. Онищенко И. С. Сопоставление подходов Российского Речного Регистра и Европейской экономической комиссии к определению разрядности внутренних водных бассейнов / И. С. Онищенко, А. Н. Паранюк // Сборник научных трудов АО «ЦНИИМФ». — СПб.: ООО «Ай-Пи», 2021. — С. 130–134. — EDN SSDHUO.

9. Гуляев И. А. Опыт классификации судов малого тоннажа, прибрежного, портового и рейдового плавания / И. А. Гуляев, Е. П. Роннов, Е. Г. Бурмистров // Речной транспорт (XXI век). — 2020. — № 2(94). — С. 31–36. — EDN PNWJEN.

10. Бойцов, Г. В. Расчетная модель движения судна по морскому участку трассы / Г. В. Бойцов, А. П. Бутин, О. З. Степанов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 76(360). — С. 79–88. — DN QYRULB.

11. Бойцов Г. В. Оценка прочности корпуса судна при прохождении участка морской трассы / Г. В. Бойцов, А. П. Бутин, О. З. Степанов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 75(359). — С. 34–43. — EDN QYRUAN.

12. Ефименков Ю. И. Развитие подходов к обоснованию допустимых условий эксплуатации судов смешанного (река–море) плавания и основные направления их совершенствования // 16-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2014»: труды конгресса. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. — С. 293–297.

13. Ефименков Ю. И. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / Ю. И. Ефименков, С. Н. Гирин, И. А. Гуляев // Речной транспорт (XXI век). — 2018. — № 2(86). — С. 44–47. — EDN XSCCZN.

14. Ефименков Ю. И. Требования к допустимым условиям эксплуатации судов класса «М–СП4,5» и возможность их уточнения на примере Черного и Каспийского морей / Ю. И. Ефименков, И. С. Онищенко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S1. — С. 53–58. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-53-58. — EDN JCKLRA.

REFERENCES

1. Sorokaletova E. I. “Problems and prospects of development of inland waterways of Russia.” *Economy and business: theory and practice* 95 (2023): 83–91. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-1-2-83-91.
2. Shabrov, V. N. Obosnovanie effektivnosti kombinirovannykh perevozok avtomobilei s uchastiem rechnogo transporta. PhD diss. N. Novgorod, 2017.
3. Telegin, A. I., G. N. Chuplygin and V. N. Shabrov “IWT national transport system” *Transport business of Russia* 2 (2019): 52–54.
4. Onishchenko, I. S. and V. V. Karetnikov. “Designation of operational restrictions for harbour ships on inland waterways.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 455–463. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-455-463.
5. Savinkina A. R., A. A. Danilina and A. V. Chizhikova “The current state and current problems of the development of water transport in Russia” *International journal of humanities and natural sciences* 62 (2021):230–234. DOI 10.24412/2500-1000-2021-11-3-230-234.
6. Gyunter, A. V. “Aktual’nye problemy razvitiya transportnogo flota v Ob’-Irtyshtskom bassejne.” *Aktual’nye aspekty i prioritetnye napravleniya razvitiya transportnoy otrasli: materialy molodezhnogo nauchnogo foruma*

studentov i aspirantov transportnykh vuzov s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 14–15 noyabrya 2019 goda. Moskva: Izdatel'stvo "Pero", 2019: 47–50.

7. Dmitrieva, E. V. and A. P. Maslova "Rivers of the arctic zone as a vector of development of the Northern Sea Route. Problems and potential for the operation of inland waterways in the regions of Siberia and the Russian Far East." *Transport business of Russia* 4 (2023): 57–59. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_57.

8. Onischenko, I. S. and A. N. Paranyuk. "Sopostavlenie podkhodov Rossiyskogo Rechnogo Registra i Evropeyskoy ekonomicheskoy komissii k opredeleniyu razryadnosti vnutrennikh vodnykh basseynov." *Sbornik nauchnykh trudov AO "TsNIIMF"*. Sankt-Peterburg: OOO «Ay-Pi», 2021: 130–134.

9. Gulyaev, I. A., E. P. Ronnov and E. G. Burmistrov "The experience of classification of small tonnage, coastal, port and road navigation vessels." *Rechnoy transport (XXI vek)* 2(94) (2020): 31–36.

10. Bojcov G. V., A. P. Butin and O. Z. Stepanov "The mathematical model of movement of vessel on marine line" *Transactions of the Krylov shipbuilding research institute* 76(360)(2013): 79–88.

11. Bojcov G. V., A. P. Butin and O. Z. Stepanov "Ocenka prochnosti korpusa sudna pri prohozhdenii uchastka morskoy trassy" *Transactions of the Krylov shipbuilding research institute* 75 (2013): 34–43.

12. Efimenkov Y. I. "Razvitie podkhodov k obosnovaniyu dopustimyykh usloviy ekspluatatsii sudov smeshannogo (reka-more) plavaniya i osnovnye napravleniya ih sovershenstvovaniya." *16-j Mezhdunarodnyy nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki'2014»: Trudy kongressa.* — N. Novgorod: NNGASU, 2014: 293–297.

13. Efimenkov, Yu. I., S. N. Girin and I. A. Gulyaev "Obschie printsiipy ucheta ekspluatatsionnykh ograniicheniy pri normirovaniy morekhodnykh kharakteristik sudov pribrezhnogo plavaniya." *Rechnoy transport (XXI vek)* 2(86) (2018): 44–47.

14. Efimenkov, Yu. I. and I. S. Onischenko "Trebovaniya k dopustimym usloviyam ekspluatatsii sudov klassa "M-SP4,5" i vozmozhnost' ikh utochneniya na primere Chernogo i Kaspiyskogo morey." *Transactions of the Krylov shipbuilding research institute* 1 (2019): 53–58. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-53-58.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Онищенко Ирина Станиславовна —

заведующий сектором, аспирант

Научный руководитель:

Каретников Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Onishchenko, Irina S. —

Head of Sector, postgraduate

Supervisor:

Karetnikov, Vladimir V.

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

CNIIMF, JSC

6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2024 г.

Received: Dec. 17, 2024.

MODELING OF THE DISTRIBUTION OF CARGO FLOWS OF COMBINED SHIPMENTS IN THE HINTERLAND AREA OF THE SEAPORT

O. A. Izotov

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

This study focuses on assessing the potential for optimizing the utilization of the hinterland transport network when organizing the dispatch of combined cargo shipments from a seaport. The complexity of this task stems from the need to implement innovative methods to enlarge bulk shipments to facilitate their inland transportation using containerization. This approach promotes the development of new transportation routes and necessitates the evaluation of the transport characteristics of the shipping process. Modeling the transport network requires a comprehensive evaluation of factors, as well as economic and operational indicators that characterize the movement of cargo between origin points (sea container terminals) and destination points (consignee warehouses). This paper reviews existing models for assessing transport network utilization and provides a brief overview of each. In evaluating ongoing processes, it is emphasized that each specific origin-destination pair (sea container terminal to consignee warehouse) can be represented not only in terms of volume but also as a function of time. The possibility of developing a dynamic model based on various methods of unitizing cargo and evaluating the network's transport capabilities is also highlighted. The study concludes that, when addressing the problem of distributing flows across the transport network, considering different methods of organizing cargo units, and accounting for constraints on route capacity, time, or transportation costs, a projection method can be applied to identify the optimal transportation solution from a range of feasible options.

Keywords: modeling of the transport network, combined shipments, container technologies, container modules, vehicles, loading and unloading places, seaport, warehouse areas, cargo delivery, hinterland zone.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Modeling of the distribution of cargo flows of combined shipments in the hinterland area of the seaport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93.

УДК 656.073.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОТОКОВ СБОРНЫХ ПАРТИЙ В ЗОНЕ ХИНТЕРЛЕНДА МОРСКОГО ПОРТА

О. А. Изотов

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

Темой исследования является оценка возможности загрузки и оптимального использования транспортной сети хинтерленда при организации отправки сборных партий грузов с территории морского порта. Отмечается, что сложность такой задачи на текущий момент обусловлена необходимостью внедрения новых средств укрупнения сборных партий грузов в целях обеспечения их перевозок вглубь материка с применением контейнерных технологий, что способствует открытию новых маршрутов транспортировки и необходимости оценки транспортных характеристик перевозочного процесса. Указано, что моделирование транспортной сети требует всесторонней оценки различных факторов, а также экономических и эксплуатационных показателей, характеризующих транспортный процесс продвижения грузов между регионами зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения товаров (склад получателя). В предлагаемой работе рассмотрены существующие модели оценки загрузки транспортной сети и дана их краткая характеристика. В ходе оценки протекающих процессов подчеркивается, что каждая рассматриваемая корреспонденция между конкретным районом зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения (склад получателя) определенного грузопотока может быть представлена не только в объемных характеристиках, но и как функция времени, а также обращается внимание на то, что можно получить динамическую модель, базирующуюся на различных возможностях формирования грузовых мест и на оценке

транспортных возможностей сети. В ходе исследования сделан вывод о том, что при рассмотрении задачи распределения потоков по транспортной сети доставки с применением различных способов организации грузовых мест и ограничениями по пропускной способности маршрутов, по времени или стоимости перевозки, для нахождения оптимального показателя перевозки может быть использован метод проекции на множество допустимых решений.

Ключевые слова: моделирование транспортной сети, сборные партии грузов, контейнерные технологии, внутриконтейнерные модули, транспортные средства, погрузочно-разгрузочные места, морской порт, складские зоны, доставка грузов, зона хинтерленда.

Для цитирования:

Изотов О. А. Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в зоне хинтерленда морского порта / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93. — EDN XSNRYA.

Введение (Introduction)

Загрузка транспортной сети определяется организацией грузовых мест, предъявляемых к перевозке, и количеством привлекаемых к перевозке транспортных средств, способных выполнять требуемый объем работ на каждом элементе рассматриваемой сети (контейнерных терминалах, складских зонах, погрузочно-разгрузочных местах, перегонах и т. д.).

Моделирование используемой, исследуемой или формируемой на новом полигоне транспортной сети, призванной осуществить доставку грузов из морского порта до пункта назначения, первоначально требует оценки возможности распределения между грузовыми терминалами корреспонденций по выявленным путям сообщений, которые обеспечивают продвижение грузов между парами регионов зарождения (морской контейнерный терминал) и поглощения товаров (склад получателя) [1].

Таким образом, целью моделирования является определение для каждой рассматриваемой пары районов набора путей, которые могут быть включены в схемы продвижения грузов между регионами, выявление ограничений по привлечению того или иного рода транспортных средств к перевозке грузов по возможным путям сообщения, а также доли соотношений корреспонденций между маршрутами сообщений при различных вариантах организации грузовых мест, подлежащих транспортировке.

Построенная модель преследует целью обеспечение экспедитора (грузовладельца) информацией для всесторонней оценки ожиданий от принятия того или иного решения на перевозку малой (сборной) партии грузов. Обработка информации, сопутствующей транспортировке, призвана снизить риски, связанные с применением традиционных и новых средств укрупнения грузовых мест.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Специалистами выделены следующие виды существующих моделей оценки загрузки транспортной сети [2]:

- модели, в основу которых положен нормативный и оценочно-описательный (дескриптивный) подход;
- модели, построенные на основе обработки статистических данных и динамической информации.

Первый вид моделей описан в работах [3]–[5], предшествующих данной публикации. В частности, в них выбран основной показатель эффективности применения перспективных средства укрупнения сборных партий грузов, определено влияние внутриконтейнерных моделей¹ на организацию доставки грузов в условиях применения контейнерных технологий в новых для хинтерленда² морского контейнерного терминала регионах (рис. 1).

¹ Патент на полезную модель 207180 Российская Федерация МПК В65D 88/00 Складной грузовой контейнер / А. Л. Кузнецов, О. А. Изотов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». Заявл. 11.06.2021; опубл. 15.10.2021, Бюл. № 29. 6 с. EDN LJMJZF.

² Доставка сборных партий грузов в большегрузных контейнерах на короткие расстояния в данном примере не рассматривается, поскольку не нуждается в пересмотре условий транспортировки.

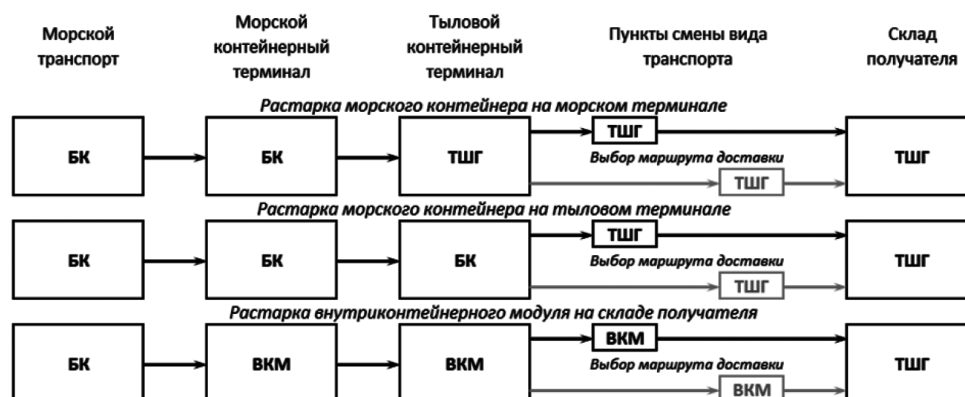


Рис. 1. Схемы транспортировки сборных партий грузов по транспортной системе хинтерленда:

БК — большегрузный контейнер; ТШГ — тарно-штучные грузы;

ВКМ — внутриконтейнерный модуль

Второй подход требует для перехода к построению статистической модели перехода к усредненным характеристикам продвижения сборных партий грузов на выбранном для моделирования полигоне. В частности, необходимо выявить долю αq_{ij} межрайонных корреспонденций, которая использует тот или иной маршрут при том или ином способе организации грузовых мест. При этом предполагается, что доля αq_{ij} отразится на загрузке каждого элемента транспортной инфраструктуры, как рассматриваемого маршрута, так и транспортной системы в целом, что обуславливает необходимость предварительного моделирования подобной системы. Такой подход не только оправдан, но и востребован при формировании новых вариантов организации транспортировки грузов, поскольку обеспечивает также учет ряда показателей работы, сформировавшейся или осваиваемой транспортной системы, таких как среднее расстояние доставки, время и стоимость перевозки грузов между районами зарождения и поглощения грузопотока Q_{ij} . В работе [6] выявлена алгебраическая зависимость количества погрузочно-разгрузочных операций и сроков доставки сборных партий грузов в тарно-штучном исполнении, большегрузных морских контейнерах и рассматриваемых средств укрупнения малых (сборных) партий грузов. Выявление усредненных показателей хода перевозки таких грузов до практического применения внутриконтейнерных модулей может быть получено на основе вероятностного моделирования поведения рассматриваемой транспортной системы.

С учетом того, что каждая рассматриваемая корреспонденция между конкретным районом зарождения и поглощения рассматриваемого грузопотока может быть представлена не только в объемных характеристиках, но и как функция времени, можно получить динамическую модель, опирающуюся как на различные возможности по формированию грузовых мест, так и на оценку транспортных возможностей сети.

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Определение объемов загрузки транспортной сети требует описания правил и положений, в соответствии с которыми грузоотправитель выбирает конкретный маршрут отправки грузов с морского контейнерного терминала. Закономерности в поведении потребителей транспортных услуг изложены в трудах Вардропа [7], [8] и сводятся к следующим группам сценариев:

Первая группа — независимые грузоотправители (предприятия транспорта, логистические компании) как потребители транспортных услуг, ориентируясь на востребованные стоимостные и эксплуатационные показатели (количество рейсов, сроки доставки, стоимость грузовых работ и перевозки и др.), выбирают из возможных альтернатив приемлемые маршруты транспортировки.

Вторая группа — независимые грузоотправители (предприятия транспорта, логистические компании) выбирают маршруты транспортировки, ориентируясь на транспортные расходы, применяемые в рассматриваемой транспортной сети.

Первая группа получила название *пользовательской оптимизации* (*User Optimization*). Она предполагает отсутствие коалиционного поведения в логистических и транспортных компаниях, привлекаемых к доставке грузов. Это требует предварительного сбора и обработки данных об эксплуатационных характеристиках, а также наличия резервов пропускной способности изучаемых маршрутов перевозок, что в условиях внедрения автоматизированных систем автонавигации, разработки и применения интеллектуальных транспортных систем не представляет сложности на этапах планирования и осуществления доставки грузов до потребителей. Такой принцип предполагает незначительное влияние возможных дополнительных затрат на одном из участков перевозки на стоимость транспортировки в целом.

Вторая группа получила название *системной оптимизации* (*System Optimization*). Примером может служить организация движения железнодорожного транспорта. В любом случае такие перевозки в силу своих особенностей являются удобным объектом для моделирования, поскольку имеют регулярный характер и легко поддаются оценке связанных с транспортировкой затрат.

Экономико-математическую модель разделения потоков грузов на транспортном полигоне традиционно приводят в виде графа $\Gamma(V, E)$, где V — пункты зарождения и поглощения грузов, E — дуги сети, соответствующие каждому возможному участку маршрута, при этом траектория дуги отражает направление перемещения груза. Процесс перегрузки привязан к вершинам графа как к транспортным узлам (пунктам), обеспечивающим стыковку видов транспорта. Именно здесь происходит смена транспортных и эксплуатационных характеристик пути следования груза (условий доставки), а иногда и самого груза (применение иных средств укрупнения и т. п.). Из общей оценки показателей, оказывающих влияние на формирование того или иного потока грузов, можно выделить два подмножества: первый $S \subseteq V$ — пункты образования потоков грузов (истоки), второй $D \subseteq V$ — пункты поглощающие грузы (стоки).

В данном случае в качестве пунктов образования грузопотоков могут выступать морские порты и контейнерные терминалы, отгружающие грузы в зону хинтерленда. Тогда пунктами поглощения являются склады грузополучателей, логистические и распределительные центры и т. д.

Декартово произведение отражает множество пар грузопотоков, которые могут сформироваться между истоками и стоками:

$$W = S \times D = \{w = (i, j) : i \in S, j \in D\}. \quad (1)$$

Последовательность дуг, отражающих маршрут следования груза в сети Γ между вершинами i и j , можно обозначить:

$$e_1 = (i \rightarrow k_1), e_2 = (k_1 \rightarrow k_2), \dots, e_m = (k_{m-1} \rightarrow k_m), e_{m+1} = (k_m \rightarrow j). \quad (2)$$

Здесь $e_l \in E$ при всех $l = 1, \dots, m+1$.

Обозначив P_w как множество независимых альтернативных маршрутов, связывающих пару $w \in W$, получим совокупность всех путей в сети Γ :

$$P = \bigcup_{w \in W} P_w. \quad (3)$$

Оценку загруженности всей сети можно получить, обозначив x_p как величину потока между пунктами образования и поглощения грузов, следующего по пути $p \in P$:

$$x = (x_p : p \in P). \quad (4)$$

Разработка маршрутов транспортировки должна включать всестороннюю оценку сопровождающих такую перевозку факторов, в том числе временных и финансовых затрат. Удельные затраты участников транспортного процесса по пути p можно обозначить как G_p . Тогда затраты по всей сети есть функция от ее загрузки $G_p = G_p(x)$.

Согласно первой группе сценариев участники перевозки выбирают маршрут с минимальными транспортными издержками, когда для каждой пары w выполняются условия: если по пути $p \in P$ идет ненулевой поток x_p , то и затраты по этому маршруту будут минимальными:

$$\text{если } x_p^{\tau} > 0, \text{ то } G_p(x^{\tau}) = \min_{q \in P_w} G_q(x^{\tau}) = u_w(x^{\tau}), \quad (5)$$

где $u_w(x^{\tau})$ — минимальные транспортные издержки на дуге, соединяющей пары $w \in W$ при загрузке сети, определяемой вектором x^{τ} .

Потоки $x^{\tau} = (x_p^{\tau} : p \in P)$, удовлетворяющие условию (1), называют *равновесными*, если определенные для каждой пары $w \in W$ соотношения задают условия равновесия транспортных потоков, а таких допустимых решений может быть значительное множество.

Решение условий транспортного равновесия состоит в сведении исходных постановочных вопросов к оптимизационной задаче. При этом на выбор эквивалентной формы оказывают влияние свойства функции транспортных расходов $G_p(x)$. Компоненты $G_p(x)$ могут быть объединены в вектор-функцию:

$$G(x) = (G_p(x) : p \in P). \quad (6)$$

Таким образом, при рассмотрении вопроса распределения потоков по транспортной сети доставки с применением различных способов организации грузовых мест и ограничений по пропускной способности маршрутов, по времени или стоимости перевозки для нахождения оптимального показателя может быть применен *метод проекции на множество допустимых решений* (рис. 2) [9]–[11].

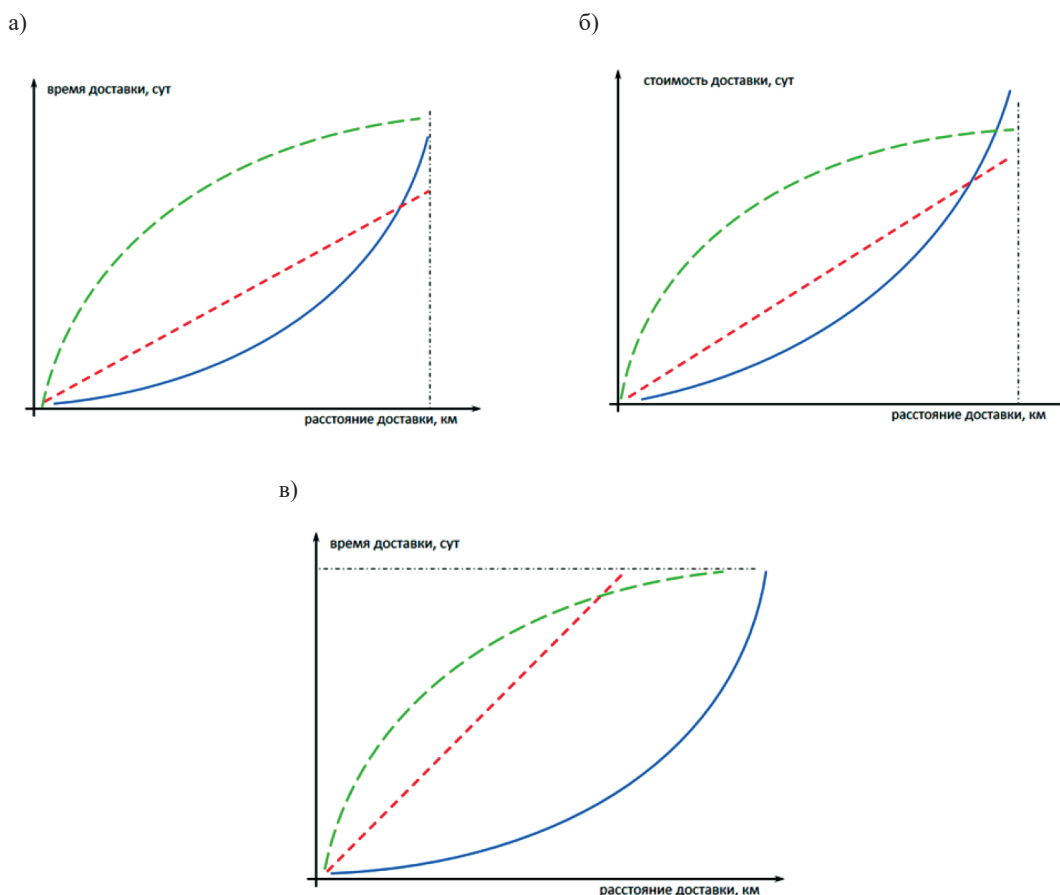


Рис. 2. Поведение характеристик доставки сборных партий грузов:

а — время доставки на одинаковое расстояние; б — стоимость доставки на одинаковое расстояние;

в — время доставки до пункта назначения

Условные обозначения:

- — — — — доставка в тарно-штучном виде;
- - - - - доставка во внутриконтейнерных модулях;
- — — — — доставка в контейнерах и тарно-штучном виде;
- · · · · — — — — — ограничения по доставке сборной партии груза

Результаты данной работы могут быть получены в конечном евклидовом пространстве R^n со скалярным произведением x, y и нормой $x = \sqrt{x, x}$, $x, y \in R^n$ (рис. 3).

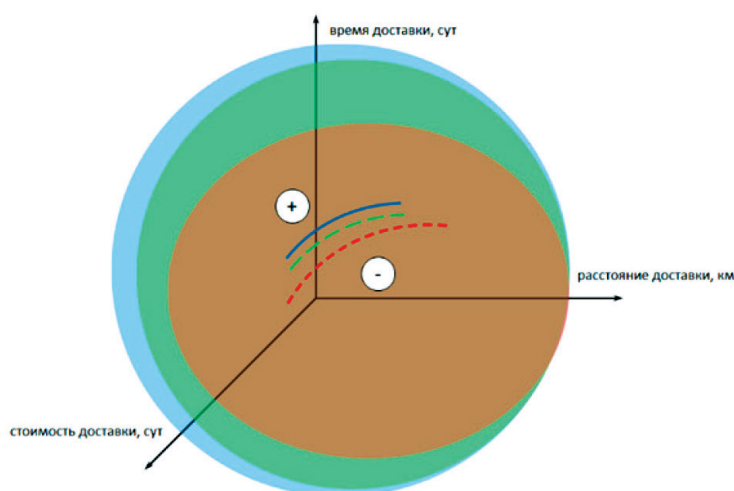


Рис. 3. Минимизации функций на выпуклом множестве и их интегральное обобщение

Условные обозначения:

- доставка в тарно-штучном виде;
- доставка во внутриконтейнерных модулях;
- доставка в контейнерах и тарно-штучном виде

Таким образом, из ранее изложенного видно, что доставка малых партий грузов во внутриконтейнерных модулях имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными вариантами транспортировки и может обеспечить сокращение как временных, так и стоимостных показателей.

Заключение (Conclusion)

Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в трех измерениях дает необходимую информацию грузоотправителю (транспортному агенту, экспедитору) о возможных задержках и издержках при организации доставки малых (сборных) партий грузов в глубь хинтерленда контейнерного терминала, что позволяет принять решение на перевозку в условиях осознанно возможного риска снижения одной из качественных характеристик транспортировки с учетом загрузки транспортной сети, организации грузовой единицы транспортировки и количества привлекаемых к перевозке транспортных средств, способных выполнять требуемый объем работ на каждом элементе рассматриваемой сети (контейнерных терминалах, складских зонах, погрузочно-разгрузочных местах, перегонах и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкин Э. А. Управление цепями поставок: лучшая российская и мировая практика / Э. А. Черкин // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 5(48). — С. 52–54. — EDN RSSCEF.
2. Ветрова Е. Н. Методические подходы к локализации промышленного производства на современном этапе / Е. Н. Ветрова, Г. С. Азирова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2023. — № 1. — С. 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12. — EDN QYCLSD.
3. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261. — EDN VILYCW.
4. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета.

Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148. — EDN OSRNVS.

5. Изотов О. А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136. — EDN CFBNXS.

6. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.

7. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

8. Kuzmicz K. A. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // Omega. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

9. Almetova Z. Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

10. Lee C-Y. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C-Y. Lee, D-P. Song // Transportation Research Part B: Methodological. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

11. Изотов О. А. Управление морскими контейнерными системами перевозок сборных партий грузов: монография / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, О. В. Соляков. — М: Моркнига, 2024. — 296 с.

REFERENCES

1. Cherkin, E. A. “Managing the supply chain: best practice in Russia and internationally.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(48) (2013): 52–54.

2. Vetrova, E. N. and G. S. Azirov. “Methodological approaches to localization of industrial production at the present stage.” *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment* 1 (2023): 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12.

3. Izotov, O. A., Yu. I. Vasil’ev and O. A. Razhev. “Processes for forming groupage container consignments.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

4. Izotov, O. A. and A. L. Kuznetsov. “Development prospects of technologies of grouped cargo containerization.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.

5. Izotov, O. A., A. L. Kuznetsov and D. L. Golovtsov. “Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.

6. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

7. Lv, B., B. Yang, X. Zhu and J. Li. “Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport.” *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

8. Kuzmicz, K. A. and E. Pesch. “Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation.” *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

9. Almetova, Z., V. Shepelev and S. Shepelev. “Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes.” *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

10. Lee, C-Y. and D-P. Song. “Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities.” *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

11. Izotov, O. A., A. L. Kuznetsov and O. V. Solyakov. *Upravlenie morskimi konteynernymi sistemami perevozok sbornykh partiy грузов: monografiya* M: Morkniga, 2024: 296.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 06 декабря 2024 г.

Received: Dec. 6, 2024.

DEPTH-AIDED PREDICTION OF VESSEL LATITUDE BASED ON A NEURAL NETWORK

V. V. Deryabin, A. E. Sazonov

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

A method for determining vessel latitude based on depth using a neural network is proposed. The network takes as input a sequence of depth values measured by a single-beam echo sounder and predicts the vessel's latitude at the moment of the latest depth measurement. The network has two layers. The first layer contains neurons with hyperbolic tangent activation functions. The second layer consists of a single neuron with an identical activation function. The training dataset consists of training and validation sets. The training set is formed based on a depth layer contained within an electronic navigational chart (ENC). The validation set is formed by pseudorandom variations of input samples from the training set. Each of these variations corresponds to a constant sea level variation due to measurement errors and/or fluctuations of wind and/or tidal nature. The network is trained using the Adamax optimization algorithm. The maximum absolute value of latitude prediction error for the validation set is used as a criterion for training efficiency. After training, the network is tested using test samples obtained in the same manner as for the validation set. The simulation is conducted using the Python programming language. The TensorFlow library is used for training and operating the neural network. The simulation is conducted for several network configurations, each differing in the number of hidden neurons. As a result, it has been found that the networks show a tendency to learn how to predict vessel latitude using depth values as input data. This fact allows them to be considered as promising tools for bathymetric navigation.

Keywords: vessel, latitude, depth, neural network, machine learning, autonomous mode, seabed relief, calculation algorithm, electronic chart, navigation.

For citation:

Deryabin, Victor V. and A. E. Sazonov. "Depth-aided prediction of vessel latitude based on a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104.

УДК 656.61:004.032.26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ МЕСТА СУДНА ПО ГЛУБИНАМ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов

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

Предложен метод определения широты места судна по глубине на основе нейронной сети, которая принимает на вход последовательность глубин, измеренных при помощи однолучевого эхолота и прогнозирует широту на момент измерения последней глубины. Сеть имеет два слоя. Первый слой содержит нейроны с функциями активации в виде гиперболического тангенса, второй состоит из одного нейрона, обладающего тождественной функцией активации. Набор учебных данных состоит из обучающей и контрольной выборок. Обучающая выборка формируется на основе слоя глубин, содержащегося в электронной навигационной карте. Контрольная выборка формируется путем псевдослучайных вариаций входных образцов из обучающей выборки. Каждая такая вариация соответствует постоянному изменению уровня моря вследствие ошибок измерений и/или колебаний ветрового и/или приливоотливного характера. Обучается сеть методом Adamax. Критерием эффективности обучения служит наибольшее значение модуля ошибки прогноза широты, определенное для образцов из контрольной выборки. После обучения сеть проходит тестирование на образцах, полученных аналогичным образом, как для контрольной выборки. Моделирование выполнено с использованием языка программирования Python. Для обучения и реализации работы нейронной сети используется библиотека TensorFlow. Моде-

лирование выполнено для нескольких вариантов архитектуры сети, каждый из которых отличается количеством нейронов в скрытом слое. В результате было зафиксировано, что нейронные сети имеют тенденцию к обучению их прогнозированию широты места судна по последовательности глубин, что позволяет рассматривать их в качестве перспективного инструмента для решения задач батиметрической навигации.

Ключевые слова: судно, широта, глубина, нейронная сеть, машинное обучение, автономный режим, рельеф дна, алгоритм расчета, электронная карта, навигация.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Определение широты места судна по глубинам на основе нейронной сети / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104. — EDN KCJFZV.

Введение (Introduction)

Алгоритмы корреляционно-экстремальной навигации (по эталонным данным) могут выступать в качестве альтернативы системам спутниковой навигации, астрономическим и радиолокационным методам. В первую очередь для целей морского судовождения представляет интерес *навигация по рельефу дна*. Указанные методы хорошо разработаны и изучены в научной литературе (см., например, [1]–[3]). Привлекательность методов навигации по рельефу дна объясняется наличием на судне однолучевого эхолота, которым оснащены все конвенционные морские суда валовой вместимостью 300 и более. Для составления эталонной карты глубин необходим приемник спутниковой системы, который также широко используется в морской навигации и гидрографии. Батиметрическая система, построенная на основе таких эталонных данных, может служить дополнительным средством определения места судна в открытом море, когда все остальные методы окажутся недоступными или будут иметь неприемлемую точность. Необходимым условием ее работы является достаточная выраженность рельефа морского дна. Следует отметить, что существует возможность работы такой системы совместно с системой счисления, используемой для уменьшения области поиска.

Подходы к решению задач навигации по эталонным данным известны достаточно давно. Одним из первых был TERCOM (Terrain Contour Matching) [4], предполагающий сравнение текущего (измеренного) профиля рельефа местности с эталонными, которые находятся в базе, созданной заранее на основе предварительных измерений, — своеобразной карте местности. Сравнение выполняется в режиме реального времени, что требует значительных вычислительных ресурсов даже несмотря на то, что область поиска может быть существенно уменьшена за счет использования приближенной навигационной системы, в качестве которой, как правило, используется счисление. Мерой близости текущего и измеренного профилей часто выбирается средний модуль отклонения (MAD — Mean Absolute Difference).

Альтернативным подходом является SITAN (Sandia Inertial Terrain-Aided Navigation) [5], представляющий собой алгоритм оптимальной оценки координат на основе фильтра Калмана, уравнение измерений которого строится на основе линеаризации глубины акватории как функции, зависящей от координат. Линеаризация выполняется в окрестности счислимой точки. Уравнение состояний может быть построено на основе статистики невязок навигационного счисления в заданном районе моря. При таком подходе в качестве вектора оцениваемых параметров выступают поправки к счислимым координатам. SITAN имеет недостаток, заключающийся в том, что при его использовании может наблюдаться расхожимость процесса оценки. Указанное является наиболее вероятным, когда фактическое место судна значительно отличается от местоположения, определенного по счислению.

В связи с особенностями указанных методов возникает задача разработки алгоритма, обладающего достаточным быстродействием и исключающего возможность расхожимости при любых условиях плавания. Быстрые алгоритмы, как известно, можно реализовать путем использования искусственных нейронных сетей, которые также могут рассматриваться в ряде случаев как инструменты

универсальной аппроксимации функций нескольких переменных. Возможность использования нейросетей для создания системы батиметрической навигации исследована в статьях [6]–[8]. В исследованиях [6] и [8] рассмотрен одномерный случай, когда судно движется вдоль оси некоторого направления, и возникает задача оценки расстояния (линейной координаты), пройденного вдоль указанного направления. В [7] рассмотрен двумерный случай, когда нейронная сеть, принимая на вход вектор измеренных значений глубины, прогнозирует широту и долготу судна на момент последнего измерения. Набор учебных данных для обучения сети формируется на основе моделирования рельефа дна при помощи многочлена второй степени. В статье [9] также рассматривается двумерный подход, при котором в качестве источника исходных данных выбраны официальные электронные навигационные карты (ЭНК), используемые в морской навигации в электронных картографических навигационных информационных системах (ЭКНИС). Подход с использованием ЭНК привлекателен возможностью получения эталонной батиметрической информации без проведения специальных предварительных промеров, причем указанная информация имеет статус официальной, так как содержится в слое глубин ЭНК, выпускаемых в соответствии с требованиями ИМО от имени государственных гидрографических организаций. Сложность подхода заключается в том, что глубины в ЭНК находятся в узлах нерегулярной сетки координат, и необходимо решать задачу их приведения к регулярной сетке, которая может использоваться для целей навигации.

Результаты, представленные в [9], показывают, что проблема увеличения точности работы батиметрической системы остается актуальной. Следует отметить, что не для всех рассмотренных ЭНК точность оказалась удовлетворительной. Один из путей увеличения точности может находиться в области поиска подходов к выбору архитектуры сети, выполняющей задачу прогноза координат. Вариантом такого выбора может служить переход к раздельному прогнозированию широты и долготы. В настоящей статье рассматривается построение нейронной сети, прогнозирующей только широту в рамках решения задачи батиметрической навигации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. При помощи однолучевого эхолота на этапе предварительных промеров измеряется последовательность значений глубины d на заданной акватории. Каждому значению глубины из указанной последовательности сопоставляется значение широты φ судна, измеренное с высокой точностью, например, при помощи приемника спутниковой навигационной системы. Пусть непосредственно для определения местоположения используется p значений глубины. Тогда возникает задача реализации на основе нейронной сети функциональной зависимости следующего вида:

$$\varphi_{k+p-1} = f(d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}).$$

Здесь $k = 0, 1, 2, \dots, n - p + 1$, где $n + 1$ — количество глубин, содержащихся в общей эталонной последовательности.

Примечание. Параметр p предполагается равным, как правило, не менее двух. Однако $p = 1$ тоже возможно, когда речь идет о навигации по аномалиям рельефа. При этом аномалии рельефа (точки с существенно различимыми глубинами) должны располагаться достаточно близко друг к другу в узлах регулярной сетки. В целом, предполагается, что при любом p глубины измеряются в узлах регулярной сетки.

Следует отметить, что постановка задачи предполагает проведение специальных предварительных промеров. Если проведение таких промеров не планируется, то карту глубин можно построить в узлах регулярной сетки и на основе информации, содержащейся в гидрографических базах данных или ЭНК. При таком подходе также можно считать, что предварительные промеры выполнены и в дальнейшем использовать их для построения системы навигации по рельефу дна.

Архитектура нейронной сети. При выборе архитектуры нейронной сети необходимо в первую очередь учитывать, что она должна решать задачу приближения функций нескольких перемен-

ных. Как известно (см., например, [10] и [11]), нейронная сеть прямого распространения персептронного типа с одним скрытым слоем нелинейных нейронов может приблизить любую непрерывную функцию многих переменных с любой наперед заданной точностью. Такую сеть будем использовать в рамках настоящего исследования. Общий вид ее архитектуры представлен на рис. 1.

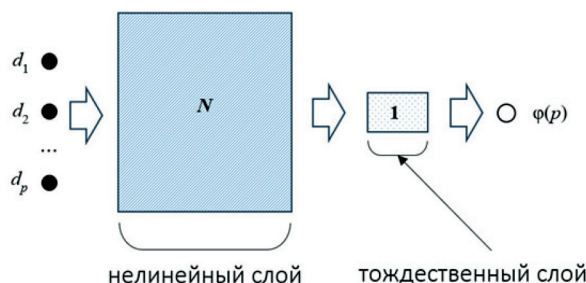


Рис. 1. Общий вид архитектуры нейронной сети

Нелинейный слой нейронной сети состоит из N нейронов, имеющих нелинейную функцию активации, в качестве которой выступает гиперболический тангенс. Выходной слой состоит из одного нейрона, имеющего тождественную функцию активации, т. е. преобразующего вход в выход без изменений. Количество скрытых нейронов N является неизвестным параметром, но именно от него зависит качество приближения многомерной зависимости. В настоящее время не существует строгих методов определения количества N в общем случае, поэтому вопрос выбора данной величины решается часто опытным путем, т. е. рассматриваются несколько архитектур с различными значениями N . Для каждой из них организуется обучение и тестирование, по результатам которого, в соответствии с выбранной метрикой, принимается решение о выборе N . В данном исследовании также варьируется число скрытых нейронов N с тем, чтобы определить степень влияния размера скрытого слоя на точность прогноза широты места судна в рамках нейросетевой батиметрической системы.

Набор учебных данных. Традиционно включает две выборки: обучающую и контрольную. Обучающая выборка непосредственно является тем исходным «учебным материалом», на основе которого решается задача оптимизации параметров нейросети, в качестве которых, как известно, выступают весовые коэффициенты и пороговые смещения. Однако в процессе обучения может наблюдаться ситуация, когда для образцов обучающей выборки будет достигнута очень хорошая точность сети, но при использовании других образцов на стадии тестирования она резко ухудшается. Иными словами, наблюдается *переобучение*. Для предотвращения его используется контрольная выборка, характеристики точности которой являются определяющими при сохранении лучшего состояния сети в процессе обучения.

В качестве источника данных о глубинах была использована ЭНК US4VA70M. При помощи утилиты командной строки ogrinfo, которая входит в пакет GDAL, был извлечен слой глубин SOUNDG. В результате был получен массив глубин на нерегулярной сетке географических координат (геодезические широта и долгота на поверхности эллипсоида WGS-84). Глубины рассматривались внутри района, ограниченного меридианами и параллелями следующим образом:

- параллелью 37°46,0' N с Севера;
- меридианом 075°29,4' W с Запада;
- параллелью 37°25,9' N с Юга;
- меридианом 075°04,1' W с Востока.

В границах указанного района была сформирована регулярная сетка глубин, имеющая пространственное разрешение примерно 1×1 милю. Угловой шаг по широте выбирался как отношение 1 мили (1852 м) к радиусу кривизны меридиана на параллели, ограничивающей район с севера. Пространственное разрешение по широте в точках, находящихся южнее северной

параллели, менее 1 мили, так как радиус кривизны уменьшается при движении от полюса к экватору. Следовательно, уменьшается и длина дуги, соответствующая одному и тому же значению центрального угла (угловому шагу). Аналогичным образом выбирается и угловой шаг по долготе, т. е. он рассчитывается как отношение одной мили к радиусу кривизны южной параллели. Понятно, что определенное таким образом значение угла-шага по долготе на северной параллели будет соответствовать меньшей длине дуги, т. е. пространственному разрешению по долготе менее 1 мили. Ввиду малых размеров района плавания указанное отличие будет незначительным, тем более что оно наблюдается в меньшую сторону.

После определения шагов по широте и долготе на итерациях вложенных циклов (внешний цикл — по долготе, внутренний — по широте) определяются значения координат узлов регулярной сетки глубин в пределах района плавания. Глубины в узлах сетки определяются *методом линейной интерполяции*. Подобный способ формирования образцов предполагает, что рекомендуемое направление для целей батиметрической навигации пролегает вдоль меридианов с юга на север.

Количество глубин, по которым вычисляется значение широты, составляет $p = 10 + 1$, т. е. в режиме сбора данных о глубинах судно проходит примерно 10 миль в направлении с юга на север, после чего выполняется вычисление нейронной сетью широты. Последняя определяется на момент последнего (одиннадцатого) измерения глубины. Следующее определение координаты выполняется по прошествии еще одной мили, и далее процесс повторяется до тех пор, пока судно не покинет район батиметрической навигации. Общая схема работы системы представлена на рис. 2. Как следует из указанной схемы, общие размеры района плавания составляют приблизительно 20×20 миль. Судно сначала в пределах первой части района плавания накапливает данные о глубинах (район 10×20 миль), что соответствует области сбора данных. Непосредственно батиметрическая навигация осуществляется в пределах второй части района плавания, размеры которого также составляют 10×20 миль.

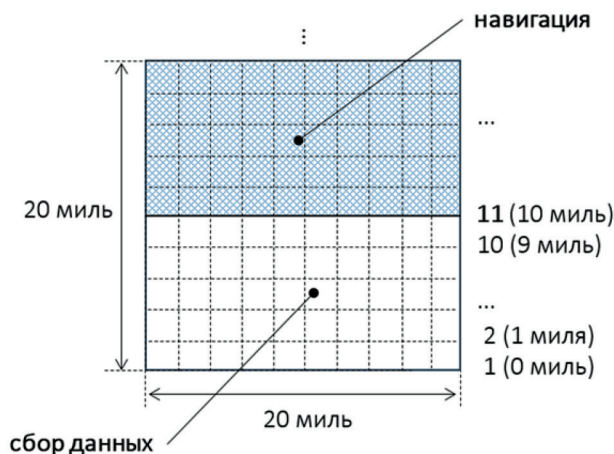


Рис 2. Схема работы системы батиметрической навигации на основе нейронной сети

В рамках небольшого участка ЭНК можно получить лишь ограниченное количество образцов, которые будут использоваться только для обучения. Для контрольной выборки необходимо сгенерировать на их основе другой набор данных. Указанное реализуется следующим образом. К каждой глубине из обучающей выборки прибавляется некоторое псевдослучайное число, подчиненное закону равномерного распределения из промежутка ± 1 м, значение широты при этом остается неизменным. Иными словами, входные образцы варьируются, а выходные — остаются неизменными. Подобное варьирование предполагает ситуации, когда фактический уровень моря в одной и той же точке акватории может быть различным на этапе измерения и навигации. Различие может быть вызвано приливами, ветровыми сгонно-нагонными явлениями, а также ошибками измерений, имеющими

постоянный характер. Таким образом, в контрольной выборке закладывается своеобразный запас устойчивости (робастности) сети, позволяющий надеяться на адекватный прогноз в тех случаях, когда форма входного сигнала несколько отличается от эталонной, т. е. той, которая представлена входными образцами из обучающей выборки.

Путем использования 100 указанных вариаций формируется контрольная выборка. В результате получено 462 образца (11 — мерных векторов глубин) для обучающей выборки, 23100 образцов для контрольной. При отрицательных вариациях глубины теоретически возможны ситуации, когда входной вектор может содержать глубину, не имеющую практического смысла. Поэтому в рамках алгоритма формирования образцов предусмотрена также проверка видоизмененных глубин на предмет соблюдения следующего условия: они должны быть не менее определенной величины (в данном случае 1 м). Новые глубины, не удовлетворяющие данному требованию, не могут быть использованы для формирования входных образцов.

Следует также отметить, что все образцы (как входные, так и выходные) проходили процедуру нормализации, т. е. приводились к промежутку от -1 до $+1$ по следующей формуле:

$$s^* = \frac{\max - \min}{s_{\max} - s_{\min}}(s - s_{\min}) + \min,$$

где $\min = -1$, $\max = +1$, $s_{\max}$, $s_{\min}$ — соответственно наибольшее и наименьшее возможные значения величины s ; s^* — нормализованное, т. е. приведенное в промежуток $[\min, \max]$ значение величины s .

Как отмечалось ранее, набор учебных данных был сформирован для направления движения вдоль меридиана с юга на север. Тем не менее данный набор может быть легко конвертирован в обратное направление, а также в направления «запад — восток» и «восток — запад». Каждое из указанных направлений будет характеризоваться своим порядком следования образцов несмотря на то, что набор данных о глубинах как массив будет одним и тем же.

Предлагаемый метод формирования набора учебных данных также предполагает, что не только контрольная выборка может быть получена путем псевдослучайных изменений входных сигналов из обучающей выборки. Последняя также может быть расширена путем таких же псевдослучайных видоизменений, т. е. она будет содержать как исходные, так и полученные на их основе видоизмененные данные. При этом сеть уже непосредственно обучается ставить в соответствие один и тот же выход нескольким различным входам. Такая ситуация, как правило, наблюдается на практике ввиду колебаний уровня моря и ошибок в измерениях глубины. Следует заметить, что обратная ситуация, когда одному и тому же входу соответствует несколько различных значений широты, соответствует случаю неоднозначности рельефа, что нежелательно при использовании батиметрической системы навигации. Вопрос определения предельной степени неоднозначности рельефа, допустимой для навигации по глубинам, требует дополнительного исследования.

Псевдослучайная вариация входных образцов из обучающей выборки является не единственным способом уменьшения влияния колебаний уровня моря, вызванных в том числе ошибками измерений. Альтернативным вариантом решения указанной задачи является переход от значений глубин к их производным. Данный подход был рассмотрен в работе [8] для навигации судна по глубинам для одномерного случая, когда на вход сети подавалась последовательность не глубин, а их производных. При этом на выходе получалась координата судна. Сложность такого дифференциального подхода может заключаться в точности определения производных, вместо которых на практике используются конечные приращения.

Процедура обучения. Настройка нейронной сети выполнялась при помощи метода Adamax [12], который, в свою очередь, является разновидностью алгоритма Adam. Последний относится к классу градиентных методов. На каждой итерации величина коррекции весовых коэффициентов учитывает не только характер изменения производной ошибки, но также и квадрата производной. При обучении использовалась не только обучающая, но и контрольная выборка. Лучшее состояние сети

сохранялось на каждой итерации (эпохе) в соответствии с критерием, в качестве которого выбран максимум модуля ошибки, определяемый для образцов из контрольной выборки.

Оптимизационная задача, решаемая в процессе обучения нейронной сети, ставит целью минимизацию среднего квадрата ошибки, так как производные такой целевой функции легко рассчитываются аналитически, что необходимо для реализации алгоритма обратного распространения ошибки. Среднеквадратическая ошибка позволяет избежать грубых промахов в отличие от максимального модуля. Действительно, если в выходном образце допущена существенная ошибка, то даже при абсолютно точном прогнозе сетью ее величина будет определять максимум модуля. В случае среднего квадрата «вклад» промаха в него будет не столь заметен, так как выполняется деление на число образцов, для которых вычисляется ошибка. В рассматриваемом случае будем считать, что значение широты определяется довольно точно, в связи с чем выбор критерия в виде максимума модуля ошибки представляется вполне оправданным. Таким образом, алгоритм обучения ставит целью минимизировать среднюю квадратическую ошибку, но лучшее состояние сети определяется в соответствии с максимальным модулем. Конечно, корреляция между динамикой этих двух показателей существует, но все же она не всегда однозначная, т. е. уменьшение среднего квадрата не обязательно приведет к уменьшению максимума модуля на некотором отрезке времени обучения. Другими параметрами процедуры обучения являются число эпох-итераций (5000), размер мини-пакета (100), параметры непосредственно Adamax (скорость обучения, параметры экспоненциального среднего, стабилизирующая константа и некоторые другие).

Тестирование. После обучения сети выполняется ее тестирование путем проверки работоспособности на образцах из тестовой выборки. Последняя формируется точно так же, как и контрольная, т. е. путем псевдослучайного изменения входных образцов из обучающей выборки при сохранении неизменными выходных. Так же, как и для контрольной выборки, предполагается изменение уровня моря в пределах ± 1 м. Использовано 1000 таких случайных видоизменений, т. е. размер тестовой выборки в 10 раз превышает размер контрольной. В качестве метрики, характеризующей качество работы нейросети, по-прежнему остается наибольшее значение модуля ошибки прогноза.

Результаты (Results)

Формирование набора учебных данных, обучение и тестирование сети были реализованы на языке программирования Python с использованием ряда необходимых библиотек (например, NumPy для работы с массивами). Непосредственно для обучения нейронной сети использовалась библиотека TensorFlow (версия 2.16.1) с интерфейсом Keras. Параметры алгоритма обучения Adamax были взяты теми, какими они установлены по умолчанию в TensorFlow. На каждой итерации определялось наибольшее значение модуля ошибки прогноза широты для образцов из контрольной выборки. График процесса обучения для сети, содержащей 100 скрытых нейронов, приведен на рис. 3.

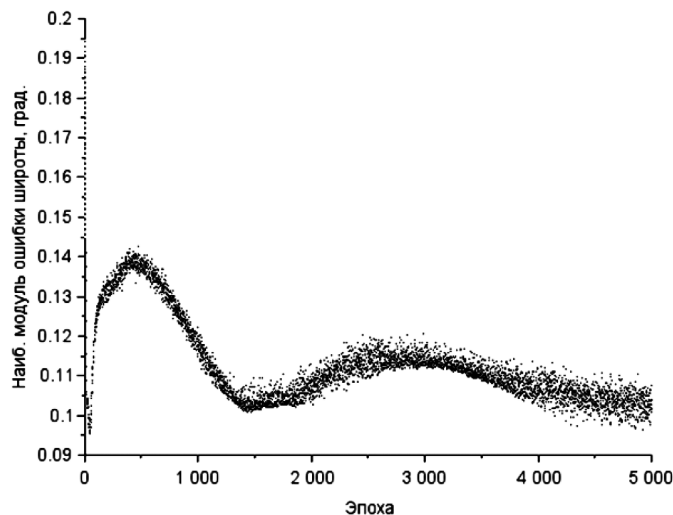


Рис 3. График процесса обучения ($N = 100$) для контрольной выборки

Результаты обучения и тестирования для архитектур с различным количеством скрытых нейронов сведены в таблицу.

Результаты обучения и тестирования нейронной сети

Количество нейронов в скрытом слое	Обучение		Тестирование	
	Наименьший максимум модуля ошибки, °	Номер итерации наименьшего максимума	Максимум модуля ошибки, °	Средний модуль ошибки, °
10	0,099473	4416	0,106388	0,033664
20	0,087745	4573	0,089818	0,02974
30	0,093003	4959	0,094822	0,030071
40	0,093104	4979	0,094726	0,029605
50	0,092017	4993	0,093677	0,029879
100	0,095417	45	0,102012	0,030728

В графе «Обучение» приведено наименьшее значение максимума модуля ошибки прогноза широты для образцов из контрольной выборки, а также номер «наилучшей» итерации, при которой это значение было зафиксировано. В графе «Тестирование» приведены максимальное и среднее значения модуля ошибки прогноза координаты, вычисленные для всех образцов из тестовой выборки после окончательного обучения нейронной сети. Значения показателей точности для обучающей выборки не приводятся.

Обсуждение (Discussion)

Результаты, представленные в таблице, показывают, что нейронная сеть после обучения имеет довольно низкую точность как на контрольной, так и на тестовой выборках. Лучший результат 0,089818° в качестве модуля погрешности определения широты соответствует примерно 5,4 мили в ошибке определения места. Средняя точность тоже невысокая, она варьируется приблизительно от 1,8 до 2 миль в ошибке определения места. При этом размеры области навигации в районе плавания составляют приблизительно 20 × 10 миль. Точность на тестовой выборке получилась хуже, чем на контрольной, что, в принципе, логично, тем более, что контрольная выборка содержит в 10 раз меньше образцов, чем тестовая, но в целом указанные отличия в точности не очень ощутимы, что свидетельствует о репрезентативности контрольной выборки, которая действительно характеризует эффективность работы нейронной сети на стадии обучения.

Несмотря на низкую точность, приведенные результаты позволяют надеяться на успешность процесса обучения. Об этом свидетельствует также кривая обучения, приведенная на рис. 3. Согласно данным, приведенным в таблице, наилучшие результаты достигаются ближе к концу обучения, кроме случая со 100 скрытыми нейронами, когда наименьший максимум модуля ошибки был зафиксирован на 45-й итерации. Поэтому можно надеяться, что результаты могут быть улучшены путем увеличения длительности обучения, т. е. максимального количества эпох. Кривая, приведенная на рис. 3, также позволяет сделать предположение, что с увеличением количества итераций может быть получена лучшая точность, чем на 45-й итерации. На графике видно, что показатель точности в районе 5000-й итерации незначительно отличается от результата, полученного на 45-й итерации. Следует отметить явно выраженный высокочастотный колебательный характер кривой обучения, приведенной на рис. 3, что подтверждает правильность подхода, предполагающего использование контрольной выборки и вычисления для нее метрики точности на каждой итерации обучения.

Отдельно следует рассмотреть вопрос влияния размера скрытого слоя на эффективность обучения. В настоящем исследовании рассмотрено 10, 20, ..., 50 и 100 нейронов скрытого слоя. Как следует из приведенной таблицы, изменение размера скрытого слоя существенным образом не меняет точность нейронной сети. Конечно, можно предположить, что при увеличении количества эпох

для архитектур с большим количеством скрытых нейронов можно получить лучшие результаты, но для 5 000 эпох ситуация именно такая. Другой интерпретацией неизменяемости точности может служить то, что нейронная сеть с большим количеством нейронов быстрее переобучается, и дальнейшее обучение теряет всякий смысл.

Создаваемая на основе нейронной сети батиметрическая система навигации имеет два режима работы. Первый режим (обучение) характеризуется настройкой нейронной сети на основе данных, полученных на регулярной сетке глубин. Второй режим (навигация) — это прогнозирование уже обученной сетью координаты (в данном случае широты). Технология формирования набора учебных данных была описана ранее. Теперь необходимо уточнить, каким образом заполняется входной вектор нейросети в режиме навигации. Рассмотрим следующую ситуацию: судно зашло в район батиметрической навигации и следует вдоль рекомендованного направления движения (в данном случае с юга на север). Нужно понять, каким образом в данном случае определяются моменты времени, в которые нужно делать промеры. Понятно, что промеры нужно делать в узлах регулярной сетки глубин, но как определить, что судно находится в узле, если местоположение его является искомой величиной. Для этого необходимо использовать счисление, на основе которого следует определять текущее приращение широты и по достижении им значения, равного дискретности модели, выполнять промер глубины. Очевидно, что точность счисления будет оказывать влияние на адекватность промеров, и, следовательно, на точность прогноза нейронной сети, поскольку даже сеть, обученная абсолютно точно, будет выдавать прогноз с ошибкой вследствие погрешностей исходных данных, содержащихся во входном векторе.

Таким образом, роль счисления остается значительной даже в рамках такого нейросетевого подхода. Для сети нет необходимости знать область поиска решения, так как она обучена для всего участка батиметрической навигации. При этом существует потребность в определении моментов времени выполнения промеров глубин, для чего и используется счисление. Более того, счисление может быть также полезно для определения текущего участка батиметрической навигации, если район плавания состоит из двух или более таких участков. В этом заключается сходство при использовании счисления с TERCOM-подходом. Если создать отдельно еще и сеть, прогнозирующую долготу, то получится своеобразная связка двух сетей, имеющих общий вход: одна сеть прогнозирует широту, другая — долготу. В результате получается местоположение судна, определенное по последовательности глубин, измеренных однолучевым эхолотом, который доступен на многих судах морского флота. На первый взгляд может показаться, что отдельный прогноз (например, широты) похож на одномерный случай, рассмотренный в статьях [6] и [8]. Однако прогноз только широты и долготы вовсе не означает, что судно движется в некотором одномерном пространстве, оно движется по поверхности эллипсоида в двумерном пространстве двух угловых координат: широты и долготы.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования изучена возможность использования нейронных сетей для решения задач, связанных с навигацией по глубинам для судов морского флота. Несмотря на невысокие характеристики точности, достигнутые на текущий момент, нейросетевые системы прогноза широты судна по глубинам обнаруживают тенденцию к обучению, что позволяет в дальнейшем надеяться на создание работоспособных систем, которые можно будет применять на практике судовождения, используя конвенционный однолучевой эхолот. Изменение размера скрытого слоя сети не позволило заметить существенное изменение точности, что приводит к предположению, что вопрос может заключаться не только в архитектуре, но также и в параметрах алгоритма формирования набора учебных данных и настройки сети. Не слишком большие отличия характеристики точности нейросети, рассчитанные для контрольной и тестовой выборки, позволяют сделать вывод о том, что формирование контрольной выборки отвечает целям определения оптимальной в плане точности архитектуры на этапе обучения.

В качестве направления дальнейших исследований целесообразно определить следующее. Во-первых, необходимо заниматься вопросами повышения точности нейронной сети в рамках существующей архитектуры с одним скрытым слоем. Возможно, лучшие результаты могут быть получены путем изменения алгоритмов формирования набора учебных данных и / или обучения. Во-вторых, следует рассмотреть и другие, в том числе глубокие, архитектуры как в рамках сетей персептронного типа, так и других (например, на основе радиальных базисных функций, сетей свертки). В-третьих, целесообразно вести исследования в области устранения неоднозначностей в навигации по эталонным данным в рамках нейросетевой модели определения координат места судна по глубинам. Перспективным в этом отношении является совместное использование системы батиметрической навигации с системой навигационного счисления, позволяющей определять приближенные координаты судна на основе лага и гирокомпаса. В-четвертых, необходима разработка алгоритмов оценки пригодности рельефа дна для целей навигации по глубинам, в том числе на основе нейронной сети. В связи с этим необходима также оценка потенциальной точности нейросетевой батиметрической системы для заданного района моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключева С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Ключева, В. В. Завьялов. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. — 132 с.
2. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах: Аналитический обзор / О. А. Степанов. — СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 1993. — 84 с.
3. Ma D. A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder / D. Ma, T. Ma, Y. Li, Y. Ling, Y. Ben // Ocean Engineering. — 2023. — Vol. 286. — Pp. 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden J. P. Terrain Contour Matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid / J. P. Golden // Image processing for missile guidance. — 1980. — Vol. 238. — Pp. 10–18.
5. Longenbaker W. E. Terrain-aided navigation of an unpowered tactical missile using autopilot-grade sensors / W. E. Longenbaker // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. — 1984. — Vol. 7. — № 2. — Pp. 175–182.
6. Дерябин В. В. Нейросетевой метод определения места судна по рельефу дна / В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734. — EDN XZLJTC.
7. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16. — EDN LJVSHI.
8. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179. — EDN ZCDZNR.
9. Дерябин В. В. Нейросетевое решение задачи определения места судна по рельефу дна / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2024. — № 2. — С. 257–260. — EDN DVCMJY.
10. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. — New Jersey: Pearson, 2009. — 936 p.
11. Горбань А. Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А. Н. Горбань // Сибирский журнал вычислительной математики. — 1998. — Т. 1. — № 1. — С. 11–24. — EDN PRZOML.
12. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. J. Kingma, Ba // 3rd International Conference on Learning Representations. — 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

REFERENCES

1. Klyueva, S. F., and V. V. Zav'yalov. *Sintez algoritmov batimetricheskikh sistem navigatsii*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013.
2. Stepanov, O. A. *Metody otsenki potentsial'noi tochnosti v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh: Analiticheskii obzor*. Spb.: TsNII «Elektroprivor», 1993.

3. Ma, D., T. Ma, Y. Li, Y. Ling and Y. Ben “A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder.” *Ocean Engineering* 286 (2023): 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden, J.P. “Terrain Contour Matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid.” *Image processing for missile guidance* 238 (1980): 10–18.
5. Longenbaker W. E. “Terrain-aided navigation of an unpowered tactical missile using autopilot-grade sensors.” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 7.2 (1984): 175–182.
6. Deryabin, Victor V. “Neural network-based method for determining vessel position by seabed relief.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734.
7. Deryabin, Victor V. “Depth-based vessel position fixing by means of a neural network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.
8. Deryabin, Victor V. “Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.
9. Deryabin, V. “Neural net-based bathymetric solution of vessel position fixing.” *Transport business in Russia* 2 (2024): 257–260.
10. Haykin, Simon. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. New Jersey: Pearson, 2009.
11. Gorban', A. N. “Obobshchennaya approksimatsionnaya teorema i vychislitel'nye vozmozhnosti neyronnykh setey.” *Siberian journal of numerical mathematics* 1.1 (1998): 11–24.
12. Kingma, Diederik P., and Jimmy Ba. “Adam: A method for stochastic optimization.” *3rd International Conference on Learning Representations*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Виктор Владимирович —
 доктор технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru
Сазонов Анатолий Ефимович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Deryabin, Victor V. —
 Dr. of Technical Sciences, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru
Sazonov, Anatoly E. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 02 декабря 2024 г.
 Received: Dec. 2, 2024.

DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS VESSEL CONTROL SYSTEM BASED ON THE ROS2 OPERATING SYSTEM

A. A. Dyda¹, I. I. Pushkarev²

¹ Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

² "CASHALOT" LLC, Vladivostok, Russian Federation

The research focuses on the development of a control system for an autonomous vessel using the Robot Operating System 2 (ROS2). Autonomous vessels are highlighted as a promising class of robotic systems designed for various tasks in the maritime environment, including area monitoring, scientific research, search and rescue, and transport operations. Their key advantages lie in their autonomy, operational flexibility, and ability to operate in conditions hazardous to humans. The study explores the use of the modern Robot Operating System 2 for robotics, which ensures modularity, scalability, and a high degree of distributed computing. This software provides ready-made algorithms for navigation, sensor data processing, and motion control, as well as tools for testing, debugging, and data visualization, thereby accelerating development and enhancing system reliability. As part of the research, a structural diagram of the autonomous vessel control system was developed, incorporating subsystems for navigation, computer vision, motion control, and operator interaction via a shore-based console, illustrating the composition and interaction of individual operating system nodes. A device diagram is presented, showing the distribution of computing resources between the nodes. The proposed control system demonstrates the possibility of integrating various autonomous vessel subsystems into a unified system based on the common interaction logic and data exchange of the Robot Operating System 2. The application of this operating system enhances development speed, improves software reliability, simplifies the integration of complex algorithms, and ensures system flexibility for future improvements.

Keywords: autonomous vessel, algorithm, software, computer vision system, navigation system, Kalman filter, navigation rules, data fusion, automatic control theory, maritime operations, complex robotic systems.

For citation:

Dyda, A. A., I. I. Pushkarev "Development of an autonomous vessel control system based on the ROS2 operating system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 105–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-105-114.

УДК 681.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ СУДНОМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ROS2

А. А. Дыда¹, И. И. Пушкарёв²

¹ Морской Государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия.

² ООО «Кашалот», Владивосток, Россия

Темой исследования является разработка системы управления для автономного судна с использованием операционной системы Robot Operation System 2. Отмечается, что автономные суда являются перспективным классом робототехнических систем, предназначенных для выполнения различных задач в морской среде, включая мониторинг акваторий, научные исследования, поисково-спасательные и транспортные операции. Их ключевыми преимуществами являются автономность, гибкость применения и возможность работы в условиях, представляющих угрозу для человека. В работе рассмотрено использование современной операционной системы Robot Operation System 2 для робототехники, обеспечивающей модульность, масштабируемость и высокую степень распределенности вычислений. Отмечается, что данный вид программного обеспечения предоставляет готовые алгоритмы для навигации, обработки данных сенсоров и управления движением, а также инструменты для тестирования, отладки и визуализации данных, что ускоряет процесс разработки и повышает надежность системы. В рамках исследования разработана структурная схема системы управления автономного судна, включающая подсистемы навигации, технического зрения, управления движением и взаимодействия с оператором через береговой пульт, на которой показаны состав и взаимодействие отдельных узлов операционной системы. Представлена схема устройств, обеспечивающая распределение вычислительных

ресурсов между узлами. Предложенная система управления демонстрирует возможность объединения различных подсистем автоматических судов в общую систему на основе единой логики взаимодействия и обмена данными операционной системы Robot Operation System 2. Применение данной операционной системы позволяет повысить скорость разработки, улучшить надежность программного обеспечения, упростить интеграцию сложных алгоритмов и обеспечить гибкость системы для дальнейших усовершенствований.

Ключевые слова: автономное судно, алгоритм, программное обеспечение, система технического зрения, система навигации, фильтр Калмана, расхождение, комплексирование, теория автоматического управления, морская деятельность, сложные робототехнические системы.

Для цитирования:

Дыда А. А. Разработка системы управления автономным судном на основе операционной системы ROS2 / А. А. Дыда, И. И. Пушкарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 105–114. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-105-114. — EDN MKJPRZ.

Введение (Introduction)

Автономные суда (АС), благодаря развитию технологий автоматического управления и искусственного интеллекта, становятся все более востребованными в морской деятельности. Имея различные размеры и конфигурацию, АС оснащены всевозможными системами навигации, датчиками, камерами и оборудованием в зависимости от их назначения. Спектр решаемых задач также может быть очень разнообразен: от проведения экологического мониторинга до грузовых перевозок и спасательных операций [1], [2].

Ключевым компонентом АС является система управления, обеспечивающая его автоматическое и дистанционное функционирование, эффективность и надежность которой во многом определяют технические и эксплуатационные характеристики АС. Разработка эффективной системы управления и реализация ее в программном коде требует серьезных временных и финансовых затрат. При этом важнейшим фактором для обеспечения конкурентоспособности новых автономных судов является скорость их разработки и ввода в эксплуатацию.

Использование готовых программных библиотек и фреймворков для разработки систем управления АС значительно ускоряет данный процесс. Кроме того, это повышает надежность и масштабируемость системы управления, а также обеспечивает возможность интеграции с передовыми технологиями и стандартами.

Одной из наиболее распространенных, предоставляющих необходимый набор инструментов и библиотек для создания сложных робототехнических систем, является метаоперационная система Robot Operation System 2 (ROS2) [3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

ROS2 — свободно распространяемая метаоперационная система, обеспечивающая разработчиков библиотеками и инструментами для создания программного обеспечения роботов; является второй версией ROS, имеет большие возможности, улучшенную надежность, гибкость и масштабируемость. Система управления автономного судна на основе ROS2 может быть комплексной и модульной, обеспечивая при этом различные функции — от навигации до безопасности.

Основные особенности ROS2:

1. *Модульная архитектура*, позволяющая разделить систему на независимые модули (узлы), которые могут быть разработаны, протестированы и развернуты независимо друг от друга.
2. *Межпроцессное взаимодействие*, позволяющее системе использовать механизм публикаций и подписок для обмена сообщениями между узлами, что позволяет легко обмениваться данными и командами между различными ее частями.
3. *Межсетевое взаимодействие* — поддержка работы в распределенных системах, что позволяет запускать узлы на разных компьютерах в сети, обеспечивая масштабируемость и распределенность системы.

4. *Поддержка реального времени* — с использованием DDS (Data Distribution Service) ROS2 обеспечивает поддержку систем реального времени, что является важным для выполнения задач, требующих высокой надежности и предсказуемости.

5. *Кроссплатформенность* — поддержка различных операционных систем, включая Linux, Windows и MacOS, а также встраиваемых систем и микроконтроллеров.

6. *Инструменты для разработки и отладки* — система предоставляет разнообразные инструменты для разработки, тестирования и отладки, такие как rviz2 для визуализации, Gazebo для симуляции, ros2cli для командной строки и др.

7. *Безопасность* — встроенные механизмы обеспечения безопасности, такие как шифрование и аутентификация, позволяют защитить данные и взаимодействие между узлами.

8. *Системы автоматизации и оркестрации* — поддержка систем автоматизации для развертывания и управления узлами.

9. *Управление пакетами и зависимостями* — система пакетов позволяет легко управлять зависимостями, устанавливать и обновлять программные компоненты.

Концепция ROS2 предполагает, что каждая программа — это узел (node), который взаимодействует с другими узлами посредством топиков (topic) или сервисов (service).

Топик — это канал, по которому узлы могут обмениваться данными. Топики используются для передачи потоковых данных, таких как показания датчиков, изображения с камер или команды управления.

Сервисы позволяют узлам выполнять синхронные запросы и получать ответы. В отличие от топиков, которые используются для однонаправленного потока данных, сервисы предполагают запрос-ответную модель взаимодействия.

Для большей надежности используется модульная архитектура, где каждый узел решает отдельную задачу. В случае отказа одного из них вся система продолжит работу. Отказавшие узлы могут быть перезапущены вручную или автоматически.

Широкий функционал и многочисленные преимущества ROS2 делают ее незаменимой платформой для разработки разнообразных автономных мобильных робототехнических систем. Благодаря гибкой архитектуре, поддержке распределенных вычислений, реальному времени и масштабируемости ROS2 успешно применяется в различных областях робототехники, начиная от наземных мобильных роботов и беспилотных транспортных средств до сложных систем управления дронами и подводными роботами. Важную роль ROS2 играет в создании АС, где критически важными являются такие свойства, как автономность, надежность в условиях реального времени, возможность интеграции множества сенсоров и управление в динамических неопределенных средах.

Система управления автономным судном может состоять из комбинации следующих узлов:

1. *Узлы датчиков и оборудования.* Здесь реализуются программные драйверы, позволяющие взаимодействовать с аппаратной частью, и алгоритмы предварительной обработки данных.

2. *Узел мониторинга и диагностики.* Осуществляет мониторинг технического состояния всех систем АС, включая двигатели, батареи, электронику и другие устройства, а также реализацию аварийных процедур.

3. *Узлы навигационной системы.* Осуществляют комплексирование навигационных данных (спутниковая навигационная система, инерциальная навигационная система, гироскоп, доплеровский лаг и т. п.) для выработки достоверного навигационного решения в режиме реального времени.

4. *Узлы планирования маршрута.* Служат глобальным и локальным планировщиком движения.

5. *Узлы управления движением.* Могут включать регуляторы скорости и направления, а также алгоритмы движения по траектории.

6. *Узлы системы технического зрения.* Выполняют обработку данных датчиков системы технического зрения (видеокамеры, лидары, РЛС и т. п.) и комплексирование для получения достоверных данных об окружающей обстановке.

В основе системы управления автономным судном, реализуемой с использованием ROS2, находится система управления, рассмотренная в работе [4], в которой система управления безэкипажным судном представлена в виде трех взаимосвязанных подсистем: подсистемы удержания

траектории, подсистемы обхода препятствий и подсистемы удержания курса и скорости. Следуя логике ROS2, данные подсистемы можно реализовать в виде отдельных узлов, взаимодействующих друг с другом.

ROS2 предоставляет ряд готовых узлов, требующих только настройки под конкретную систему. Одним из наиболее востребованных готовых решений для робототехнических систем является реализация навигационной системы, позволяющей определять ориентацию и положение робота в пространстве. ROS2 предоставляет пакет `robot_localization`, в состав которого входят узлы для объединения данных с различных датчиков, таких как инерциальные измерительные устройства, устройства измерения скорости, данные с глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и т. п. Фильтры Калмана используются для фильтрации и сглаживания данных [5], [6]. Это позволяет улучшить точность определения положения и ориентации, используя сильные стороны каждого из датчиков.

Не менее востребованным для АС являются алгоритмы планирования траектории движения или так называемые *глобальные и локальные планировщики движения*. ROS2 предоставляет программный стек Nav2, состоящий из различных пакетов и программ, обеспечивающих реализацию всех ключевых аспектов навигации, таких как планирование пути, контроль за движением, уклонение от препятствий и локализация робота в среде с использованием датчиков и картографических данных. В стеке уже предусмотрена реализация нескольких типов планировщиков движения, таких как алгоритмы Дейкстры, A* (A star), а также RRT (Rapidly-Exploring Random Tree), которые могут быть использованы для построения траекторий движения робота в зависимости от задач, стоящих перед системой навигации. Их внедрение в проект не требует разработки «с нуля», так как они уже интегрированы в Nav2, задача сводится лишь к их настройке и адаптации под конкретные требования и параметры целевой системы [7].

Для работы глобального планировщика и планирования маршрута движения необходимы карты препятствий. В Nav2 используются карты препятствий в виде двумерной дискретной карты (рис. 1), где каждая ячейка может находиться в одном из трех состояний: препятствие, свободно, неизвестно.

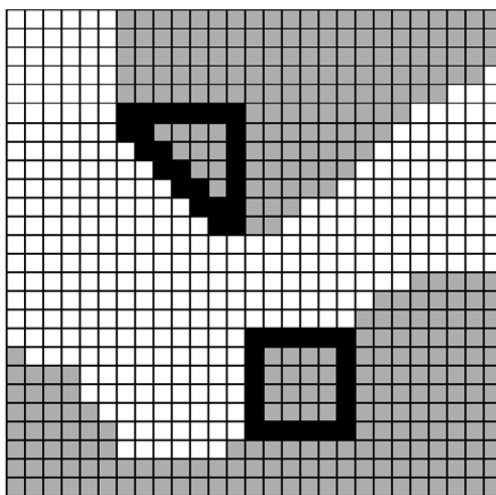


Рис. 1. Пример карты препятствий (белые клетки — свободно, черные клетки — препятствие, серые клетки — неизвестно)

Карты могут создаваться или загружаться следующими способами:

1. Карты могут быть созданы заранее с использованием специального программного обеспечения для картографирования.
2. В Nav2 также поддерживается возможность динамического построения карты во время работы робота с использованием Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [8]. В этом режиме робот строит карту окружающей среды в реальном времени по мере исследования пространства.
3. Карты могут загружаться в Nav2 в виде файлов, созданных ранее.

Для предварительного построения маршрута движения автономного судна требуется заранее созданная карта достаточно большой водной акватории. Наиболее полноценным источником карт для судоходства являются электронные навигационные карты. В статье [9] представлен способ преобразования растрового изображения навигационной карты в формат, подходящий для работы планировщика в Nav2. Изображение карты, на которой отображена поверхность в различных цветах, обрабатывается методом пороговой сегментации (бинаризации) в черно-белое изображение, показывающее препятствие и свободное пространство, и затем разбивается на двумерную сетку.

В мобильных робототехнических системах наряду с мощными бортовыми компьютерами часто применяются микроконтроллеры с ограниченными вычислительными и энергетическими ресурсами. Эти микроконтроллеры используются для выполнения специализированных задач, таких как управление низкоуровневыми сенсорами, обработка сигналов исполнительных механизмов, мониторинг состояния оборудования, а также реализация базовых функций управления. Благодаря их малым размерам и энергоэффективности, они идеально подходят для установки в небольшие устройства и узлы робота, где требуется высокая производительность при минимальном потреблении энергии.

Для полноценной интеграции этих устройств в общую систему управления, построенную на основе ROS2, используется micro-ROS [10] — специализированная версия ROS, адаптированная для работы в условиях ограниченных ресурсов. Micro-ROS позволяет микроконтроллерам общаться с основными вычислительными модулями робота, поддерживая обмен данными в реальном времени и сохраняя совместимость с высокоуровневыми ROS-компонентами. Это позволяет микроконтроллерам выполнять свои задачи эффективно и безопасно, при этом взаимодействуя с более сложными системами навигации, планирования движения и восприятия окружающей среды. Кроме того, micro-ROS поддерживает стандарт DDS, что гарантирует надежную, масштабируемую и отказоустойчивую передачу данных в распределенных системах.

Результаты (Results)

На рис. 2 приведена схема предлагаемой системы управления автономным судном на основе операционной системы ROS2. Здесь продемонстрирован общий подход создания модульной архитектуры, где некоторые функциональные задачи судна и оборудования выделены в виде отдельного узла.

Систему управления АС можно условно разделить на четыре основные составляющие: систему навигации, систему технического зрения, систему управления движением и пульт оператора. Система навигации состоит из группы узлов, реализующих конечное навигационное решение, которое позволяет определить положение и ориентацию АС в реальном времени. В виде отдельных узлов выполнены программные драйверы, взаимодействующие с навигационным оборудованием: устройства измерения скорости (судовые лаги), устройства определения положения (гироскопы, акселерометры, магнитные и гироскопические компасы и т. д.), оборудование глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Число данных узлов может варьироваться в зависимости от количества используемого оборудования.

Узлы EKF Global и EKF Local являются готовыми узлами пакета robot_localization, совмещающими в себе фильтры Калмана и обеспечивающими оценку положения и ориентации АС в пространстве с использованием данных от различных сенсоров. EKF Global предназначен для работы в глобальной системе координат, в то время как EKF Local обеспечивает отслеживание положения в локальной системе координат, что особенно полезно при движении на короткие расстояния или в условиях ограниченного ГНСС сигнала. Оба узла работают в связке, объединяя данные различных сенсоров с помощью расширенного фильтра Калмана для достижения более точной и устойчивой локализации в динамических средах. Navsat_transform — вспомогательный узел, который получает данные с ГНСС, преобразуя их в совместимый формат. Последний может быть использован EKF Global, обеспечивая плавное переключение между глобальной и локальной системой координат. В результате навигационная система может работать как в условиях с хорошим

сигналом ГНСС, так и в сложных для навигации акваториях, используя комбинированные данные от разных источников для точного позиционирования.

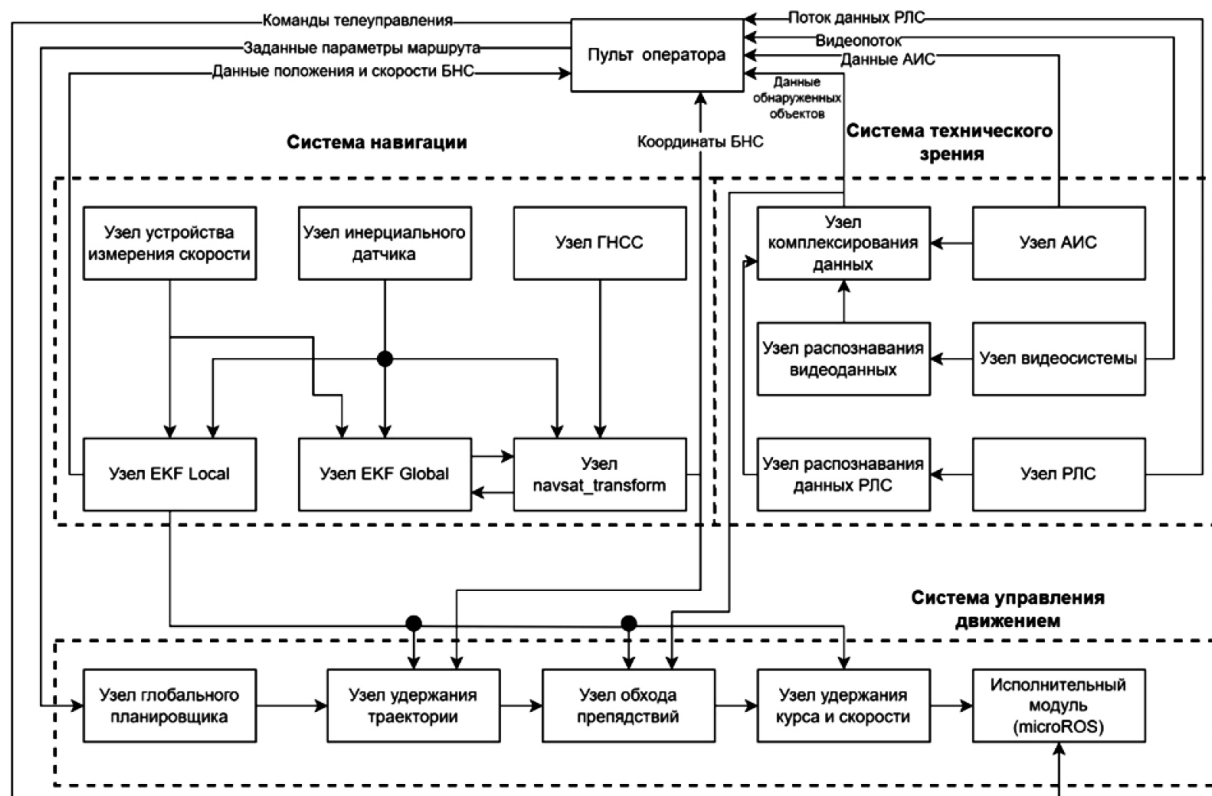


Рис. 2. Схема системы управления АС на основе ROS2

Система технического зрения автономного судна представляет собой систему, интегрирующую данные от нескольких источников для формирования точной и достоверной информации об окружающей обстановке на поверхности воды. Основными источниками данных в этом случае являются: автоматическая идентификационная система (узел АИС), видеосистема (узел видеосистемы) и радиолокационная станция (узел РЛС). Каждый из этих элементов выполняет важную роль, имея при этом свои слабые и сильные стороны, которые необходимо учитывать при интеграции. АИС предоставляет информацию о позициях, скорости и курсах других судов в зоне действия АС на основе передаваемых данных, таких как идентификаторы судов и их динамические параметры.

Преимуществом АИС является ее точность при работе с идентифицированными объектами, а также возможность получения данных на больших расстояниях. Однако система ограничена тем, что она работает только с объектами, оснащенными АИС-транспондерами, не предоставляя информацию о неучтенных объектах или препятствиях [11]. Видеосистема предоставляет визуальную информацию об окружающей среде, включая объекты, которые не могут быть зарегистрированы АИС (например, природные объекты или маломерные суда). Видеосистема может функционировать как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне для работы в условиях с недостаточной освещенностью. Однако ее работа зависит от условий видимости, таких как погодные явления (туман, дождь), освещенность и угла обзора камеры. Видеоданные могут быть зашумленными, требуя сложной обработки изображений для выделения значимых объектов. РЛС в свою очередь предоставляет информацию о положении объектов, независимо от их наличия в системе АИС или оптической видимости. Станция позволяет обнаруживать объекты, находящиеся на значительных расстояниях и в сложных погодных условиях. Однако данные РЛС могут быть подвержены помехам, а точность их может снижаться при работе на коротких дистанциях или в условиях сильного отражения радиоволн от водной поверхности.

Для повышения точности и надежности оценки надводной обстановки данные, полученные из основных источников, проходят предварительную обработку и фильтрацию. После этого обработанные данные комплексировются [12], [13]. Этот процесс основан на использовании методов статистической фильтрации и вероятностных моделей, что позволяет компенсировать недостатки отдельных сенсоров и учитывать их сильные стороны. В результате система способна вырабатывать наиболее полную и достоверную картину окружающей обстановки, обеспечивая эффективное и безопасное движение в сложных и динамичных морских условиях.

Система управления движением реализует функцию автоматического движения и расхождения АС с препятствиями. Узел глобального планировщика является стандартным узлом стека Nav2, он формирует маршрут движения на основе данных картографии и заданных параметров движения. Сформированный маршрут передается на узел удержания траектории, который рассчитывает и выдает требуемый для движения по заданной траектории курс АС. При обнаружении угрозы столкновения активируется узел обхода препятствий, который корректирует курс и скорость АС, обеспечивая безопасное расхождение с препятствиями в соответствии с «Международными правилами предотвращения столкновений судов в море (МППСС-72)». Новые параметры безопасного курса и скорости передаются узлу удержания курса и скорости, который рассчитывает управляющие воздействия для рулевого устройства и двигателя. Заключительный этап реализован в исполнительном модуле на базе micro-ROS, который формирует управляющие электрические сигналы и низкоуровневые команды для непосредственного управления движительно-рулевой системой АС.

Пульт оператора представляет собой специализированное графическое приложение, предназначенное для мониторинга, управления и взаимодействия с автономным судном в реальном времени. Основной функционал пульта заключается в отображении телеметрической информации, видеопотоков с бортовых камер, данных радиолокационной станции, а также интегрированной картографии для обеспечения ситуационной осведомленности оператора. Пульт оператора также выполняет ключевую роль в формировании маршрута для движения АС в автоматическом режиме. Этот процесс включает создание оператором последовательности путевых точек на интегрированной карте, по которым судно будет следовать. Помимо автоматического движения пульт поддерживает ручное управление, предоставляя оператору возможность непосредственно управлять АС в сложных ситуациях или при необходимости корректировки маршрута.

На рис. 3 приведена аппаратная структурная схема предлагаемой системы управления АС. Большинство узлов системы навигации и системы управления движением выполняются на бортовом компьютере. Для узлов системы технического зрения выделяется отдельный компьютер СТЗ, так как обработка потоковых видеоданных и данных с РЛС требует значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, применение искусственных нейронных сетей для обработки видеоизображений требует специальных графических вычислителей.

ROS2 обладает уникальной возможностью распределенного выполнения узлов на различных вычислительных устройствах, объединенных в одну сеть, что позволяет оптимально распределять вычислительные ресурсы системы. Это дает возможность перенести ресурсоемкие задачи на мощные серверы или компьютеры с графическими процессорами, в то время как узлы с меньшими требованиями — на более слабые устройства.

Исполнительный узел системы управления реализуется на базе бортового контроллера с интеграцией micro-ROS, который обеспечивает низкоуровневое управление движительно-рулевой системой АС. Контроллер имеет широкий набор интерфейсов, таких как RS232, CAN и аналоговые выходы, что позволяет гибко интегрировать различные исполнительные устройства, включая моторы, рулевые приводы и сенсоры. Контроллер, взаимодействуя с исполнительными устройствами, выполняет команды, поступающие от системы управления движением, такие как коррекция курса, изменение скорости, маневры по обходу препятствий.

На береговом компьютере размещено приложение пульта управления, которое служит интерфейсом для оператора. Через это приложение оператор может мониторить состояние АС

112



Выводы (Summary)

2. Ключевым преимуществом подобной системы является рациональное распределение вычислительных ресурсов между узлами, выполняемыми на разных вычислительных устройствах — от мощных бортовых компьютеров до специализированных микроконтроллеров. Рациональное распределение позволяет эффективно решать задачи обработки больших объемов данных (видеопотоки, данные РЛС), выполнения сложных алгоритмов (планирование траектории, обход препятствий) и управления исполнительными механизмами в реальном времени.

3. Благодаря открытой архитектуре и модульному подходу ROS2 разработка системы управления автономным судном существенно ускоряется за счет интеграции проверенных временем решений для планирования траектории, локализации, обработки данных с сенсоров и управления движением. Использование этих готовых компонентов позволяет сосредоточиться на специфических аспектах проектируемой системы, таких как работа с полезной нагрузкой или управление исполнительными механизмами, минимизируя время и затраты на разработку базового функционала, что не только упрощает процесс создания системы, но и обеспечивает ее надежность и соответствие современным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barrera C.* Trends and challenges in unmanned surface vehicles (USV): From survey to shipping / C. Barrera, I. Padron, F. S. Luis, O. Llinas // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2021. — Vol. 15 No. 1. — Pp. 135–142.
2. *Каретников В. В.* Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627. — EDN YTXYGD.
3. *Bonci A.* Robot Operating System 2 (ROS2)-Based Frameworks for Increasing Robot Autonomy: A Survey / A. Bonci, F. Gaudeni, M. C. Giannini, S. Longhi // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — Is. 23. DOI: 10.3390/app132312796.
4. *Пушкарев И. И.* Система управления движением и расхождением безэкипажного судна в соответствии с МППСС-72 / И. И. Пушкарев // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 837–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848. — EDN BRZDXO.
5. *Julier S. J.* Unscented filtering and nonlinear estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // *Proceedings of the IEEE*. — 2004. — Vol. 92. — Is. 3. — Pp. 401–422. DOI: 10.1109/JPROC.2003.823141.
6. *Moore T.* A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System / T. Moore, D. Stouch // *Intelligent Autonomous Systems 13* — Springer International Publishing, 2016. — С. 335–348.
7. *Fedorenko R.* Local and Global Motion Planning for Unmanned Surface Vehicle / R. Fedorenko, B. Gurenko // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 42. — Pp. 01005. DOI: 10.1051/mateconf/20164201005.
8. *Alsadik B.* The Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-An Overview_2021 / B. Alsadik, S. Karam // *Journal of Applied Science and Technology Trends*. — 2021. — Vol. 2. — Is. 02. — Pp. 147–158. DOI: 10.38094/jastt204117.
9. *Hu S.* Path Planning of an Unmanned Surface Vessel Based on the Improved A-Star and Dynamic Window Method / S. Hu, S. Tian, J. Zhao, R. Shen // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11. — Is. 5. DOI: 10.3390/jmse11051060.
10. *Belsare K.* Micro-ROS / K. Belsare, A. C. Rodriguez, P. G. Sanchez, J. Hierro, T. Kolcon, R. Lange, I. Lutkebohle, A. Malki, J. M. Losa, F. Melendez, M. M. Rodriguez, A. Nordmann, J. Staschulat, J. von Mendel // *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 7)* — Springer International Publishing, 2023. — С. 3–55 DOI: 10.1007/978-3-031-09062-2_2.
11. *Смоленцев С. В.* Алгоритм анализа данных автоматической идентификационной системы для выделения типовых сценариев расхождения судов и тестирования систем автономного судовождения / С. В. Смоленцев, А. А. Буцанец [и др.] // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. — 2024. — Т. 18. — № 3. — С. 50–59. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59. — EDN TYZNSI.
12. *Lu Y.* Fusion of Camera-based Vessel Detection and AIS for Maritime Surveillance / Y. Lu, H. Ma, E. Smart, B. Vuksanovic, J. Chiverton, S. R. Prabhu, M. Glaister, E. Dunston, C. Hancock // *2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC) 2021*. — С. 1–6. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594203.
13. *Wang M.* Fusion Detection Algorithm of Maritime Radar and Electro-Optical Pod for Complex Sea Conditions / M. Wang, Q. Wang, Y. Wang, Z. Li, S. Shao, Y. Zhou // *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP) 2023*. — С. 1204–1209 DOI: 10.1109/ICMSP58539.2023.10170950.

REFERENCES

1. Barrera, C., I. Padron, F. S. Luis and O. Llinas. "Trends and challenges in unmanned surface vehicles (USV): From survey to shipping." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* Vol. 15 No. 1 (2021): 135–142.
2. Karetnikov, V. V., I. V. Paschenko and A. I. Sokolov. "Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
3. Bonci, A., F. Gaudeni, M. C. Giannini and S. Longhi. "Robot Operating System 2 (ROS2)-Based Frameworks for Increasing Robot Autonomy: A Survey." *Applied Sciences* 13.23 (2023). DOI: 10.3390/app132312796.
4. Pushkarev, I. I. "A control system for movement and divergence of unmanned ship according to COL-REG." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 837–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848.
5. Julier, S. J. and J. K. Uhlmann. "Unscented filtering and nonlinear estimation." *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004): 401–422. DOI: 10.1109/JPROC.2003.823141.
6. Moore, T. and D. Stouch. "A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System." *Intelligent Autonomous Systems 13* Springer International Publishing, 2016: 335–348.
7. Fedorenko, R. and B. Gurenko. "Local and Global Motion Planning for Unmanned Surface Vehicle." *MATEC Web of Conferences* 42 (2016): 01005. DOI: 10.1051/matecconf/20164201005.
8. Alsadik, B. and S. Karam. "The Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-An Overview_2021." *Journal of Applied Science and Technology Trends* 2.02 (2021): 147–158. DOI: 10.38094/jastt204117.
9. Hu, S., S. Tian, J. Zhao and R. Shen. "Path Planning of an Unmanned Surface Vessel Based on the Improved A-Star and Dynamic Window Method." *Journal of Marine Science and Engineering* 11.5 (2023). DOI: 10.3390/jmse11051060.
10. Belsare, K. et al. "Micro-ROS." *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 7)* Springer International Publishing, 2023: 3–55. DOI: 10.1007/978-3-031-09062-2_2.
11. Smolentsev, S. V. et al. "Algorithm for analyzing the automatic identification system data to identify typical scenarios for vessel divergence and testing the systems of autonomous shipping." *T-Comm* 18.3 (2024): 50–59. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-50-59.
12. Lu, Y., C. Hancock, et al. "Fusion of Camera-based Vessel Detection and AIS for Maritime Surveillance." *2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)2021*: 1–6. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594203.
13. Wang, M. et al. "Fusion Detection Algorithm of Maritime Radar and Electro-Optical Pod for Complex Sea Conditions." *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)2023*: 1204–1209. DOI: 10.1109/ICMSP58539.2023.10170950.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович —
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматических и информационных систем
Морской государственной университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Россия, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: adyda@mail.ru
Пушкарёв Игорь Игоревич —
ведущий инженер-программист
ООО «Кашалот»
690059, Россия, г. Владивосток,
ул. Уборевича, 7, помещение IX
e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyda Aleksandr A. —
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Automatic and Information Systems
Maritime State University
named after Admiral G. I. Nevelskoy
690059, Russia, Vladivostok,
st. Verkhneportovaya, 50a
e-mail: adyda@mail.ru
Pushkarev Igor I. —
lead software engineer
"CASHALOT" LLC
690091, Russia, Vladivostok,
st. Uborevicha 7, room IX
e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2025 г.
Received: Jan. 10, 2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126

EDN KJUPOC

WETTABILITY OF STERN-TUBE TRIBOPAIRS MATERIALS WITH WATER

Y. N. Tsvetkov¹, K. D. Pavlova², A. S. Svetlovskaya³

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

² — Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Iceberg»»,
Saint Petersburg, Russian Federation,

³ — Specmorservice Ltd. Co,
Saint Petersburg, Russian Federation

The wettability of materials used for manufacturing water-lubricated stern-tube bearings — polyamide and rubber 8I30 as well as materials used for propeller shaft journal linings — stainless steel 12Ch18N10T and tin bronze BrO5Ts5S5 — was investigated. Wettability was evaluated by measuring the contact angle. Based on the experimental results, second-order models were developed to describe the contact angle as a function of water salinity and arithmetic mean deviation of the profile. A similar influence of the investigated factors on the wettability of bronze and stainless steel was revealed, which, for polymers, not only differs significantly from that of metallic alloys, but also the change in wettability of polyamide differs from that of rubber with a change in these factors. It is noted that the salt content in seawater has a weak influence on the wettability of lining materials, but the surface roughness has a noticeable influence on it; moreover, there is a value of the height parameter Ra at which the wettability reaches a maximum value. For rubber, on the contrary, the surface roughness has a weak influence on the wettability by water, but the salt content in water has a very strong influence on it (in fresh water, rubber exhibits pronounced hydrophilic properties, while in seawater it becomes hydrophobic). The hydrophilicity of polyamide shows a moderate increase both with an increase in the salt content in water and with an increase in the roughness of its surface. It is proposed to use a hydrophilic material for the bearing in a stern-tube tribopair lubricated with water, in combination with a pronounced hydrophobic material for the lining; accordingly, in seawater, it is advisable to use polyamide bearings instead of rubber-metal bearings. Based on the results obtained, it seems reasonable to conduct research on replacing bronze and stainless steel in the manufacture of linings with other materials exhibiting pronounced hydrophobic properties.

Keywords: stern-tube bearing, rubber, polyamide, tin bronze, stainless steel, fresh water, sea water, water salinity, surface roughness, wettability, contact angle.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., K. D. Pavlova and A. S. Svetlovskaya. “Wettability of stern-tube tribopairs materials with water.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 115–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126.

УДК 620.179

СМАЧИВАЕМОСТЬ ВОДОЙ МАТЕРИАЛОВ ДЕЙДВУДНЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Ю. Н. Цветков¹, К. Д. Павлова², А. С. Светловская³

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

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

³ — ООО «СпецМорСервис», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследована смачиваемость водой материалов, применяемых для изготовления дейдвудных подшипников, работающих при смазывании водой: капролона и резины 8130, а также материалов, применяемых для изготовления облицовок гребных валов: стали 12X18H10T и оловянистой бронзы БрО5Ц5С5. Оценка смачиваемости выполнена по значению краевого угла смачивания. По результатам опытов выполнено построение моделей второго порядка, описывающих значения краевого угла смачивания от содержания солей в воде и шероховатости поверхности. Выявлен схожий характер влияния исследуемых факторов на смачиваемость бронзы и нержавеющей стали, который для полимеров не только существенно отличается от аналогичного для металлических сплавов, но и характер изменения смачиваемости капролона при изменении этих факторов отличается от характера изменения смачиваемости резины. Отмечается, что содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние на смачиваемость материалов облицовок, заметное влияние на нее оказывает шероховатость поверхности, при этом существует значение высотного параметра R_a , при котором смачиваемость достигает максимального значения. Для резины, наоборот, шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой, но однако содержание солей в воде оказывает на нее очень сильное влияние (в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, а в морской становится гидрофобной). Гидрофильность капролона как при увеличении содержания солей в воде, так и при увеличении шероховатости его поверхности, показывает умеренное увеличение. Предлагается использовать в дейдвудном трибосопряжении, смазываемом водой, гидрофильный материал подшипника в сочетании с выраженным гидрофобным материалом облицовки, и, соответственно, в морской воде целесообразно вместо резинометаллических подшипников использовать капролоновые. На основании полученных в работе результатов представляется целесообразным выполнить исследования по замене бронзы и нержавеющей стали при изготовлении облицовок из иного материала с выраженной гидрофобностью.

Ключевые слова: дейдвудный подшипник, резина, капролон, оловянистая бронза, нержавеющая сталь, пресная вода, морская вода, соленость воды, шероховатость, смачиваемость, краевой угол смачивания.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений / Ю. Н. Цветков, К. Д. Павлова, А. С. Светловская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 115–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126. — EDN KJUPOC.

Введение (Introduction)

Дейдвудное устройство относится к одному из самых ответственных на судне, от надежности которого зависит безопасность мореплавания и потери на трение при передаче энергии от главного двигателя на гребной винт. Дейдвудное устройство располагается в недоступном для персонала судна месте и не подлежит ремонту в эксплуатации, поэтому, как правило, неполадки с дейдвудным устройством приводят к аварийной ситуации.

Большинство дейдвудных подшипников по экологическим соображениям смазываются водой [1]. В этом случае в качестве материала для них используются полиамиды, чаще всего капролон или резины 8130, 8075 и 1626 (Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.). Вязкость воды в среднем на три порядка меньше вязкости смазочного масла, а способность воды смачивать металлические материалы и указанные полимеры значительно уступает таковой для смазочных масел, поэтому трение и износ в сопряжениях, смазываемых водой, существенно превышают трение и износ в элементах дейдвудных сопряжений, смазываемых маслом. По этой причине на шейки гребных валов при смазывании водой устанавливают облицовки. По статистике, по количеству отказов кормовой и носовой дейдвудный подшипники при смазывании водой занимают третье и четвертое место соответственно в отказах элементов движительного комплекса [1].

Очевидно, что в возможности снижения трения и повышения износостойкости трибосопряжений дейдвудных устройств, смазываемых водой, имеется огромный резерв. Условием хорошего удержания смазочной жидкости на поверхности трения и равномерного распределения жидкости по поверхности является хорошая смачиваемость поверхностей трения смазочной жидкостью. Для реализации гидродинамической смазки смачиваемость поверхности важна, так как существует прямая связь между смачиваемостью и адгезией смазочной жидкости к поверхности трения [2], поэтому при недостаточной смачиваемости невозможно обеспечить относительный сдвиг

слоев жидкости по толщине, а значит и гидродинамическая подъемная сила [3], обеспечивающая «всплытие» одной поверхности над другой, возникать не будет.

Что касается граничной смазки, то здесь многое определяется молекулярной структурой смазочной жидкости, молекулы минеральных масел имеют строение в виде длинных цепей, что при хорошей смачиваемости позволяет обеспечить образование граничной пленки с правильной структурой в виде «частокола» цепных молекул. Такая структура обеспечивает низкий коэффициент трения, так как соприкасающиеся метильные концевые группы ($-\text{CH}_3$), принадлежащие разным граничным пленкам двух контактирующих поверхностей, связаны друг с другом слабыми дисперсионными силами — силами Лондона. При этом чем длиннее молекулярные цепи, тем на большее расстояние «отодвигаются» друг от друга поверхности и тем меньше сила притяжения твердых фаз (поверхностей трения) [2]. Поэтому требование хорошей смачиваемости поверхности при использовании смазочных масел в условиях граничной смазки, как правило, является обязательным, за исключением случаев, когда применяются материалы, имеющие низкую адгезию сами по себе, т. е. обеспечивающие ее автономно без использования смазочных материалов (при сухом трении), такие как фторопласт.

При использовании в качестве смазочной жидкости воды именно граничный режим смазки в кормовых дейдвудных подшипниках является основным. Это объясняется не только малой вязкостью воды, но и характером распределения давлений по поверхности трения дейдвудного подшипника. Согласно расчетным данным (см. *Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ. — Л: Судостроение, 1987. — 344 с.*) под действием силы тяжести гребного винта максимальное контактное давление на кормовом участке кормового дейдвудного подшипника более чем в 100 раз превышает предельное значение номинального давления, регламентированного Правилами Российского морского регистра судоходства. Это подтверждается также характером износа дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации [4], [5]. Кроме того, следует отметить, что для монолитных резинометаллических подшипников (ГОСТ 7199–77), для капролоновых подшипников типа I и II в исполнении 1 (ОСТ 5.4183–76), а также для наборных капролоновых и резинометаллических подшипников гидродинамический режим трудноосуществим по конструктивным соображениям, а именно из-за наличия продольных канавок. По мере изнашивания подшипника давления выравниваются, однако и по достижении предельного износа давление на кормовом участке примерно на 70 % выше, чем на носовом.

Молекулы воды по строению отличаются от молекул углеводородов, поэтому для воды ответ на вопрос о влиянии смачиваемости на трибологические характеристик поверхностей остается открытым. Чем больше шероховатость, тем выше вероятность разрушения граничной пленки воды на вершинах неровностей даже при хорошей смачиваемости, поэтому для сохранения сплошной граничной пленки воды на поверхности трения необходимо применять поверхности с малой шероховатостью, однако при этом между граничными пленками воды, образовавшимися на двух контактирующих поверхностях, возникают сильные водородные связи, и трение может существенно возрасти [6], [7], т. е. при смазывании водой в условиях граничной смазки требование хорошей смачиваемости поверхностей трения не является бесспорным. В работе [8] показано, что при смазывании водой минимальное трение достигается при сочетании в паре трения материалов с резко различающейся смачиваемостью, при этом неподвижный элемент (палец) должен быть изготовлен из гидрофильного материала, а подвижный (вращающийся диск) — из гидрофобного. Это подтверждается также в работе [9], в которой получены результаты, свидетельствующие о том, что самый низкий коэффициент трения обеспечивается при использовании вращающегося элемента трения с выраженной гидрофобной поверхностью.

Эксплуатация судна происходит в воде разной солености. При работе сопряжения шероховатость поверхностей подшипника и облицовки гребного вала изменяется, при этом изменяется и смачиваемость поверхностей трения, а значит, и потери на трение в дейдвудных подшипниках. Тем не менее в литературе отсутствуют данные, обосновывающие значения параметров шероховатости облицовок и дейдвудных подшипников, указанные в рекомендациях отрасле-

вых стандартов^{1,2,3}. Первым шагом для обоснования этих рекомендаций следует считать изучение влияния основных факторов на смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений: шероховатости поверхности материала и содержания солей в воде.

Целью работы является построение моделей, описывающих смачиваемость материалов дейдвудных трибосопряжений водой в зависимости от шероховатости поверхности материала и содержания солей в воде.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Чаще всего на практике в дейдвудных подшипниках, смазываемых водой, применяют следующие сочетания материалов: капролон — оловянистая бронза и резина — нержавеющая сталь. Капролон и резина используются для изготовления втулок или вкладышей дейдвудных подшипников, а оловянистая бронза и нержавеющая сталь — для изготовления облицовок шеек гребных валов. Поэтому для испытаний были выбраны два материала дейдвудных подшипников: резина 8130 и капролон, и два материала для облицовок: бронза БрО5Ц5С5 и сталь 12Х18Н10Т.

Из капролона, бронзы и стали были изготовлены диски диаметром около 50 мм и толщиной около 12 мм, в качестве рабочих поверхностей использовались плоские поверхность дисков. Из резины изготавливали образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером примерно 10 × 10 × 12 мм, их вырезали из новой резинометаллической планки для набора дейдвудного подшипника, в качестве рабочих поверхностей использовались грани 10 × 12 мм.

Для создания разной шероховатости поверхности испытуемых материалов рабочие поверхности образцов обрабатывали абразивной шкуркой разной зернистости, после чего шероховатость поверхности оценивали щуповым методом [10] на приборе MahrSurf PS1 по значению среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a . Базовую длину назначили равной 0,8 мм. Длина оценки включала пять базовых длин, т. е. была равна 4,0 мм, а длина трассирования, соответственно, 5,6 мм. Трассирование проводили трижды в пределах участка поверхности, на который планировалось наносить капли воды, за окончательный результат брали среднее арифметическое.

В опытах использовали воду с тремя разными значениями содержания солей: мягкую пресную, искусственную морскую с содержанием соли 1,89 масс.% и искусственную морскую с содержанием солей 3,78 масс.%. В качестве пресной использовали отстоявшуюся водопроводную воду г. Санкт-Петербурга, в которой условно было принято содержание солей, равное 0 масс.%. Для приготовления искусственной морской воды пользовались рекомендациями [11], согласно которым морской воде с содержанием солей 3,78 масс.% соответствовал состав, указанный в табл. 1. Морскую воду с содержанием солей 1,89 масс.% получали, разбавляя мягкой пресной водой морскую воду с содержанием солей 3,78 масс.%.

Диапазон изменения шероховатости выбирали таким образом, чтобы в него попадали значения шероховатости материалов в исходном (перед началом эксплуатации) состоянии и установившиеся при трении. Последние значения получали по результатам испытания на машине трения.

Таблица 1

Состав искусственной морской воды [11]

Соль	Концентрация, г/л
Хлорид натрия NaCl	24,6
Хлорид калия KCl	0,67
Двухводный хлорид кальция $\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	1,36
Семиводный сульфат магния $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	6,29
Шестиводный хлорид магния $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	4,66
Бикарбонат натрия (сода) NaHCO_3	0,18

¹ ОСТ5.4183–76. Подшипники гребных и дейдвудных валов капролоновые. Общие технические условия. Изд. офиц. Введ. 27 октября 1976 г.

² ГОСТ 7199–77. Подшипники резинометаллические судовые. Технические условия. Изд. офиц. М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2002.

³ ОСТ5.4097–85. Валы судовых валопроводов. Общие технические условия. Изд. офиц. Взамен ОСТ5.4097–74.

Ориентировочные данные по исходной шероховатости поверхностей материалов дейдвудных подшипников и облицовок гребных валов, определенные согласно рекомендациям стандартов: ГОСТ 7199–77, ОСТ5.4183–76 и ОСТ5.4097–85, а также по результатам измерений, выполненных на реальных подшипниках, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр R_a исходной шероховатости элементов дейдвудных трибосприжений, смазываемых водой

Материал дейдвудного подшипника	Материал полимерного подшипника при работе в паре с облицовкой		Материал облицовки	
	Sn-бронза	Нержавеющая сталь	Sn-бронза	Нержавеющая сталь
Резина	Около 0,5 мкм	Около 0,5 мкм	$\leq 1,25$ мкм (полируют)	$\leq 1,25$ мкм (полируют)
Капролон	$\leq 2,5$ мкм	$\leq 2,5$ мкм	$\leq 1,25$ мкм (полируют)	$\leq 1,25$ мкм (полируют)

При проведении опытов использовали образцы каждого материала с тремя значениями R_a : для резины 8130 $R_a = 5,109; 2,913$ и $0,496$ мкм; для капролона $R_a = 5,676; 2,234$ и $0,721$ мкм; для бронзы БрО5Ц5С5 $R_a = 1,746; 0,633$ и $0,190$ мкм; для стали 12Х18Н10Т $R_a = 0,549; 0,318$ и $0,053$ мкм.

Смачиваемость материалов оценивали нанесением капель на поверхность материалов и измерением краевого угла смачивания α (рис. 1). Полная смачиваемость, как известно, характеризуется углом $\alpha = 0$, полная несмачиваемость — углом $\alpha = 180^\circ$ [12]. На образцы разной шероховатости каждого материала наносили по три капли пресной и морской воды с содержанием солей, соответственно, 1,89 и 3,78 масс.%. Нанесение капель выполняли с помощью пипетки. Их фотографировали, распечатывали фото в большом увеличении и определяли графически на каждой капле краевой угол смачивания, как показано на рис. 1, т. е. измеряли краевой угол на фото каждой из трех капель с левой и с правой стороны изображения капли: α_l и $\alpha_{пр}$, затем находили среднее арифметическое шести значений. В результате для каждого материала каждой комбинации значений шероховатости поверхности и содержания солей в воде было получено осредненное значение краевого угла смачивания.

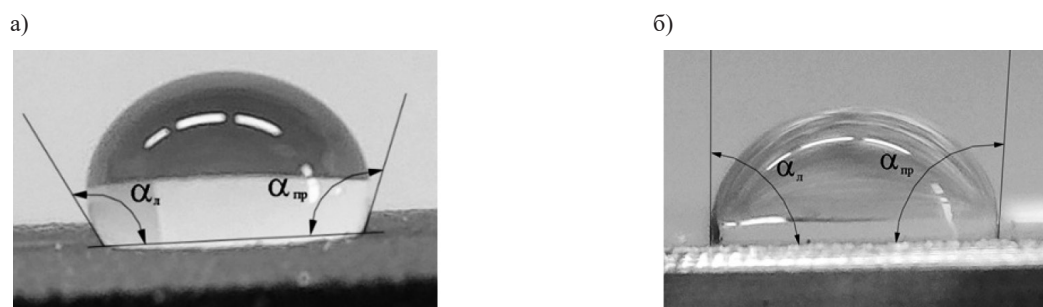


Рис. 1. Определение углов смачивания:

- а* — на примере капли воды с концентрацией солей 3,78 % на резине 8130 с параметром шероховатости поверхности $R_a = 5,109$ мкм;
б — на примере капли пресной воды на стали 12Х18Н10Т с параметром шероховатости поверхности $R_a = 0,549$ мкм

Смачиваемость определяется двумя факторами: соленостью воды и шероховатостью поверхности. Зависимость краевого угла от содержания солей в воде и шероховатости поверхности описывали моделью 2-го порядка:

$$\alpha = b_0 + b_1 R_a + b_2 C + b_3 R_a^2 + b_4 C^2 + b_5 R_a C, \quad (1)$$

где α — значение граничного угла;

C — концентрация солей (% по массе) в воде;

$b_0, b_1, \dots, b_5$ — неизвестные коэффициенты модели.

Как видно из уравнения (1), всего в модели шесть неизвестных параметров: $b_0, b_1, \dots, b_5$, поэтому минимальное количество опытов, которые необходимо провести, равно шести. Было принято решение провести не менее девяти опытов, отличающихся значениями R_a и C . Это позволило произвести надежное усреднение с использованием метода наименьших квадратов.

Для компактной записи уравнений (1) ввели следующие обозначения: $R_a = z_{i1}$; $C = z_{i2}$; $R_a^2 = z_{i3}$; $C^2 = z_{i4}$; $R_a C = z_{i5}$, где i — номер опыта (уравнения).

По результатам испытаний построили систему уравнений:

$$\alpha_i = b_0 + b_1 z_{i1} + b_2 z_{i2} + b_3 z_{i3} + b_4 z_{i4} + b_5 z_{i5}, \quad (2)$$

где $i = 1 \dots 9$;

α_i — значение угла смачиваемости, полученное в результате эксперимента в i -м опыте.

Решение системы (2), согласно процедуре метода наименьших квадратов, в матричной форме имеет следующий вид [13]:

$$B = (Z^T Z)^{-1} Z^T A, \quad (3)$$

где B — вектор-столбец искомых коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_5$ аппроксимирующей функции (1);

Z — матрица всех значений факторов $z_{i1}; z_{i2}; z_{i3}; z_{i4}; z_{i5}$, использованных при проведении опытов, включая первый единичный столбец;

Z^T — матрица, транспонированная по отношению к матрице Z ;

A — вектор-столбец значений величины граничного угла, полученных экспериментально.

Результаты (Results)

Построенная модель, описывающая смачиваемость резины 8130, имеет следующий вид:

$$\alpha = 72,19 + 25,71R_a + 7,295C - 2,998R_a^2 - 2,608C^2 - 0,1375R_a C. \quad (4)$$

Графический вид модели, описывающей смачиваемость резины 8130, приведен на рис. 2, а.

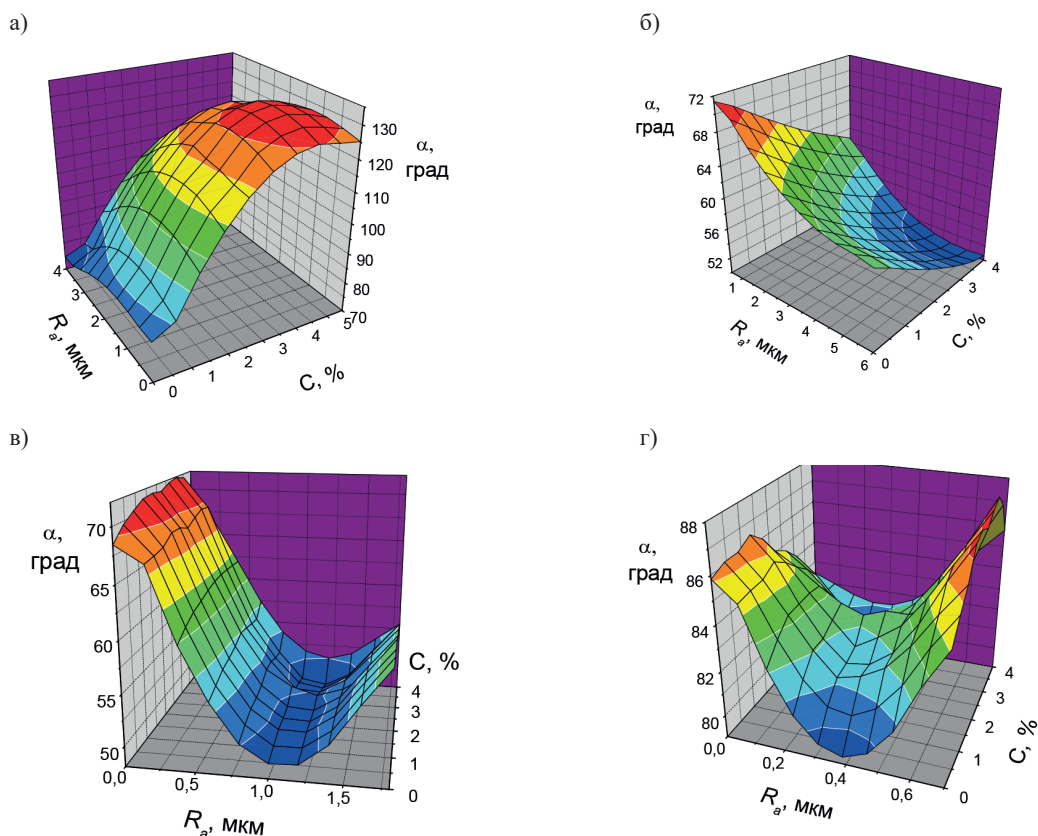


Рис. 2. Зависимость краевого угла смачивания от значения высотного параметра шероховатости и солености воды: а — резины 8130; б — капролона; в — бронзы Бр05Ц5С5; г — стали 12Х18Н10Т

Для капролона вид модели следующий:

$$\alpha = 75,426 - 5,424R_a - 4,034C + 0,4967R_a^2 + 0,2706C^2 - 0,0534R_aC. \quad (5)$$

Графический вид модели для капролона представлен на рис. 2, б.

Модель, описывающая смачиваемость бронзы БрО5Ц5С5, получена в виде:

$$\alpha = 75,784 - 48,744R_a + 1,816C + 22,429R_a^2 - 0,2566C^2 - 0,9361R_aC. \quad (6)$$

Графический вид модели, описывающей смачиваемость бронзы БрО5Ц5С5, приведен на рис. 2, в, вид функции отклика, описывающей смачиваемость стали 12Х18Н10Т, — на рис. 2, г.

Модель смачиваемости стали 12Х18Н10Т записывается следующим образом:

$$\alpha = 88,323 - 47,369R_a + 1,259C + 61,948R_a^2 - 0,6089C^2 + 2,753R_aC. \quad (7)$$

Проверка по критерию Фишера показала, что адекватность построенной модели для резины 8130 обеспечивается на 25%-м уровне значимости, для капролона на 5%-м уровне значимости, для бронзы БрО5Ц5С5 и стали 12Х18Н10Т — примерно на 30%-м уровне значимости [13], [14].

Обсуждение (Discussion)

Как видно из анализа поверхности функции отклика на рис. 2, влияние солёности воды и шероховатости поверхности на смачиваемость принципиально отличается для металлических и полимерных материалов. При этом, если характер влияния исследуемых факторов для бронзы и нержавеющей стали (см. рис. 2, в, г) на смачиваемость схожий, то для полимеров (см. рис. 2, а, б) он не только существенно отличается от аналогичного для металлических сплавов, но также если сравнивать капролон и резину между собой, то характер изменения их смачиваемости при изменении факторов принципиально отличается друг от друга. Видно, что для металлических материалов облицовок содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние на смачиваемость облицовок. Вместе с тем заметное влияние на нее оказывает шероховатость поверхности. При этом существует значение параметра R_a , при котором смачиваемость проходит через максимум (минимум краевого угла): для бронзы максимум смачиваемости достигается при $R_a \approx 1,0$ мкм, для нержавеющей стали — при $R_a \approx 0,4$ мкм. Для резины, наоборот, шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой, но при этом содержание солей в воде оказывает очень сильное влияние на смачиваемость: если в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, то в морской воде она становится гидрофобной. Для капролона и шероховатость поверхности, и солёность воды оказывают примерно схожее влияние на его смачиваемость: как при увеличении солёности, так и при увеличении шероховатости происходит умеренное увеличение гидрофильности поверхности.

Сложность оценки влияния шероховатости на смачиваемость материалов дейдвудных подшипников состоит в том, что капролон и резина поглощают воду, а значит, в процессе эксплуатации судна смачиваемость поверхностей трения дейдвудных подшипников будет увеличиваться: капролона, вероятно, в большей степени из-за существенного поглощения капролоном воды, резины — в меньшей. При этом полимерные материалы в значительной степени деформируются в зоне контакта с металлическим контртелом, поэтому фактическая шероховатость в зоне контакта в процессе трения отличается от измеренной на поверхности трения после выведения ее из контакта. По всей видимости, профиль поверхности полимера в зоне трения будет воспроизводить профиль поверхности металлической облицовки, при этом шероховатость поверхности после выведения поверхности из контакта будет зависеть от механизма изнашивания полимера и его жесткости.

Многочасовые испытания на машине трения МИ-1 неподвижного капролонового кольца в паре с роликом из стали 12Х18Н10Т (рис. 3) и бронзы БрО5Ц5С5 (рис. 4) в пресной и морской воде показали, что шероховатость поверхности трения капролона после приработки приближается к шероховатости металлического контртела, в то время как у резины, наоборот (рис. 5).

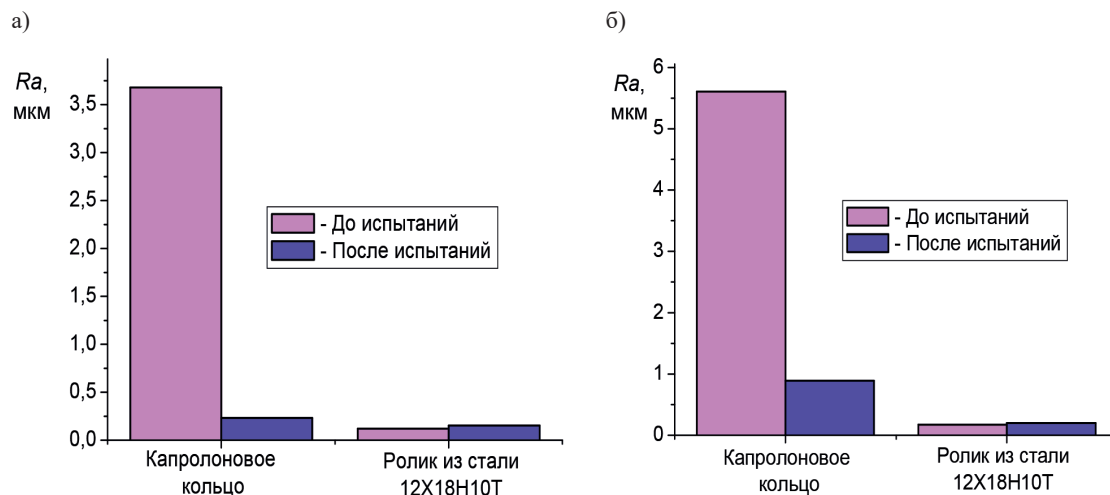


Рис. 3. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения капролоновое кольцо – ролик из стали 12X18H10T до и после испытаний:
а — в пресной воде; б — в морской воде

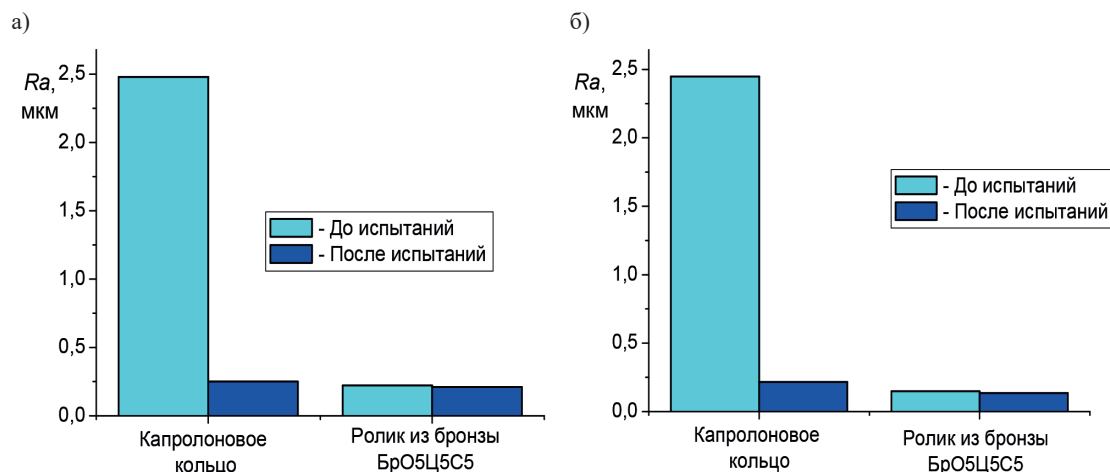


Рис. 4. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения капролоновое кольцо — ролик из бронзы BrO5Ц5C5 до и после испытаний:
а — в пресной воде; б — в морской воде

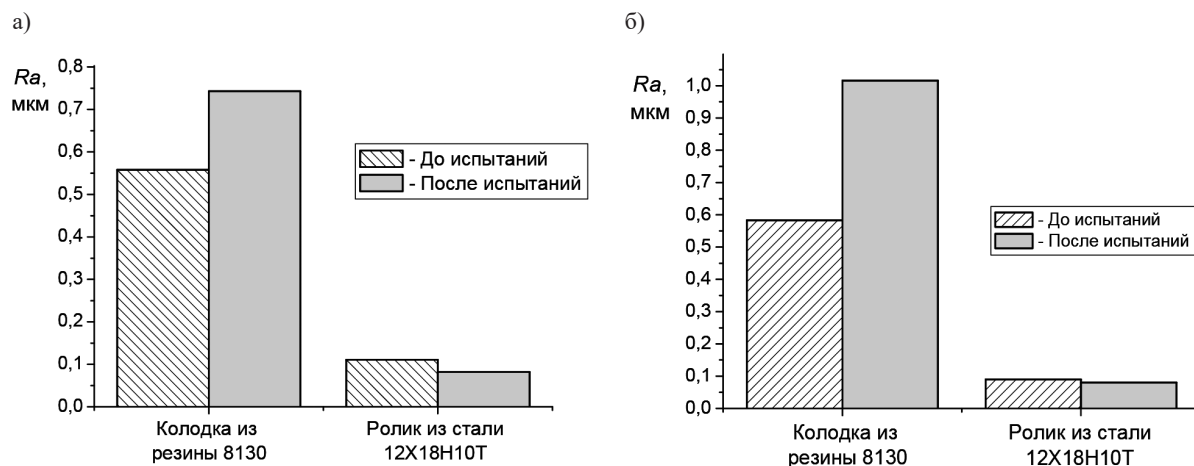


Рис. 5. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения колодка из резины 8130 – ролик из стали 12X18H10T до и после испытаний:
а — в пресной воде; б — в морской воде

Полученные результаты дают лишь качественное представление о том, насколько сильное влияние оказывают шероховатость поверхности и соленость воды на смачиваемость ею материалов дейдвудных подшипников. Тем не менее сравнение полученных результатов с имеющимися данными в научной литературе [6]–[9] позволяет сделать предварительные выводы относительно того, в каком направлении необходимо проводить исследования для снижения трения в дейдвудных подшипниках скольжения.

Сочетание гидрофильного полимерного материала подшипника и гидрофильной металлической облицовки является положительным обстоятельством с точки зрения обеспечения гидродинамического режима смазки в дейдвудных подшипниках скольжения, смазываемых водой, в случае, если бы такой режим был преобладающим. Однако, как отмечалось ранее, гидродинамический режим является трудно реализуемым в дейдвудных подшипниках, смазываемых водой. При этом с точки зрения обеспечения граничной смазки при работе в условиях смазывания водой сочетание в паре трения двух гидрофильных материалов, по всей видимости, не является оптимальным [8]. В данном случае целесообразно изготавливать кормовые облицовки из гидрофобного материала, а материалы дейдвудных подшипников — из гидрофильных.

При использовании капролоновых подшипников как в морской, так и пресной воде капролон останется гидрофильным как до приработки, так и после нее, если оценивать начальную шероховатость капролона по табл. 2 и тенденцию изменения его шероховатости по рис. 3 и 4. При использовании резинометаллических подшипников в паре с нержавеющей сталью требование гидрофильности резины обеспечивается только при эксплуатации дейдвудного устройства в пресной воде, в морской воде резина становится гидрофобной (см. рис. 2, *а*). Поэтому в морской воде, по всей видимости, следует отдавать предпочтение капролону.

Требуемая гидрофобность облицовок как из оловянистой бронзы, так и из нержавеющей стали, не обеспечивается как в пресной, так и в морской воде. Для того чтобы сделать поверхность металлических облицовок гидрофобной, необходима дополнительная обработка их поверхностей, например, подобно той, которая изложена в работе [15], однако это ведет к существенному удорожанию процесса изготовления облицовок. Целесообразно изготовить облицовки из другого материала, обладающего исходно хорошими антифрикционными свойствами и выраженной гидрофобностью. Возможно применение неметаллических и композитных материалов, но при этом следует обеспечить обратную пару трения в дейдвудном сопряжении, как обладающую лучшей износостойкостью и антифрикционными свойствами по сравнению с прямыми парами². В работе [16] предлагается перейти к использованию прямой пары трения, т. е. изготавливать подшипник из металлического материала, а облицовку из капролона. Однако опыты на машине трения с прямыми парами показали их неработоспособность при нагрузках, характерных для дейдвудных подшипников, а при малых нагрузках — отсутствие положительного эффекта от применения прямых пар [17].

Следует отметить, что условия эксплуатации дейдвудных подшипников не могут обеспечить идеальные условия смазывания, подобные обеспечиваемым в лабораторных условиях при испытании на машине трения. Анализ капролоновых и резинометаллических планок дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации (рис. 6) показал, что шероховатость их поверхности трения превышает исходную (до эксплуатации) шероховатость. Шероховатость измеряли по той же методике, что и у образцов, испытываемых на машине трения; движения шупа осуществляли вдоль планки. Так, у капролоновых планок для районов, обозначенных на рис. 6, *а* цифрами 1–3, параметр R_a равен, соответственно, 2,311; 3,142 и 3,349 мкм, а у резинометаллической планки для районов 1–3 (см. рис. 6, *б*), соответственно, 3,388; 1,250 и 1,029 мкм. При этом на резинометаллических планках виден район 4, являющийся, по сути, показателем износа вследствие образования роликов [18]. Такой вид износа появляется, если коэффициент трения между эластомером и металлической поверхностью очень большой, что может происходить при нарушении режима смазывания. Шероховатость в местах отделения тонких слоев резины при скатывании их в ролики соответствует

² Понятия обратной и прямой пары трения используются в данной статье в соответствии с определениями, приведенными в работах Д. Н. Гаркунова.

$R_a = 4,212$ мкм, что существенно выше, чем в районах 1–3, в которых реализуется адгезионное (нормальное) изнашивание, что указывает на отрывной характер разрушения в районе 4.

а)



б)



Рис. 6. Изношенная поверхность деталей дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации:
а — капролоновой планки; б — резинометаллической планки

Вид функций отклика (см. рис. 2, а, б) и значения параметра R_a капролоновых и резинометаллических планок дейдвудных подшипников, приведенных на рис. 6, свидетельствуют о том, что изменения шероховатости капролона и резины в эксплуатации не оказывают влияния на их гидрофильные свойства.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В кормовых дейдвудных подшипниках, смазываемых водой, сложно обеспечить гидродинамический режим смазки, особенно в начальный период эксплуатации, когда полной приработки еще не произошло, так как вода имеет сравнительно низкую вязкость, а фактические давления распределяются по поверхности трения подшипника очень неравномерно из-за действия силы тяги гребного винта.

2. Для режима граничной смазки при использовании воды представляется перспективным сочетание гидрофильного полимерного материала подшипника с выраженным гидрофобным материалом облицовки гребного вала.

3. Как при увеличении солёности, так и при увеличении шероховатости происходит умеренное увеличение гидрофильности капролона.

4. Для резины шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой. При этом содержание солей в воде оказывает очень сильное влияние на смачиваемость: если в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, то в морской воде она становится гидрофобной, т. е. в морской воде, по всей видимости, в качестве материала дейдвудного подшипника следует отдавать предпочтение капролону.

5. На смачиваемость металлических материалов облицовок гребных валов содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние, тогда как от шероховатости поверхности смачиваемость зависит более заметно, при этом для бронзы зависимость смачиваемости от шероховатости более сильная, чем для стали. Существует значение параметра R_a , при котором смачиваемость проходит через максимум: для бронзы максимум смачиваемости достигается при $R_a \approx 1,0$ мкм, а для нержавеющей стали — при $R_a \approx 0,4$ мкм, т. е. гидрофобность облицовок как из оловянистой бронзы, так и из нержавеющей стали не обеспечивается ни в пресной, ни в морской воде.

6. Целесообразно провести исследования по замене при производстве облицовок оловянистой бронзы и нержавеющей стали на иной материал, обладающий выраженными гидрофобными свойствами. При этом следует сохранить тип сопряжения в дейдвудном подшипнике, соответствующий обратной паре трения (мягкий вкладыш подшипника, твердая облицовка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенков П. М. Экологически чистая трибосистема судового движительного комплекса / П. М. Лысенков // Трение, износ, смазка. — 2019. — Т. 21. — № 80.
2. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
3. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с. — EDN RXGTLN.
4. Litwin W. Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing / W. Litwin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2019. — Vol. 233. — Is. 11. — Pp. 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.
5. Мамонтов В. А. Анализ износов капролоновых втулок дейдвудных подшипников гребного вала / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, Ч. А. Кужахметов, А. А. Халявкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 30–35. — EDN OPZQUT.
6. Schirber M. Why Wetting a Surface Can Increase Friction / M. Schirber // American Physical Society: Physics. — 2022. — Vol. 15. — Is. 196 — Pp. 1–2. DOI: 10.1103/Physics.15.196.
7. Peng L. Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces / L. Peng, Liang // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 129. — Pp. 256101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.256101.
8. Borruto A. Influence of surface wettability on friction and wear tests / A. Borruto, Borruto // Wear. — 1998. — Vol. 222. — Is. 1. — Pp. 57–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00256-7.
9. Zhang Z. Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic / Z. Zhang, Zhihui // Biosurface and Biotribology. — 2020. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 118–123. DOI: 10.1049/bsbt.2020.0023.
10. Табенкин А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2007. — 136 с. — EDN QNBRTD.
11. Cavanaugh G. M. Formulae and Methods VI. / G. M. Cavanaugh. — Woods Hole, MA: The Marine Biological, 1975. — 84 p.
12. Мур Д. Основы применения трибоники / Д. Мур. — М.: Мир, 1987. — 487 с.
13. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. — М.: Высшая школа, 1988. — 239 с.
14. Hald A. Statistical Theory with Engineering Applications / A. Hald. — N. Y.: Willey, 1952. — 783 p.
15. Conradi M. Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles / M. Conradi, A. Drnovšek, P. Gregorčič // Scientific Reports. — 2018. — Vol. 8. — Is. 1. — Pp. 7457. DOI:10.1038/s41598-018-25850-6.
16. Прокудин, В. Г. Применение капролона для облицовок гребных валов / В. Г. Прокудин, В. А. Черепнин, Д. Л. Грингауз, Э. П. Молодецкий // Экспресс-информация: Серия «Судоремонт». — 1983. — № 17 (506). — С. 15–20.
17. Цветков Ю. Н. Механизм трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки / Ю. Н. Цветков, К. Е. Журавлева // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756. — EDN RJWMKW.
18. Hakami F. Developments of rubber material wear in conveyer belt system / F. Hakami, A. Pramanik, N. Ridgway, AK. Basak // Tribology International. — 2017. — Vol. 111. — Pp. 148–158. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.010.

REFERENCES

1. Lysenkov, P. M. “Ekologicheski chistaya tribosistema sudovogo dvizhitel’nogo kompleksa.” *Trenie, iznos, smazka* 21.80 (2019): 24–36.

2. Akhmatov, A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* M.: Fizmatgiz, 1963: 472.
3. Myshkin, N. K. and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii* Moskva: Fizmatlit, 2007: 368.
4. Litwin, W. “Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 233.11 (2019): 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.
5. Mamontov, V. A., A. I. Mironov, Ch. A. Kuzhakhmetov and A. A. Khalyavkin “Analiz iznosov kaprolonovykh vtukov deydvudnykh podshipnikov grebnogo vala.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 1. (2012): 30–35.
6. Schirber, M. Why “Wetting a Surface Can Increase Friction.” *American Physical Society: Physics* 15.196 (2022): 1–2. DOI: 10.1103/Physics.15.196.
7. Peng, L. and Liang “Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces.” *Phys. Rev. Lett.* 129. (2022): 256101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.256101.
8. Borruto, A. and Borruto “Influence of surface wettability on friction and wear tests.” *Wear* 222.1 (1998): 57–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00256-7.
9. Zhang, Z. and Zhihui “Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic.” *Biosurface and Biotribology* 6.4 (2020): 118–123. DOI: 10.1049/bsbt.2020.0023.
10. Tabenkin, A. N., S. B. Tarasov and S. N. Stepanov. *Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiiy universitet Petra Velikogo, 2007: 136.
11. Cavanaugh G. M. *Formulae and Methods VI*. Woods Hole, MA: The Marine Biological, 1975.
12. Moore, D. F. *Principles and Applications of Tribology*. Oxford: Pergamon Press, 1975.
13. L'vovskiy, E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul*. M: Vysshaya shkola, 1988: 239.
14. Hald A. *Statistical Theory with Engineering Applications*. New York: Willey, 1952.
15. Conradi, M., A. Drnovšek and P. Gregorčič “Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles.” *Scientific Reports* 8.1 (2018): 7457. DOI:10.1038/s41598-018-25850-6.
16. Prokudin, V. G., V. A. Cherepnin, D. L. Gringauz and E. P. Molodetskiy. “Primeneniye kaprolona dlya oblitovok grebnykh valov.” *Express-informatsiya: Seriya “Sudoremont”* 17 (506) (1983):15–20.
17. Tsvetkov, Yu. N. and K. E. Zhuravleva “Mekhanizm treniya kaprolona po olovyanistoy bronze v usloviyakh granichnoy smazki.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.4 (2020): 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.
18. Hakami, F., A. Pramanik, N. Ridgway and AK. Basak “Developments of rubber material wear in conveyer belt system.” *Tribology International* 111. (2017): 148–158. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7,
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Павлова Кристина Дмитриевна —
инженер-конструктор 3-й категории,
АО ЦКБ «Айсберг»,
199034, Санкт-Петербург, В. О., Большой пр., 36,
e-mail: pavlovakristina790@gmail.com

Светловская Арина Станиславовна —
инженер-технолог,
ООО «СпецМорСервис»,
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская 10, к. 6
e-mail: kiddag@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Dr. of Technical Sciences,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping (SUMIS),
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Pavlova Kristina Dmitrievna —
designer engineer of 3-rd category,
Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Iceberg»,
36, V.O., Bolshoy pr., Saint-Petersburg, 199034, Russia
e-mail: pavlovakristina790@gmail.com

Svetlovskaya Arina Stanislavovna —
manufacturing engineer, Specmorservice Ltd. Co,
office 810, 10/3, Dvinskaya str., Saint-Petersburg,
198035, Russia,
e-mail: kiddag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2024 г.
Received: Dec. 10, 2024.

INVESTIGATION OF THE TOWING RESISTANCE OF A CATAMARAN WITH SIMPLIFIED HULL FORMS

K. M. Ushakov^{1,2}, Yu. V. Yatsuk¹, A. G. Sachenko²

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

² — Forss Tekhnologii, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

The use of catamarans can be an effective solution for organizing mass passenger transportation on waterways. At the same time, there is a need to improve shipbuilding technology. The use of simplified hulls can be successfully employed to optimize the production process and significantly reduce construction costs. This article provides an analysis of existing studies on the resistance of vessels with simplified hull forms. It is shown that, in most cases, simplification of the hull form leads to an increase in towing resistance of up to 30%. The article presents the results of a model experiment conducted in the towing tank of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The model, with a single hull length of 2000 mm and a beam of 148 mm, was tested in calm water at three different drafts (60 mm, 80 mm, and 100 mm) and at speeds ranging from 1 m/s to 4 m/s, corresponding to Froude numbers between 0.22 and 0.90. The paper plots the towing resistance curves for the catamaran with simplified hull forms and presents the results of an experimental study of the effect of trim and draft on the towing resistance. The dependences of the residual resistance coefficient on the Froude number are examined. The data obtained during the experiment are compared with published results of propulsive performance studies of catamarans with similar principal particulars. The study provides evidence that simplifying the hull forms of high-speed multi-hull vessels negatively impacts towing resistance. It is concluded that the results obtained can be used in the design of vessels with simplified hull forms.

Keywords: catamaran, simplified hull forms, seakeeping, resistance, trim, draught, towing tests, multihull vessel, residual resistance, high-speed vessel.

For citation:

Ushakov, Konstantin M., Yu. V. Yatsuk and A. G. Sachenko “Investigation of the towing resistance of a catamaran with simplified hull forms.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137.

УДК 629.5.022.22:532.583.4

ИССЛЕДОВАНИЕ БУКСИРОВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТАМАРАНА С УПРОЩЕННЫМИ ОБВОДАМИ

К. М. Ушаков^{1,2}, Ю. В. Яцук¹, А. Г. Саченко²

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

² — ООО «Форсс технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование сопротивления воды движению катамаранов с упрощенными обводами. В статье выполнен анализ существующих исследований ходкости судна с упрощенными обводами. Показано, что в большинстве случаев использование такого рода конструкции судна ведет к увеличению буксировочного сопротивления до 30 %. Представлены результаты модельного эксперимента, выполненного в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Отмечается, что было проведено испытание модели на тихой воде со следующими характеристиками: длина модели — 2000 мм, ширина — 148 мм, осадка 60 мм, 80 мм и 100 мм в диапазоне скоростей 1–4 м/с, что соответствует числам Фруда 0,22–0,90. Выполнено построение кривых буксировочного сопротивления катамарана с упрощенными обводами, а также приведены результаты экспериментального исследования влияния дифферента и осадки на величину буксировочного сопротивления. Рассмотрены зависимости коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда. Выполнено сравнение данных, полученных в процессе проведения испытаний, с опубликованными в других работах результатами исследований ходкости близких по основным соотношениям

размерений катамаранов. Приведены доказательства того, что упрощение обводов высокоскоростных многокорпусных судов оказывает отрицательное влияние на величину буксировочного сопротивления. Сделан вывод о том, что полученные результаты могут найти применение при проектировании судов с упрощенными обводами.

Ключевые слова: катамаран, упрощенные обводы, ходкость, сопротивление, дифферент, осадка, модельные испытания, многокорпусное судно, остаточное сопротивление, высокоскоростное судно.

Для цитирования:

Ушаков К. М. Исследование буксировочного сопротивления катамарана с упрощенными обводами / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук, А. Г. Саченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-127-137. — EDN NLJFNC.

Введение (Introduction)

В России для высокоскоростных пассажирских перевозок традиционно применяются суда на подводных крыльях, за рубежом используются преимущественно многокорпусные суда, в частности катамараны. Особенность планировки многокорпусных судов заключается в наличии просторных палуб, позволяющих удобно разместить большое количество пассажиров. Для высокоскоростных судов характерны лекальные обводы, что требует применения листов со значительной кривизной, для изготовления которых необходим значительный объем гибочных работ. Примеры обводов таких катамаранов приведены в статье [1]. Процесс их качественного производства в современной практике является дорогостоящим и продолжительным, в то время как для заказчиков существенное значение имеют скорость постройки судна и его стоимость.

Объем гибочных работ можно существенно сократить, упростив обводы и увеличив в конструкции количество плоских листов. В работе [2] отмечается, что применение упрощенных обводов, независимо от материала корпуса, имеет большие технологические преимущества, позволяющие сократить плазовые и разметочные работы, уменьшить отходы материала при обработке, увеличить объем автоматизированных и механизированных операций при обработке, сборке и сварке секций и во время проведения стапельных работ, уменьшить производственные площади для сборки и сварки секций, увеличить количество унифицированных и стандартных деталей и элементов корпусных конструкций, сократить номенклатуру оснастки для обработки, сборки и сварки секций, проверочных работ на стапельном месте, улучшить условия прокладки трубопроводов систем, кабельных трасс, размещения механизмов и оборудования.

Вопросу проектирования судов с упрощенными обводами посвящено большое количество исследований. Так, в статье [3] рассмотрено влияние прямой и скругленной скулы на сопротивление воды движению судна, при этом отмечается, что скругленная скула уменьшает брызгообразование, требуя при этом гибки поперечного набора и листов обшивки скулового пояса. В работе [4] рассмотрена возможность проектирования рыболовного судна с упрощенными обводами на базе проекта малых рыболовных траулеров кормового траления (МРТК) типа «Балтика». В статье [5] представлен проект скоростного пассажирского судна-катамарана с упрощенными асимметричными обводами корпуса со скуловыми брызгоотбойниками и стреловидными поперечными реданами, что позволяет, по мнению авторов, более быстро, плавно и устойчиво выходить в режим глиссирования с минимальным брызгообразованием. К сожалению, работа [5] не содержит данных, позволяющих сделать вывод о том, в какой мере ее авторам удалось достичь заявленных показателей.

В отчете по НИР¹ и научной публикации А. Б. Карпова «Сопротивление воды движению судов с поверхностью корпусов из плоских секций» (Труды Горьковского политехнического ин-

¹ Министерство речного флота РСФСР «Новосибирский институт инженеров водного транспорта (НИИВТ)»: отчет по НИР «Модельные испытания по определению гидромеханических характеристик», т. I: Буксировочные испытания модели с лекальными обводами, тема № УШ-4.4 по плану НИР МРФ, тема 26/79 по плану НИИВТ. Новосибирск, 1981. С. 12–15.

ститута им. А. А. Жданова. 1974. № 13. С. 31–37) приведены результаты модельного эксперимента по определению сопротивления моделей теплоходов пр. 507, Р143, 2110 и их аналогов с упрощенными обводами пр. 507'Пл, Р143'Пл, 2110'Пл. В ходе исследований было установлено, что упрощение обводов вызывает значительный рост буксировочного сопротивления. На основании полученных результатов можно сделать прогноз о том, что применение упрощенных обводов при проектировании высокоскоростных судов приведет к появлению гидродинамических эффектов, нехарактерных для сравнительно тихоходных судов.

Целью данной работы является исследование ходкости высокоскоростных катамаранов с упрощенными обводами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование проводилось в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Установка для проведения измерений гидродинамических сил, возникающих на корпусе модели судна при ее буксировке, включала чашу бассейна, буксировочную тележку и комплект измерительной аппаратуры. Характеристики чаши бассейна: длина 120 м, ширина — 6,0 м, глубина — 3,0 м. Максимально возможная скорость буксировки составляла около 6 м/с.

Для исследования была выбрана модель катамарана с остроскулыми упрощенными обводами. Длина одного корпуса модели — 2000 мм, ширина — 148 мм. Форма обводов показана на рис. 1 и 2.

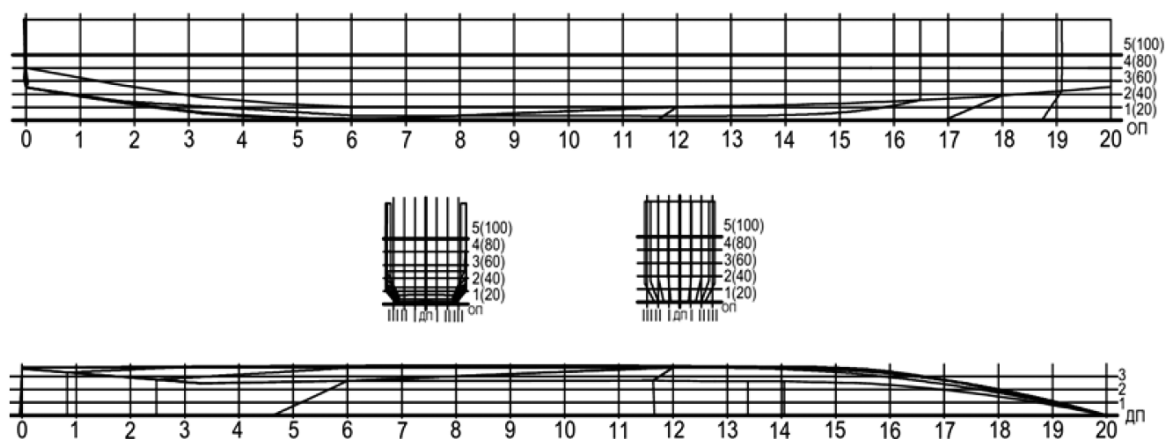


Рис. 1. Форма корпуса модели



Рис. 2. Вид модели катамарана с упрощенными обводами

Испытания катамарана проводились при трех значениях осадки: 60 мм, 80 мм и 100 мм. В каждом случае были исследованы три варианта посадки: на ровный киль с дифферентом 20 мм на нос и с дифферентом 20 мм на корму.

В данной работе представлены результаты проведения испытаний ходкости и получены кривые буксировочного сопротивления, а также определено остаточное сопротивление в зависимости от числа Фруда. Определение коэффициентов остаточного сопротивления выполнялось без учета динамического изменения площади смоченной поверхности.

Последовательность выполненных расчетов следующая.

1. Вычисление коэффициента полного сопротивления модели (C_M):

$$C_M = \frac{2R_T}{\rho V^2 S_M},$$

где R_T — измеренная сила сопротивления корпуса модели, Н;

S_M — площадь смоченной поверхности модели, м²;

V — скорость буксировки модели, м/с;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — массовая плотность воды.

2. Определение числа Фруда (относительной скорости — Fn):

$$Fn = V / \sqrt{gL},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

V — скорость буксировки модели, м/с;

L — длина модели, м.

3. Число Рейнольдса:

$$Re_M = VL / \nu_M,$$

где $\nu_M = 1,092 \cdot 10^{-6}$ — кинематическая вязкость воды в опытовом бассейне, м²/с.

4. Вычисление коэффициента сопротивления эквивалентной гладкой пластины $C_{F_{o.m}}$

$$C_{F_{o.m}} = \frac{0,075}{(\lg Re_M - 2)^2}.$$

5. Коэффициент остаточного сопротивления корпуса C_R

$$C_R = C_M - C_{F_{o.m}}.$$

Для высокоскоростных судов определение коэффициента остаточного сопротивления в некоторых случаях рекомендуется выполнять с учетом ходового изменения смоченной поверхности. Учет данного фактора позволяет точнее разделить составляющие полного сопротивления. При испытаниях данной модели ходовые дифферент и всплытие были относительно небольшими, поэтому учет ходовой посадки не выполнялся.

Результаты (Results)

На рис. 3 приведены экспериментальные значения полного сопротивления R_M в зависимости от скорости V , дифферента ψ и осадки T . При увеличении осадки полное сопротивление возрастает. В процессе проведения эксперимента в опытовом бассейне максимальная скорость движения модели оказалась ограниченной заливанием палубы.

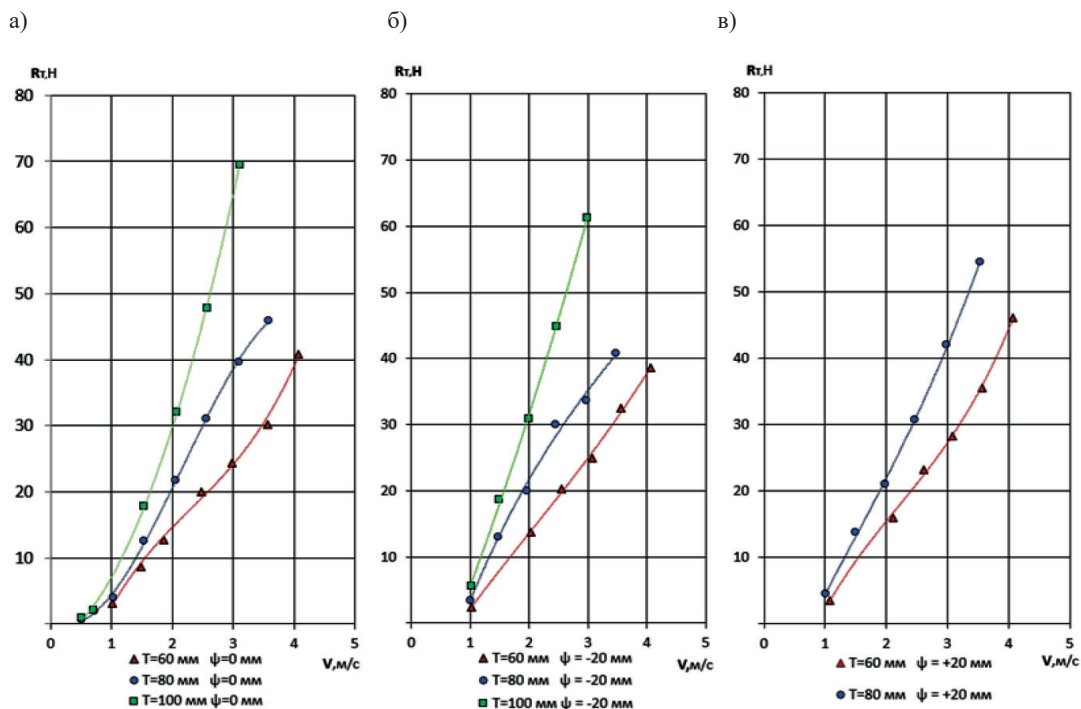


Рис. 3. Экспериментальные значения полного сопротивления в зависимости от скорости, дифферента и осадки:
а — посадка на ровный киль; б — дифферент на корму; в — дифферент на нос

На рис. 4 показаны экспериментальные значения коэффициента остаточного сопротивления в зависимости от числа Фруда, дифферента и осадки.

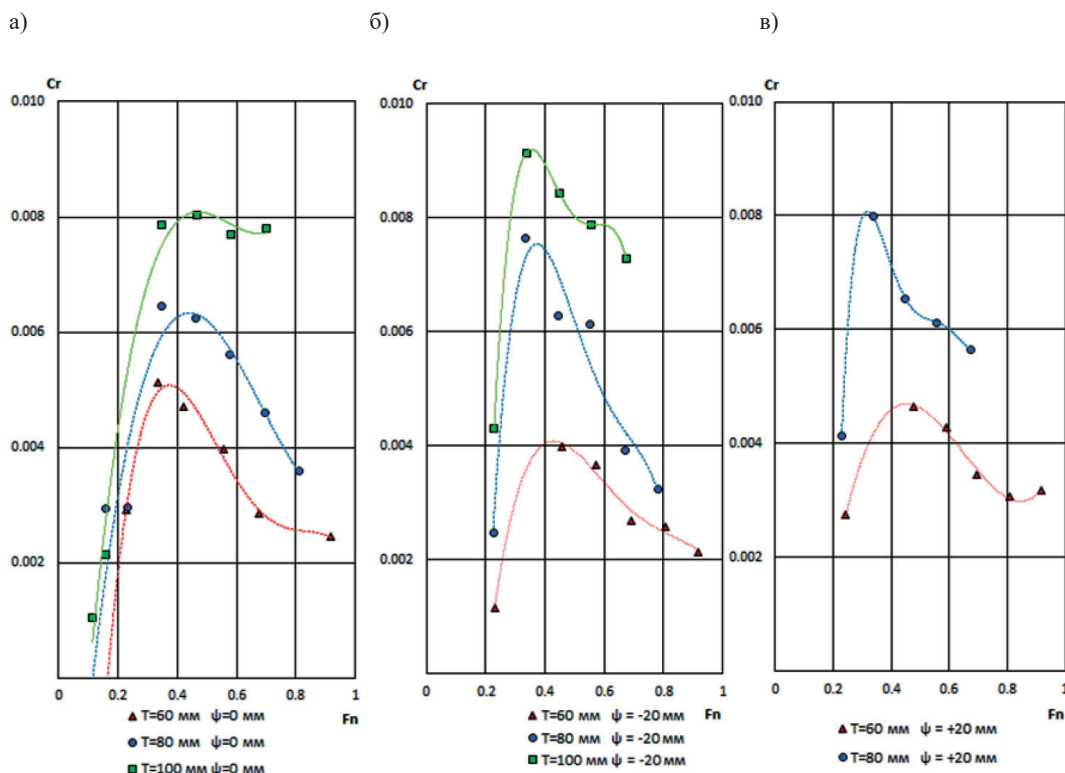


Рис. 4. Экспериментальные значения коэффициента остаточного сопротивления C_r в зависимости от числа Фруда, дифферента и осадки:
а — посадка на ровный киль; б — дифферент на корму; в — дифферент на нос

Характер полученных кривых в целом соответствует современным представлениям о гидродинамике высокоскоростных судов [1]. При относительной скорости около 0,40 имеется характерный максимум на кривых остаточного сопротивления. Форма кривой несколько отличается для варианта с осадкой $T = 100$ мм при посадке на ровный киль. Возможно, необычная зависимость вызвана повышенным заливанием палубы модели и узла крепления модели к динамометру. Вследствие этой же причины испытания при осадке 100 мм и дифференте на нос не проводились.

Обсуждение (Discussion)

Как видно из рис. 3 и 4, для всех осадок при числе Фруда более 0,60 дифферент на нос вызывает увеличение сопротивления, а на корму — снижение. Считается, что при движении с малой скоростью преимущество в сопротивлении должно быть у вариантов с посадкой на ровный киль или с небольшим дифферентом на нос [6]. Для осадок 80 мм и 100 мм сопротивление ниже при нулевом дифференте, однако в случае осадки 60 мм минимальные значения коэффициента остаточного сопротивления были получены также при дифференте на корму. При любых значениях скорости и дифферента остаточное сопротивление ниже для варианта с осадкой 60 мм, т. е. для модели с максимальным отношением ширины одного корпуса к осадке. Было выполнено сравнение полученных в результате эксперимента данных с опубликованными данными о сопротивлении близких по размерениям катамаранов, а также с результатами расчетов, выполненных с использованием существующих статистических методов.

Сравнение полученных данных и результатов расчетов с использованием метода Grubisic приведены на рис. 5. Видно, что значения коэффициентов остаточного сопротивления, рассчитанных согласно указанному методу, близки к экспериментальным значениям, полученным в результате модельного эксперимента. При осадке 60 мм кривая, рассчитанная по методу Grubisic, находится ниже экспериментальной кривой при относительной скорости $Fn < 0,4$ и выше в диапазоне скоростей $Fn = 0,4–0,6$, кривые практически совпадают в диапазоне скоростей $Fn = 0,7–1$. При осадке 80 мм экспериментальная кривая расположена выше кривой, рассчитанной по методу Grubisic, при скоростях $Fn < 0,4$ и $Fn > 0,6$.

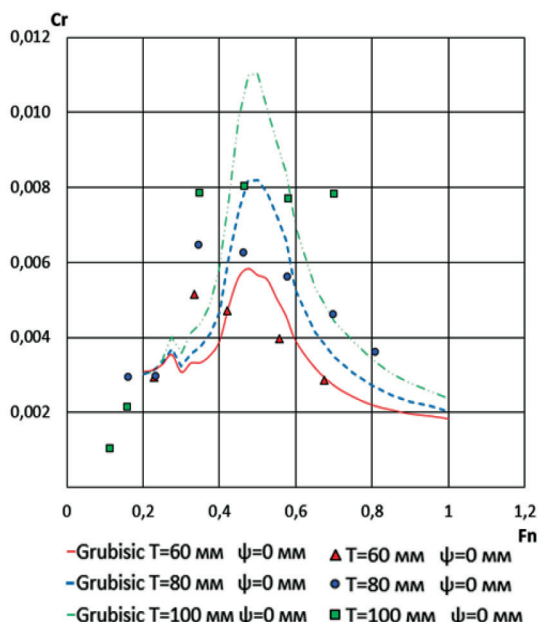


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента остаточного сопротивления C_R в зависимости от числа Фруда относительно нулевого дифферента и осадок

В статье [7] описано применение воздушной каверны на днище высокоскоростных катамаранов в качестве возможного решения проблемы снижения гидродинамического сопротивления

движению судов не только за счет уменьшения сопротивления трения, но и за счет уменьшения волнового сопротивления благодаря благоприятной интерференции волновых систем корпусов. В частности, были выполнены сравнительные испытания катамарана на воздушной каверне и высокоскоростного катамарана с обводами, спроектированными для переходного режима. При числе Фруда по водоизмещению $Fn_D = 1,5$ выигрыш в сопротивлении по сравнению с традиционным аналогом составил $\delta = 12,9 \%$, при $Fn_D = 2,0$ — $\delta = 18,8 \%$, при $Fn_D = 2,5$ — $\delta = 24,8 \%$, где $Fn_D = \frac{V_0}{\sqrt{9,81D^{1/3}}}$ и δ — разница сопротивлений.

Таким образом, результаты испытаний позволили ответить на вопрос о возможности эффективного применения искусственной каверны для снижения гидродинамического сопротивления катамаранов, эксплуатируемых в переходном режиме движения при скорости хода в диапазоне $Fn_D = 1,0 - 3,0$. При скорости $Fn_D = 2,5$ возможно снижение гидродинамического сопротивления за счет применения воздушной каверны на величину до 25 %. Влияние морского волнения на состояние каверны и величину сопротивления в данном случае не рассматривается. Сравнение относительного сопротивления данных катамаранов с наиболее близким, полученным в рамках данного исследования, приведено на рис. 6.

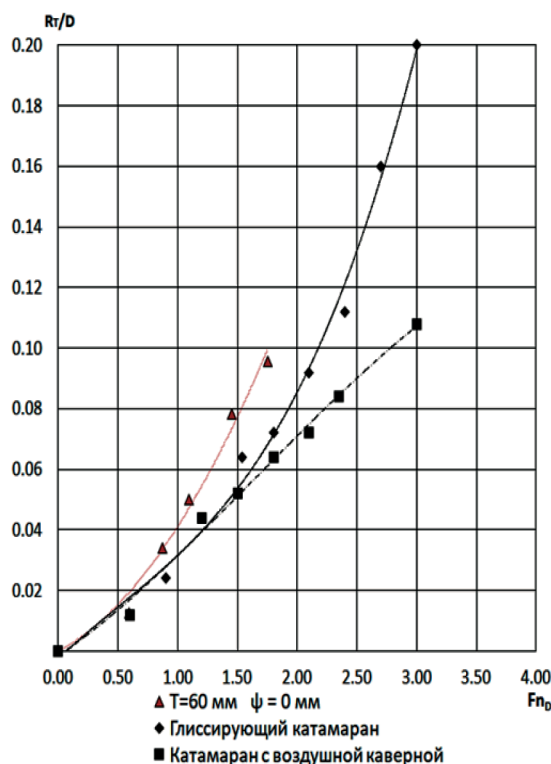


Рис. 6. Зависимость обратного гидродинамического качества R_τ / D от числа Фруда по водоизмещению

Зависимость обратного гидродинамического качества R_τ / D — отношение полного сопротивления R_τ , Н, к водоизмещению D , Н. Согласно приведенным данным, сопротивление испытанного катамарана выше в среднем на 25 % по сравнению с полученными результатами в работе [7].

В процессе испытаний модели катамарана с упрощенными обводами изменение дифферента было незначительным, что нехарактерно для подобных судов. В работе [8] отмечается, что дифферент на корму положительно сказывается на величине буксировочного сопротивления скоростных судов. У многих катамаранов обшивка днища в носу имеет подъем, обеспечивающий увеличение ходового дифферента. В связи с этим в процессе проведения дальнейших исследований планируется модифицировать таким образом форму прошедшего испытания катамарана.

В статье [9] в результате модельного эксперимента была получена кривая буксировочного сопротивления для катамарана с носовой оконечностью *V*-образной формы и форштевнем с обратным наклоном. Длина судна составляла 27 м, ширина одного корпуса — 1,85 м, средняя осадка — 1,25 м. Сравнение результатов испытаний выполнено для модели с осадкой 100 мм, поскольку она наиболее близка по соотношению B/T .

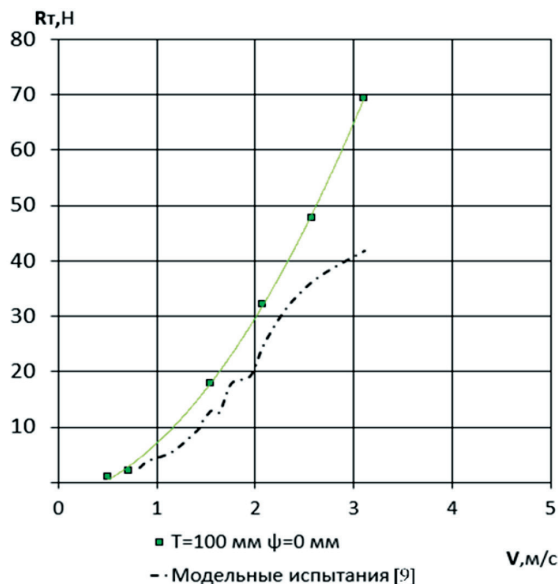


Рис. 7. Экспериментальные кривые буксировочного сопротивления модели при нулевом дифференте

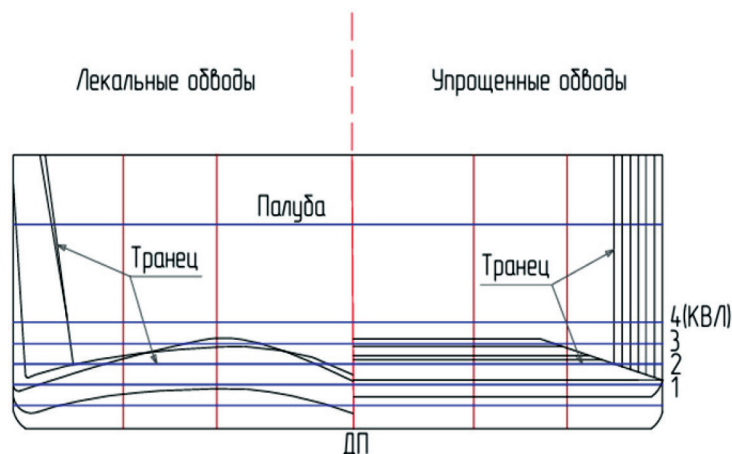


Рис. 8. Кормовые оконечности проекций «корпус» теоретических чертежей моделей судов пр. Р143 и Р143Тл

В ходе проведения испытаний в Новосибирском институте инженеров водного транспорта (НИИВТ) модели пр. Р143 и пр. Р143Тл выполнены в масштабе 1:10, диапазон чисел Фруда составил 0,08–0,2; на глубокой воде сопротивление модели с упрощенными обводами больше сопротивления модели лекальных обводов в среднем на 12 %, на мелководье сопротивление модели Р143Тл превышает сопротивление модели Р143 в среднем на 6 %.

Модели судов пр. 507 и пр. 507Тл были изготовлены в масштабе 1:30, диапазон чисел Фруда составил от 0,075 до 0,18. На глубокой воде при $Fn = 0,18$ наблюдается равенство сопротивлений, на меньших скоростях сопротивление модели с упрощенными обводами больше, чем сопротивление модели с лекальными обводами. На мелководье равенство сопротивлений моделей достигается при $Fn = 0,135$, при меньшей скорости сопротивления модели 507Тл увеличение достигает 28 %.

Модель 2110Тл была выполнена с упрощенными обводами в носу, состоящими из двух наклонных плоскостей, переходящих в днищевую плоскость с радиусным закруглением, в корме — из пяти днищевых плоскостей и борта, представляющих развертывающуюся поверхность с кривизной в одном направлении. Модели пр. 2110 и пр. 2110Тл были изготовлены в масштабе 1 : 10. Диапазон чисел Фруда составляет от 0,103 до 0,278. На глубокой и мелкой воде сопротивление модели с упрощенными обводами больше сопротивления модели лекальных обводов в среднем на 30 %.

В статье [3] изучено влияние формы скулы на сопротивление. Для проведения испытаний была изготовлена модель с соотношением размерений $L / B = 2,88$ и $B / T = 5,15$. На основе приведенных данных сделан вывод о том, что форма скулы для данной модели практически не влияет на сопротивление воды движению судна. Буксировки проводились в диапазоне чисел Фруда 0,111–0,331.

В статье [4] в качестве объекта исследования выбран корпус судна с упрощенными обводами, разработанный на базе проекта МРТК типа «Балтика». В ней представлены расчеты остойчивости на больших углах крена в выбранном случае нагрузки и расчеты сопротивления судна с упрощенными обводами для оценки гидродинамических характеристик. Результаты сравнения сопротивления показали, что применение упрощенных обводов ведет к росту сопротивления в условиях свободного хода до 3,5 %, в условиях траления рост сопротивления составил 0,12 %. Расчет сопротивления для оценки гидродинамических характеристик судна с упрощенными обводами и МРТК «Балтика» выполнен авторами по методу В. А. Ерошина. Необходимо отметить, что данный метод применим для промысловых судов с круглоскулистыми обводами. Для варианта с упрощенными обводами должен быть использован один из методов расчета сопротивления водоизмещающих остроскулых судов (например, метод Робинсона или метод Савицкого). Сравнение расчетов сопротивления, выполненных различными методами для разных обводов, является более корректным.

В результате выполненных в статье [10] расчетов кинематических характеристик продольной качки и волновых изгибающих моментов с использованием нелинейной теории качки на нерегулярном волнении установлено, что ходкость и мореходность судов с упрощенными обводами хуже по сравнению с традиционными обводами. Авторы считают, что применение упрощенных обводов для среднескоростных и быстроходных водоизмещающих судов нецелесообразно ввиду значительного увеличения сопротивления, требуемой мощности, характеристик продольной качки и волновых изгибающих моментов.

В статье [11] исследовано сопротивление воды движению маломерного судна с упрощенными обводами. Исследование включало расчеты по эмпирическим зависимостям, с использованием численных методов, с помощью проведения модельного эксперимента и натурных испытаний. Достоверность расчетных и модельных исследований невелика вследствие применения некорректных методик, программного продукта и очень маленького размера модели, однако полученные натурные данные позволяют судить о величине сопротивления с достаточной точностью. Сравнение с приведенными в данной работе результатами расчетов по методам Холтропа и Ерошина фактически является сопоставлением остроскулого и круглоскулого вариантов судна. Сопротивление судов с упрощенными обводами в зависимости от скорости оказалось выше на 30–90 %.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ исследуемых данных показал, что влияние упрощения обводов на буксировочное сопротивление судов неоднозначно. В некоторых случаях вариант с упрощенными обводами практически не уступает варианту с лекальными обводами. Однако в большинстве случаев упрощение формы корпуса вызывает увеличение сопротивления на величину до 30 %.

2. Получены экспериментальные данные о сопротивлении воды движению катамарана с упрощенными обводами при разных значениях осадки и дифферента. Было выполнено сравнение с результатами испытаний, близкими по соотношениям размерений катамаранов, а также с результатами расчетов, выполненных с использованием статистических методов. Сравнение показало, что упрощение обводов, как правило, увеличивает буксировочное сопротивление.

3. На основании полученных результатов планируется модифицировать форму обводов, добавив небольшой уклон обшивки днища в носовой оконечности с тем, чтобы увеличить ходовой дифферент и снизить площадь смоченной поверхности на высоких скоростях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков К. М. Экспериментальное исследование влияния параметров катамарана на остаточное сопротивление / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 295–303. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303. — EDN AAELZL.

2. Глозман М. К. Технологичность конструкций корпуса морских судов. / М. К. Глозман. — Л: Судостроение, 1984. — 296 с.

3. Иванова А. П. Исследование влияния формы скулы на сопротивление воды движению судна / А. П. Иванова, А. Д. Мухамедшина, Е. А. Попова // 73-я Международная студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции, Астрахань, 17–22 апреля 2023 года. — Астрахань: Астраханский государственный технический ун-т, 2023. — С. 1234–1236 — EDN MBPKEU.

4. Москаленко Ю. В. Разработка проекта судна с упрощенными обводами на базе проекта 1328 МРТК Балтика / Ю. В. Москаленко, А. А. Мушенков, Д. Р. Синкевичуте, И. И. Шахмиев // Вестник молодежной науки. — 2024. — № 1(43). — С. 11. DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-17-17. — EDN CWLAJT.

5. Маслюк Е. В. Скоростное пассажирское судно-катамаран / Е. В. Маслюк, С. В. Гриб // Инновации в науке, образовании и бизнесе — 2013: труды XI Международной научной конференции. Калининград, 25–27 сентября 2013 года. Ч. 1. — Калининград: Калининградский государственный технический ун-т, 2013. — С. 319–322 — EDN ZEEVBT.

6. Ушаков К. М. Влияние дифферента на сопротивление воды движению модели малого пассажирского судна / К. М. Ушаков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 723–729. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-723-729. — EDN EPXJER.

7. Метелица С. С. Экспериментальное исследование ходкости высокоскоростных катамаранов с воздушной каверной / С. С. Метелица // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 14–22. — EDN UDUJSJ.

8. Сверчков А. В. Экспериментальное исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на ходовые качества волнорассекающего катамарана / А. В. Сверчков, Г. Б. Крыжевич, А. Ю. Правдин // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–3(52). — С. 13–19. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.029. — EDN ALIETG.

9. Никитина А. Э. Исследование буксировочного сопротивления катамарана / А. Э. Никитина, К. М. Ушаков // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России 19 мая 2022 года: материалы XIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов (в 3 ч.). Ч. 2. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — С. 36–45.

10. Суров О. Э. Влияние формы корпуса на мореходность и прочность судов / О. Э. Суров, М. В. Китаев, Е. Е. Соловьева // Судостроение. — 2023. — № 1(866). — С. 8–12. — EDN IPZVNA.

11. Аносов А. П. Сопротивление воды движению маломерных судов с упрощенными обводами / А. П. Аносов, С. В. Антоненко, В. О. Бессонова, А. А. Воробьева // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 1–1(63). — С. 31–40. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.003. — EDN DZIRDH.

REFERENCES

1. Ushakov, K. M. and Yu. V. Yatsuk. “Experimental study of the influence of catamaran parameters on water resistance.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 295–303. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303.

2. Glozman, M. K. *Tekhnologichnost' konstruktsey korpusa morskikh sudov*. L: Sudostroenie, 1984: 296.

3. Ivanova, A. P., A. D. Mukhamedshina and E. A. Popova. “Issledovanie vliyaniya formy skuly na soprotivlenie vody dvizheniyu sudna.” *73-ya Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: materialy konferentsii, Astrakhan', 17–22 aprelya 2023 goda*. Astrakhan': Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2023: 1234–1236.

4. Moskalenko, Yu. V., A. A. Mushenkov, D. R. Sinkevichute and I. I. Shakhmiev. "Development of a vessel design with simplified contours based on the project 1328 MRTK Baltika." *Vestnik molodezhnoy nauki* 1(43) (2024): 11. DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-17-17.

5. Maslyuk, E. V. and S. V. Grib. "Skorostnoe passazhirskoe sudno-katamaran." *Innovatsii v nauke, obrazovanii i biznese — 2013: trudy XI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Kaliningrad, 25–27 sentyabrya 2013 goda. Tom Chast' I*. Kaliningrad: Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013: 319–322.

6. Ushakov, K. M. "Trim influence on water resistance to movement of small passenger ship model." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.5 (2021): 723–729. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-723-729.

7. Metelitsa, S. S. "Experimental research of propulsion high-speed catamarans with an air cavity." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 14–22.

8. Sverchkov, A. V., G. B. Kryzhevich and A. Yu. Pravdin. "Experimental investigation of structural and operational factor effects on speed performance of wave cleaving catamarans." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 2–3(52) (2021): 13–19. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.029.

9. Nikitina, A. E. and K. M. Ushakov. "Issledovanie buksirovochnogo soprotivleniya katamarana." *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii 19 maya 2022 goda: materialy XIII mezhvuzovskoy nauchno- prakticheskoy konferentsii aspirantov, studentov i kursantov. Ch.2* SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2022: 36–45.

10. Surov, O. E., M. V. Kitaev and E. E. Solov'eva. "Influence of hull shape on seagoing performance and endurance of vessels." *Shipbuilding* 1(866) (2023): 8–12.

11. Anosov, A. P., S. V. Antonenko, V. O. Bessonova and A. A. Vorob'eva. "Water resistance to the movement of small vessels with simplified hull lines." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1–1(63) (2024): 31–40. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Константин Михайлович — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Двинская, 5/7
ведущий инженер-конструктор
ООО «Форсс технологии»
190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Бронницкая 44/117, лит. А, пом. 1Н
e-mail: lotinskey@yandex.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Яцук Юрий Владимирович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Двинская, 5/7
e-mail: YatsukUV@gumrf.ru
Саченко Александра Григорьевна — инженер
ООО «Форсс технологии»
190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Бронницкая, 44/117, лит. А, пом. 1Н
e-mail: Sachenko0501@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ushakov, Konstantin M. — associate professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
lead design engineer,
Forss Tekhnologii, Ltd.
44/117 Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,
Russian Federation
e-mail: lotinskey@yandex.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Yatsuk, Yury V. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: YatsukUV@gumrf.ru
Sachenko, Alexandra G. — engineer
Forss Tekhnologii, Ltd.
44/117 Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,
Russian Federation
e-mail: Sachenko0501@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 января 2024 г.
Received: Jan. 16, 2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147

EDN OUDSCU

POSSIBILITY OF USING TRADITIONAL MODERN MARINE DIESEL POWER PLANTS IN AUTONOMOUS SHIPPING

A. P. Petrov, G. E. Zhivljuk

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

The subject of this study is the equipment of the marine power plant of autonomous vessels. The degree of readiness of a modern marine power plant for use on autonomous vessels is considered from the point of view of its high degree of reliability. The paper demonstrates the capabilities of the method for constructing a table of operational risk indices and a redundancy risk index using the example of an average vessel intended for coastal shipping in European waters. Based on the presented sample of power plant elements, the operational risk index and the redundancy risk index for the marine equipment are analyzed, and an analysis of the reasons for their importance is given. The main engine and its elements, torque transmission mechanism, auxiliary engines and generator sets, fuel, lubrication, cooling water supply systems, and the air starting system are discussed as examples. In addition, the steering gear and the exhaust system are considered, and the redundancy risk indices (RRRI) are given for the selected equipment. After identifying the weak links of the considered installations, solutions for overcoming the risks that arise are proposed. It is noted that these solutions depend directly on the weak link and may consist of several options. Examples include redundant tuning, searching for alternative ship machinery elements with a lower risk index, or considering actions that allow a certain part to be fully operational. The paper attempts to find a solution for each element of the sample with a high-risk level (RRRI equal to 8, 9, or 10) when components are considered for improving reliability. Components with an average RRRI value of 6 or 7 are also considered. In this case, the implementation of alternative methods for forming a propulsion complex, for example, based on the known principles of electric propulsion, is noted as highly attractive as a way to overcome a large number of problems. It is concluded that no solutions are possible without a comprehensive analysis of financial viability. The conclusions drawn from the results reflect the possible direction of work on the creation of a marine power plant for equipping autonomous vessels.

Keywords: autonomous vessel, autonomous control, possible solutions, mechanical installation, reliability, failures, weak links, indices, risks, severity of consequences.

For citation:

Petrov, Aleksandr P. and G. E. Zhivljuk "Possibility of using traditional modern marine diesel power plants in autonomous shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2024): 138–147. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147.

УДК 621.43.074

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В АВТОНОМНОМ СУДОХОДСТВЕ

А. П. Петров, Г. Е. Живляук

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

Предметом настоящей работы является анализ систем оборудования судовой энергетической установки автономных судов. Рассмотрена степень готовности современной судовой энергетической установки для применения на автономных судах с точки зрения ее высокой степени надежности. В работе продемон-

стрированы возможности метода построения таблицы индексов рисков эксплуатации и индекса риска снижения избыточности на примере среднестатистического судна, предназначенного для каботажных морских перевозок. На основе представленной выборки элементов энергетической установки выполнен анализ индекса риска эксплуатации и индекса риска снижения избыточности судового оборудования, а также анализ причин, в соответствии с которыми они имеют такое важное значение. В качестве примеров рассмотрены главный двигатель и его элементы, механизм передачи крутящего момента, вспомогательные двигатели и генераторные установки, системы подачи топлива, смазки, охлаждающей воды, а также система воздушного пуска. Кроме того, рассмотрено рулевое устройство и система выпуска отработавших газов, приведены индексы риска снижения избыточности RRR1 выбранного оборудования. После выявления слабых звеньев рассматриваемых установок предложены решения по преодолению возникающих рисков. Отмечается, что эти решения зависят непосредственно от слабого звена и могут состоять из нескольких вариантов. Указано, что примерами могут служить избыточная настройка, поиск альтернативных элементов судового механизма с более низким индексом риска или рассмотрение действий, позволяющих сделать определенную деталь полностью работоспособной. В работе предпринята попытка найти решение для каждого элемента выборки с высоким уровнем риска (RRR1 равно 8, 9 или 10), когда компоненты рассматриваются на предмет повышения надежности. Также рассмотрены компоненты со средним значением RRR1 — 6 или 7. В этом случае отмечается высокая привлекательность реализации альтернативных способов формирования пропульсивного комплекса, например, исходя из известных принципов электродвижения как способа преодоления большого числа проблем. Сделано заключение о том, что любые решения невозможны без всестороннего анализа финансовой жизнеспособности. Выводы, сделанные на основе полученных результатов, отражают возможную направленность работ по созданию судовой энергетической установки для комплектования автономных судов.

Ключевые слова: автономное судно, автономное управление, возможные решения, механическая установка, надежность, отказы, слабые звенья, индексы, риски, тяжесть последствий.

Для цитирования:

Петров А. П. Возможность использования традиционных современных судовых дизельных энергетических установок в автономном судоходстве / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 17. — № 1. — С. 138–147. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147. — EDN OUDSCU.

Введение (Introduction)

По прогнозам специалистов, в ближайшие несколько лет цифровизация и автоматизация станут ключевыми факторами инноваций в области морского транспорта [1]. Такая направленность развития судоходной отрасли неизбежно отразится на подходах к обеспечению надежности оборудования, предназначенного для удаленного управления с минимальной поддержкой людей. Несмотря на большое количество исследований в области автономных систем навигации и управления на морском транспорте оценке необслуживаемых машинных помещений уделено недостаточное внимание. Отчасти это связано с высокой сложностью и многообразием оборудования машинного помещения, бесперебойная работа которого в условиях автономного судна (АС)¹ является залогом его успешного функционирования.

Безотказность традиционной судовой энергетической установки (СЭУ) и ее элементов обеспечивается постоянным контролем за их работой членами машинной команды. Для достижения возможности создания необслуживаемого в течение определенного времени машинного помещения, когда невозможно проведение направленных на обслуживание и устранение неполадок оборудования мероприятий со стороны специалистов машинной команды, необходимо, в первую очередь, выделить те судовые технические средства (СТС), которые проявляют наибольшую вероятность потери работоспособности с учетом возможных последствий их отказа. Такое состояние проблемы побуждает исследователей в своих разработках к созданию различных моделей оценки рисков, связанных с отказом СТС машинного помещения, и в конечном итоге к выработке стратегии обеспечения безотказной их работы.

Для того чтобы морские автономные или дистанционно управляемые надводные суда (МАНС) были эффективны во время безэкипажной эксплуатации, важно, чтобы автоматика машинного помещения самостоятельно управляла, выполняла мониторинг технического состояния

¹ Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. 96 с.

и поддерживала работоспособность всей энергетической установки без вмешательства человека². Автоматизированная механическая установка (АМУ — в трактовке РС³) должна быть достаточно устойчивой, чтобы иметь возможность восстанавливаться после периодических и случайных возмущающих воздействий, сбоев в работе и ухудшения эксплуатационных характеристик. В противном случае системе может потребоваться внеплановое техническое обслуживание или работа ее будет остановлена. Следовательно, АМУ должна обеспечивать свою работу без вмешательства человека и безопасно возвращать судно в порт.

Для моделирования сбоев в необслуживаемых компонентах машинного помещения создается дерево случайных процессов, а иерархический байесовский вывод используется для облегчения прогнозирования неизвестных параметров процесса. Принимая во внимание принцип дублирования наиболее уязвимых СТС как основной принятый метод обеспечения надежности, вероятностная байесовская сеть позволила разработать и оценить зависимость между активными и резервными компонентами, чтобы определить влияние резервных блоков на длительную работоспособность необслуживаемого оборудования. Полученные данные предоставляют полезную информацию для анализа связанных неопределенностей и прогнозирования неблагоприятных событий, которые подвергают риску СТС машинного помещения. Результатом анализа оказывается возможность прогнозирования периода надежной работы АМУ и способности к восстановлению функционирования необслуживаемого машинного отделения. Для демонстрации применения возможностей такого подхода рассматривается реальный пример торгового судна, используемого для каботажных морских перевозок в европейских водах.

Целью настоящей работы является формирование общих подходов к комплектованию машинных помещений безэкипажных судов на основе методик выявления слабых звеньев традиционных СЭУ посредством решения ряда следующих взаимосвязанных задач:

- создание выборки высокорисковых элементов из детальной разбивки систем и конструкции СЭУ;
- поузловая оценка рисков и потенциальных возможностей автономной работы машинного помещения;
- формирование предложений по совершенствованию высокорисковых узлов;
- поиск альтернативных способов достижения применимости традиционных СЭУ для АС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Конструкции и комплектации машинных помещений отличаются многообразием [3]. В настоящей работе в качестве примера рассмотрено типичное судно ближнего плавания в европейских водах. Большинство таких судов работает на четырехтактных дизельных двигателях, соединенных с гребным винтом редукторной передачей, находясь исключительно в пределах зоны контроля выбросов (ECA) и используя в основном дистиллятные сорта топлива (судовое дизельное топливо (MDO)). Для дальнейшего анализа принимается судно с СЭУ, включающей один главный двигатель, два вспомогательных дизель-генератора и аварийный дизель-генератор. Работу судна и его энергетической установки поддерживают судовые системы и системы СЭУ. На начальном этапе для разбивки оборудования примем схему, приведенную на рис. 1.

Главный и вспомогательные двигатели, использующие систему пневмоцилиндрового запуска, охлаждаются с помощью трехконтурной водяной системы (высокотемпературная система (НТ), централизованной системы (низкотемпературной) (LT) и системы забортной воды (SW)) (см. *Возникший И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания. Конструкция двигателей: учебник. — В 2 т. — СПб.: Моркнига, 2010. — Т. 1. — 260 с.; т. 2. — 382 с.). Система топливоподготовки СЭУ обеспечивает оптимальные параметры, необходимые для эффективной работы дизельной топливной аппаратуры. Судно оснащено рулевым устройством в корме и носовыми подруливающими устройствами.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. I: Классификация. СПб.: РМРС, 2024. 259 с.

³ Там же. Ч. XV: Автоматизация. СПб.: РМРС, 2024. 108 с.



Рис. 1. Схема первичной разбивки оборудования [2]

На следующем этапе должна быть выполнена более детальная разбивка с акцентированием внимания на отдельных, наиболее важных и ответственных элементах, приведенных на рис. 2.



Рис. 2. Дополнительная разбивка оборудования СЭУ [2]

Завершающий этап разбивки приведет к многочисленной (не менее 100 элементов) выборке элементов систем и устройств СЭУ. Поэтому рассмотрим в качестве примера часть этих элементов, за исключением тех, которые размещены в основном за пределами машинного отделения. Эти системы будут включать рулевое устройство, балластную, осушительную системы, систему пожаротушения и т. д. Однако поскольку рулевые машины часто являются причиной потери работоспособности судов [3], во внимание принимается рулевое устройство.

В разбивке главного энергетического оборудования необходимо акцентировать внимание на следующих наиболее уязвимых элементах пропульсивной системы: крышка цилиндра, цилиндропоршневая группа, турбокомпрессор, насосы систем двигателя, редуктор, система управления движением, дейдвудное устройство. Рассмотрим более подробно эти элементы.

Крышка цилиндра является одним из самых теплонапряженных элементов конструкции четырехтактного двигателя [4]. Возникающие циклические и регулярные термические напряжения в конструкции совместно с действующими механическими напряжениями приводят к образованию усталостных разрушений в виде трещин. Развитие трещины может привести к проникновению ее в полости охлаждения, что в конечном итоге способно создать аварийную ситуацию, спровоцировав гидроудар с полной потерей работоспособности двигателя. По этой причине крышки цилиндров подвергаются проверке на гидроплотность. Тем не менее не допуская развитие и усугубление аварийной ситуации, наличие незначительных протечек не оказывается критичным и двигатель может продолжать свое функционирование в аварийном режиме с ограничениями развиваемой мощности в течение некоторого непродолжительного периода времени до ремонта.

Поломка деталей цилиндропоршневой группы приводит к катастрофическим последствиям для двигателя с возможным разрушением деталей остова и серьезным повреждением деталей кривошипно-шатунного механизма [5]. Поэтому такие дефекты требуют немедленного останова двигателя.

Полный выход из строя агрегата наддува [6] с катастрофическими последствиями для двигателя представляется маловероятным. Нарушение работы турбокомпрессора для четырехтактного двигателя не следует рассматривать как критическую неисправность, так как оно неизбежно вызовет падение развиваемой мощности, но не приведет к останову двигателя, как в случае двухтактного двигателя, принципиально не способного работать без внешнего источника сжатого воздуха.

Насосы систем двигателя в большинстве конструкций судовых двигателей автономные и имеют электропривод. Как правило, в системах смазки и охлаждения автономные насосы дублированы [7], [8]. В случае навесного исполнения насосов с приводом от коленчатого вала двигателя насосы систем вполне могут быть продублированы автономными. Это означает, что оборудование может рассматриваться как избыточное, т. е. его индекс риска снижения избыточности RRRI [9] уменьшается на единицу. Аналогичные процессы могут быть уместны также для топливной системы, построенной по схеме аккумуляторной электронно-управляемой системы топливоподачи Common Rail, которой оснащено большое количество выпускаемых двигателей.

Нарушения функционирования элементов редукторной передачи повлекут за собой частичную или полную потерю хода судна. Наиболее удобный и надежный способ проверки состояния — контроль температуры и структуры редукторного масла. Если механизм передачи выходит из строя, то на гребной винт больше не может подаваться мощность, что делает последствия выхода из строя очень тяжелыми.

Система управления движением судна является важным элементом пропульсивной системы, оказывая большое влияние на маневренность. Основная нагрузка на систему приходится в акватории порта, и в случае возникновения чрезвычайной ситуации с ней помогут справиться буксиры. Единственным элементом, который невозможно проверить, так как он скрыт внутри механизма, является привод механизма изменения шага винта.

Потеря герметичности дейдвудного устройства способна привести к тяжелым последствиям. Если уплотнение кормовой трубы полностью выйдет из строя, машинное помещение начнет заполняться водой в случае, когда трюмные насосы не справятся с откачкой поступающей воды. Трюмные насосы предназначены для устранения не полностью вышедшего из строя негерметичного уплотнения. Однако уплотнительная крышка кормовой трубы всегда имеет двойную и даже тройную избыточность, что снижает RRRI на два. Таким образом, индексы риска и риска снижения избыточности для пропульсивной системы могут быть представлены в виде табл. 1.

Таблица 1

RRRI для подэлементов пропульсивной системы [9]

Элементы пропульсивной системы	Индекс частоты (FI)			Индекс тяжести (SI)			Индекс риска	Степень резервирования	RRRI
	Проверка	Обслуживание	Ремонт	Ходкость	Маневрирование	Энергетика			
Крышка цилиндра	4	2	1	4	1	1	8	0	8
Цилиндропоршневая группа	1	2	1	5	1	1	7	0	7
Насосы систем	4	2	2	5	1	5	9	1	8
Турбокомпрессор	4	2	1	5	1	1	9	1	8
Редуктор	3	2	1	5	3	1	8	0	8
Система управления движением	4	2	1	1	3	1	8	0	8
Дейдвудное уплотнение	5	3	3	5	3	5	10	2	8
Рулевое устройство	4	2	1	1	3	1	7	0	7

Данные, аналогичные приведенным в табл. 1, касающиеся вспомогательной установки, приведены в табл. 2. Принимая во внимание то, что в состав судовой электростанции включаются по меньшей мере три источника (один из них аварийный дизель-генератор), двойное резервирование снижает RRRI на два. Каждый из двух дизель-генераторных агрегатов должен быть в состоянии обеспечить необходимую для функционирования судна в ходовом режиме мощность, так что можно считать, что резервирование обеспечивается всегда. Кроме того, на борту всех судов установлены аварийные генераторы. Это означает, что при выходе из строя обеих генераторных установок аварийный генератор будет поддерживать работоспособность жизненно важных для судна систем. Большие нагрузки на судовую электростанцию могут возникать в стояночном режиме при совершении грузовых операций, но в таком режиме может задействоваться береговое питание от портовых сетей, поэтому данное обстоятельство не является проблемой.

Таблица 2

RRRI для вспомогательных двигателей и генераторных установок [9]

Элементы дизельного двигателя	Индекс частоты (FI)			Индекс тяжести (SI)			Индекс риска	Степень резервирования	RRRI
	Проверка	Обслужива- ние	Ремонт	Ходкость	Маневриро- вание	Энергетика			
Вспомогательный двигатель	4	2	2	1	3	3	7	2	5
Топливный насос	4	2	2	1	1	3	7	2	5
Насос смазочного масла	4	2	2	1	1	3	7	2	5
Насос систем охлаждения	2	2	1	1	1	3	7	2	5
Система воздушного пуска	3	2	2	1	1	3	7	2	5
Генератор	2	1	1	1	1	3	7	2	5

Из данных табл. 1 и 2 следует, что существует восемь элементов повышенной опасности. В первую очередь, рассмотрим возможные решения для элементов с высоким уровнем риска. Крышка цилиндра является единственным элементом двигателя повышенной опасности с индексом RRRI, равным восьми, и этот элемент дизельного двигателя невозможно исключить из конструкции. При этом существует способ минимизации последствий возможного развития возникшей аварийной ситуации для того, чтобы трещина или иная причина потеря плотности цилиндра не повлекла за собой вывод двигателя из эксплуатации. Этот способ состоит в дистанционном отключении подачи топлива и прекращении тепловыделения в цилиндре, тем самым обеспечивается значительное снижение уровня возникающих термических и механических напряжений в детали. Такое решение возможно в том случае, когда в конструкции дизельной топливоподающей системы используется система электронного управления впрыском.

Аналогичное решение об отключении цилиндра может применяться в случае выявленного начального разрушения деталей ЦПГ, однако оно может оказаться в ряде случаев недостаточным и мало результативным. Для предотвращения дальнейшего развития и разрешения подобной аварийной ситуации потребуются прекращение движения поршня в цилиндре, что нельзя обеспечить без вмешательства обслуживающего персонала, а, следовательно, проведение такого мероприятия в необслуживаемом машинном помещении АС невозможно.

Еще одним компонентом повышенной опасности в составе пропульсивной установки является редуктор. При выходе из строя этого высокорискованного звена вся пропульсивная установка теряет работоспособность. Единственный способ сделать редукторную передачу избыточной и понизить индекс RRRI — установить дополнительный аналогичный главный двигатель с аналогичным редуктором, т. е. перейти на двухдвигательную двухвальную силовую установку. Однако такое решение избыточности повлечет за собой существенные инвестиционные затраты, вызванные

необходимостью изменения компоновки всего энергетического оборудования, т. е. изменение проекта судна, поэтому такое решение требует глубокого экономического анализа целесообразности.

Другим достаточно эффективным решением рассматриваемой проблемы оказывается изменение принципа электродвижения [10]. Использование в составе судовой энергетической установки нескольких главных дизель-генераторных агрегатов, как это принято при осуществлении данного принципа, существенно повышает надежность установки на основе резервирования. Более того, применение электродвижения позволяет решить дополнительно и одновременно ряд проблем надежности технических средств из состава пропульсивной установки. Так, использование системы АВВ под торговой маркой Azipod предоставляет возможность исключить из рассмотрения рулевые машины, поскольку маневрирование, а также управление судном производится путем изменения азимутальных положений нескольких движителей. Кроме того, при использовании системы отпадают проблемы, связанные с возможными неисправностями дейдвудного устройства, поскольку выход гребного вала осуществляется из погруженной в воду гондолы, и прорыв уплотнения приводит к затоплению только одного двигателя, не вызывая полной потери движения и не ухудшая катастрофически ходовые качества судна. Необходимо отметить, что достаточно схожих результатов можно достичь при использовании нескольких крыльчатых движителей на судне, которые активно продвигает на рынке компания АВВ под торговой маркой Dynafin для мощностей до 4 МВт на один движитель.

В качестве решения проблем, связанных с дейдвудным устройством, помимо перехода на аzipоды, можно рассматривать установку второго комплекта уплотнения с организацией герметичного пространства между ними. Эту проблему также можно решить, установив трюмные насосы, которые обладают достаточной производительностью, чтобы откачать то количество воды, которое может попасть внутрь через разрушенное уплотнение. Для этого потребуется оборудование специальных колодцев, которые способны собирать и удерживать прорывающуюся через разрушенные уплотнения воду. Также можно рассмотреть задействование в составе пропульсивной системы механических аналогов аzipодов — винторулевых колонок, фланец крепления которых находится выше ватерлинии. Это позволит избежать проблемы, поскольку затопление оказывается физически невозможным, однако такое решение может иметь ограничение, поскольку винторулевые колонки в современном судостроении применяются на судах с небольшим водоизмещением и судах вспомогательного флота.

Важно обратить внимание на то, что использование винторулевых колонок, систем Azipod и Dynafin устраняют проблемы достижения приемлемых рисков системы управления движением автономного судна, поскольку ход назад в данной компоновке пропульсивной установки обеспечивается не реверсированием двигателя, а самим движителем. Также в целях снижения рисков системы управления движением автономного судна возможен переход на неререверсируемые двигатели в комбинации с винтом регулируемого шага или задействования реверс-редукторных агрегатов, но такие решения сопряжены с дополнительными рисками применяемых систем.

Элементом с высокой степенью риска, на который необходимо обратить внимание, является турбокомпрессор. Современный дизельный двигатель трудно представить без системы свободного газотурбинного наддува, позволяющей существенно увеличить мощность двигателя и повысить его эффективный КПД. Турбинная часть турбокомпрессора подвержена воздействию высоких температур, что обуславливает проблемы со смазкой и высокими термическими напряжениями как подвижных, так и корпусных деталей. Проточные части турбины агрегата наддува подвержены облитерации твердыми частицами и несгоревшими углеводородами, находящимися в отработавших газах, вызывая разбалансировку системы. Высокая частота вращения ротора турбокомпрессора и указанные факторы существенно сокращают ресурсы работы агрегата наддува по сравнению с ресурсами поршневого двигателя. Поэтому несмотря на то, что работа системы наддува в четырехтактном двигателе не столь критична, выход ее из строя может иметь тяжелые последствия для двигателя, что предопределяет высокий индекс риска. Непосредственное резервирование системы наддува окажется крайне затруднительно ввиду специфики происходящих в ней

газодинамических процессов. При этом в случае аварийного состояния системы можно предусмотреть комбинированную систему наддува с автономным механическим нагнетателем воздуха, как это сделано на всех двухтактных двигателях для поддержания работоспособности на режимах малой мощности.

В представленной выборке вспомогательная энергетическая установка содержит элементы среднего риска. Не всегда оправдано рассматривать такие риски как допустимые, в этой связи уместно рассмотреть возможные решения для этих элементов. В отношении вспомогательных двигателей решения должны быть аналогичные главному двигателю, однако дублирование в данном случае можно исключить из рассмотрения исходя из того, что судовая электростанция включает как минимум два источника (не принимая во внимание аварийный), а, следовательно, резервирование уже заложено в конструкцию. В отличие от главных вспомогательные двигатели имеют в большинстве случаев навесные насосы смазки и охлаждения, приводимые в движение от коленчатого вала. Переход на автономные насосы с электроприводом может быть разумным и надежным решением, а их резервирование, которое в данном случае оказывается бесперебойным, дополнительно повысит надежность систем. В случае использования электронно-управляемых систем топливоподачи Common Rail такое решение возможно также для топливного насоса высокого давления.

Системы запуска вспомогательного двигателя вызывают особую обеспокоенность на фоне систем запуска главного двигателя в связи с тем, что количество запусков дизель-генераторных агрегатов, работающих в автоматическом режиме, многократно превышает количество запусков главного двигателя. Отказ системы одного из двигателей способен повлечь перегрузку работающего агрегата и, как следствие, отключение судовой электростанции. Приемлемым решением в данном случае является дублирование системы запуска за счет использования электро- или гидростартерной системы, как это делается в ряде случаев для аварийного дизель-генератора. При этом важно отметить, что системы стартерного запуска применяются для сравнительно малых размерностей двигателей и это решение может оказаться крайне затруднительным в ряде случаев для агрегатов большой мощности. Единственным опасным механизмом рулевого устройства является привод рулевого устройства, поскольку отказ всех остальных его элементов менее опасен. Привод считается средством средней степени опасности, поскольку без него невозможно управлять рулем, что существенно затрудняет маневрирование.

Рассмотренные на основе предложенной выборки отдельные проблемы слабых звеньев систем и устройств оборудования машинного помещения демонстрируют малую часть задач, которые необходимо решить на пути создания высоконадежных необслуживаемых энергетических установок автономных судов. Как следует из предложенного анализа, решение проблем организации машинных помещений АС может быть достигнуто с использованием различных технических методов, выбор которых должен быть основан, в первую очередь, на анализе экономической целесообразности (в том числе принятия допустимых рисков). Рассмотрение этих аспектов проблемы может служить предметом отдельного исследования.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Готовность к применению современных СЭУ для АС является ограниченной ввиду их высоких рисков безэкипажной технической эксплуатации.
2. Метод разбивки и детализации систем энергетической установки с построением таблицы рисков является действенным инструментом для определения слабых звеньев систем АС. Однако в данном случае возникает проблема отсутствия надежных и доступных статистических баз, без создания которых применение методики оказывается крайне затруднительным.
3. Резервирование следует рассматриваться как одно из наиболее эффективных решений для элементов как высокого, так и среднего риска. При этом существует ряд технологий, способных обеспечить снижение индекса риска без использования дублирования агрегатов систем энергетической установки.

4. Использование принципов электродвижения может оказаться весьма привлекательной перспективой для энергетических установок АС. Такое решение способно исключить многие риски и слабые звенья в пропульсивной установке и системах СЭУ, понижая индекс RRRI.

5. Внедрение систем Azipod и Dynafin, а также винторулевых колонок одновременно позволяют избежать рисков, создаваемых рулевыми машинами, дейдвудными устройствами и системой управления движением судна. При этом применение таких решений потенциально связано с возникновением рисков, специфических для этих систем.

6. Любые решения для элементов систем АС должны приниматься на основе обоснованных рисков с обязательным учетом экономических аспектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: сб. докладов национальной науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 108 с.
2. Watson D. G. M. Practical ship design. Elsevier ocean engineering book series volume 1/ D. G. M. Watson // Elsevier, 2002. — P. 566.
3. Final Report Summary — MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks). 2024 [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>. (дата обращения 05.10.2024).
4. ISO 7967–1:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 1: Structure and external covers. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-1:ed-2:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).
5. ISO 7967–3:2022. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 3: Valves, camshaft drives and actuating mechanisms. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7967:-3:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).
6. ISO 7967–4:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 4: Pressure charging and air/exhaust gas ducting systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-4:ed-2:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).
7. ISO 7967–10:2022 Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 6: Lubricating systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-6:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).
8. ISO 7967–4:2010. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 5: Cooling systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-5:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).
9. Петров А. П. Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов / А. П. Петров, И. И. Костылев, Г. Е. Живлюк // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 1–1(63). — С. 110–122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013. — EDN ADWTCZ.
10. Nuchturee C. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships — A review / C. Nuchturee, T. Li, H. Xia // Renewable and Sustainable Energy Reviews — 2020. — Vol. 134. — Pp. 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.

REFERENCES

1. *Perspektivy bespilotnykh tekhnologij na vodnom transporte*. Sb. dokladov nacional'noj nauch.-prakt. konf. SPb.: Izd-vo. GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018.
2. Watson David G. M. *Practical ship design*. Elsevier ocean engineering book series volume 1. Elsevier, 2002.
3. Final Report Summary — MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks). 2024 Web. 05 Oct. 2024 <<https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>>.
4. ISO 7967–1:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 1: Structure and external covers. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-1:ed-2:v1:en>>.

5. ISO 7967–3:2022. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 3: Valves, camshaft drives and actuating mechanisms. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7967:-3:ed-3:v1:en>>.

6. ISO 7967–4:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 4: Pressure charging and air/exhaust gas ducting systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-4:ed-2:v1:en>>.

7. ISO 7967–10:2022 Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 6: Lubricating systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-6:ed-3:v1:en>>.

8. ISO 7967–4:2010. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 5: Cooling systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-5:ed-3:v1:en>>.

9. Petrov, A. P., I. I. Kostylev and G. E. Zhivlyuk “Otsenka riskov ekspluatatsii energeticheskikh ustanovok bezekipazhnykh sudov.” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 1–1(63) (2024): 110–122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013.

10. Nuchturee, Chalermkiat, Tie Li, and Hongpu Xia. “Energy Efficiency of Integrated Electric Propulsion for Ships — A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020): 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov, Aleksandr P. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru
Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.
Received: Nov. 15, 2024.

DEVELOPMENT PROSPECTS FOR DOMESTIC PROPULSION SYSTEMS OF ARC7 LNG CARRIERS

D. S. Vatolin

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

The relevance of this work stems from the increasing importance of the Northern Sea Route as a strategic artery for commercial shipping, particularly concerning the execution of fuel and energy projects in the Arctic. Since 2022, the reduced participation of foreign companies in these projects has highlighted the necessity of developing domestic key equipment for shipbuilding. This article assesses the prospects for developing and implementing propulsion systems for liquefied natural gas tankers in the Russian Federation. The aim is to identify the essential components of propulsion systems that must be created to successfully realize the construction of Arc7 ice-class gas carriers. To determine viable options for these power plants, a review of existing propulsion systems used on similar LNG carriers is conducted, suitable main engine types for implementation are considered, and potential analogues for the propulsion and steering system are examined separately. Finally, an assessment is made of their positive and negative characteristics, such as efficiency, maneuverability, and implementation prospects. The article also preliminarily identifies enterprises within the Russian Federation that could serve as potential suppliers of key equipment for newly developed marine power plants, many of which are already engaged in Arctic energy resource extraction and export projects.

Keywords: liquefied natural gas, LNG tanker, propulsion system, ship power plant, gas carrier construction technology, propeller-rudder hull, icebreaking capability, gas turbine engine, steam turbine plants, electric power systems.

For citation:

Vatolin, Dmitrii S. "Development prospects for domestic propulsion systems of ARC7 LNG carriers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.1 (2025): 148–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-148-155.

УДК 629.5

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ТАНКЕРОВ-ГАЗОВОЗОВ КЛАССА ARC7

Д. С. Ватолин

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

Актуальность работы обусловлена важностью развития в последние годы Северного морского пути как стратегически значимой артерии торгового судоходства и в особенности реализации топливно-энергетических проектов в Арктике. Отмечается, что начиная с 2022 г. многие зарубежные компании не участвуют в подобных проектах, поэтому в сложившейся ситуации возникает необходимость создания отечественного ключевого оборудования в области судостроения. В обзорной статье рассмотрены вопросы перспектив разработки и реализации на территории Российской Федерации пропульсивных комплексов для танкеров, выполняющих транспортировку сжиженного природного газа. Целью данной работы является исследование недостающих элементов пропульсивных комплексов, которые необходимо создать для успешной реализации проекта по постройке судна-газовоза ледового класса Arc7. Для определения возможных вариантов реализации подобных энергетических установок выполнен обзор существующих пропульсивных комплексов, применяемых на аналогичных танкерах-метановозах, рассмотрены приемлемые для реализации типы главных двигателей, а также отдельно рассмотрены возможные аналоги движительно-рулевого

комплекса. Выполнена оценка их положительных и отрицательных характеристик, таких как коэффициент полезного действия, маневренность и перспективность реализации. Также в статье указаны предприятия, способные выступить в качестве потенциальных поставщиков ключевого оборудования для вновь создаваемых судовых энергетических установок, причем все они находятся на территории Российской Федерации и большая их часть вовлечена в реализацию арктических проектов по добыче и экспорту энергоносителей.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, СПГ-танкер, пропульсивный комплекс, судовая энергетическая установка, технология постройки газозовов, винторулевой корпус, ледопродоимость, газотурбинные двигатель, паротурбинные установки, единые электроэнергетические системы.

Для цитирования:

Ватолин Д. С. Перспективы развития отечественных пропульсивных комплексов для танкеров-газовозов класса ARC7 / Д. С. Ватолин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 148–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-148-155. — EDN IVBWNM.

Введение (Introduction)

В 2019 г. ССК «Звезда» и Samsung Heavy Industries Co. Ltd. (SHI) подписали контракт о совместной постройке 15 судов-газовозов класса Arc7 для проекта «Арктик СПГ-2». Заказчиками газозовов являются ПАО «Совкомфлот» и его совместное предприятие с ПАО «Новатек» — ООО «СМАРТ СПГ». Головное судно будет принадлежать ПАО «Совкомфлот», 14 серийных танкеров — «СМАРТ СПГ».

Одним из наиболее важных элементов СПГ-танкера, который предстоит разработать, является пропульсивный комплекс. К сожалению, последние отечественные исследования в большей степени посвящены корабельным силовым установкам [1]–[3] и в гораздо меньшей — энергетическим установкам гражданских судов [4], [5].

Целью данной статьи является выявление недостающих элементов пропульсивных комплексов, которые необходимо создать для успешной реализации проекта по постройке судна-газовоза. Для этого необходимо выполнить обзор существующих пропульсивных комплексов для газозовов класса Arc7, определить их эффективность и возможность реализации на территории РФ, а также выявить недостающие элементы для разработки наиболее перспективных вариантов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обзор существующих пропульсивных комплексов. В соответствии с первоначальной договоренностью между ССК «Звезда» и SHI строительство газозовов должно было начинаться с изготовления блоков на южнокорейской верфи, транспортировки и сборки в г. Большой Камень с последующей поэтапной передачей технологии постройки от SHI к ССК «Звезда» (рис. 1). В октябре 2021 г. первый корпус судна был доставлен в ССК «Звезда» для финальной достройки. В 2022 г. на территории верфи находилось пять корпусов в разной степени готовности. Тогда же в 2022 г. SHI приостановили свое участие в проекте без расторжения контракта, сославшись на форс-мажорные обстоятельства. После продолжительных переговоров ССК «Звезда» в одностороннем порядке расторгла контракт с SHI на строительство оставшихся десяти танкеров. Помимо этого из проекта вышли американская корпорация General Electric, которая через совместное предприятие с НК «Роснефть» — ООО «Завод ВРК Сапфир» — поставляла винторулевые колонки (ВРК) и немецкий производитель MAN Energy Solutions SE (MAN), поставлявший двухтопливные дизель-генераторы.

На головном судне «Алексей Косыгин» в начале 2025 г. были проведены швартовные и ходовые испытания в открытом море. Первое серийное судно «Петр Столыпин» должно быть передано заказчику в первом квартале 2025 г. Второе серийное судно «Сергей Витте» спущено на воду, но не оборудовано грузовой системой, так как французская компания Gaz Transport & Technigaz (GTT) выдала лицензии на грузовые системы только для двух судов, прежде чем выйти из проекта. В третьем и четвертом серийных судах существует проблема отсутствия грузовой системы и пропульсивного комплекса.

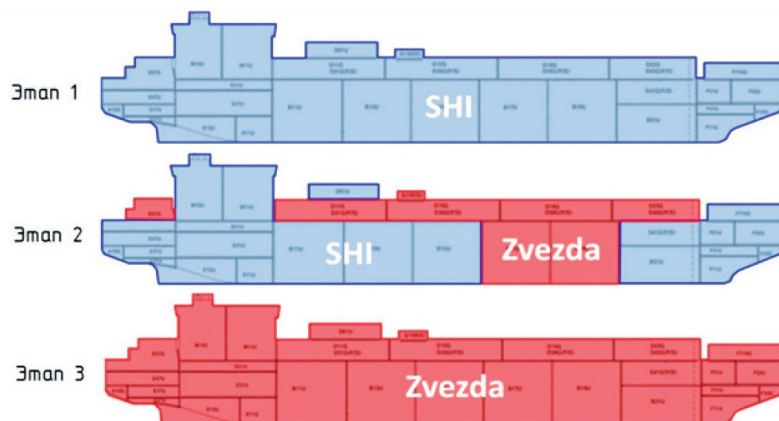


Рис. 1. Поэтапный план передачи технологии постройки судов-газовозов от SHI к ССК «Звезда»
(<https://www.nevainter.com/upload/materials/2021/korea/Samsung%20Heavy%20Industries.pdf>:
дата обращения 05.02.2025)

Указанные обстоятельства отразились на сроках запуска проекта по сжижению и отгрузке природного газа «Арктик СПГ-2»: в декабре 2023 г. была запущена первая технологическая линия по производству СПГ, в апреле 2024 г. завод был остановлен ввиду отсутствия возможности транспортировки груза его покупателям. Это связано с тем, что помимо увеличившихся сроков сдачи газозовов на ССК «Звезда», на неопределенный срок отложена передача шести СПГ-танкеров класса Arc7, построенных на верфи Hanwha Ocean Co., Ltd. (бывшая Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering (DSME)). Компания «Новатек» уведомила клиентов о форс-мажорных обстоятельствах по поставкам сжиженного газа данного проекта.

Выход из российских проектов поставщиков ключевого оборудования (грузовых систем, пропульсивных комплексов и т. д.), а также отсутствие возможности постройки судов-газовозов за рубежом обуславливают необходимость срочной реализации отечественного СПГ-танкера ледового класса Arc7. Реализацией этого проекта занимаются «Крыловский государственный научный центр» (КГЦН) и подразделение Росатома «Атомэнергомаш». Все существующие в настоящее время проекты танкеров-газовозов класса Arc7 оборудованы высоковольтными электроэнергетическими системами (ЭЭС), питаемыми от главных дизель-генераторов и приводящими в действие ВРК (принципиальная схема пропульсивного комплекса приведена на рис. 2).

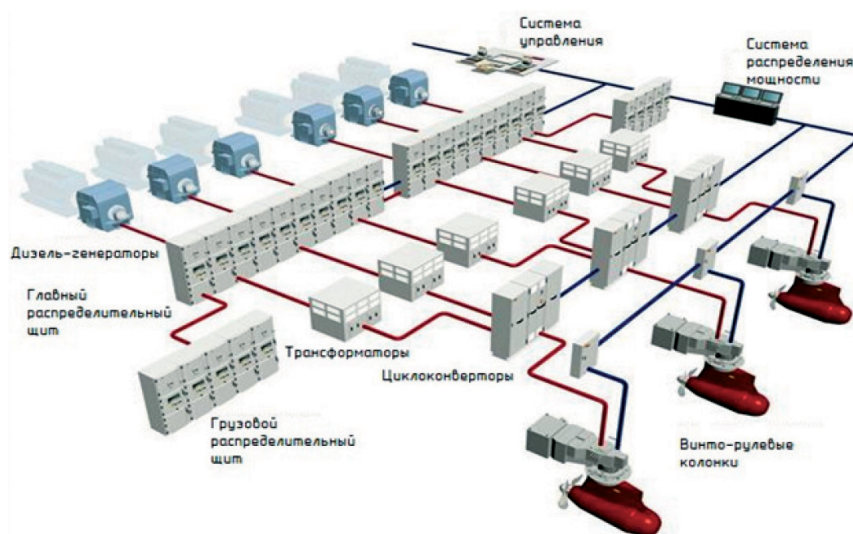


Рис. 2. Принципиальная схема ЭЭС современного арктического танкера-газовоза
(https://www.j-l-a.com/press_releases/abb-wins-order-for-arctic-ice-going-lng-carriers/:
дата обращения 05.02.2025)

Первое поколение газозовов усиленного ледового класса, построенных Hanwha Ocean Co., Ltd, оборудованы тремя ВРК Azipod суммарной мощностью 45 МВт. Второе поколение газозовов класса Arc7, строящееся на этой же верфи, оборудовано также тремя ВРК Azipod суммарной мощностью 51 МВт. Первое поколение арктических газозовов, строящихся на SHI/ССК «Звезда», оснащены тремя ВРК Seajet Pod суммарной мощностью 45 МВт. КПД данных комплексов составляет ~41 % [6].

Данная система электродвижения обеспечивает судам высокую маневренность и ледопроездимость. В условиях тяжелой ледовой обстановки судно имеет возможность развернуться кормой вперед и продолжать движение по заданному курсу за счет специально спроектированной кормовой оконечности и затягивания колотого льда рулевыми колонками под корпус судна. Классический вариант винторулевого корпуса не обладает такими качествами, поэтому существует высокая вероятность повреждения балера руля от наваливания ледовой массы. Кроме того, ледовые сжатия оказывают большее влияние на скорости проводки крупнотоннажных судов с традиционным пропульсивным комплексом, в то время как для крупнотоннажных ледокольно-транспортных судов, оборудованных ВРК, влияние ледовых сжатий будет сопоставимым, а при использовании заднего хода в тяжелых льдах — даже существенно меньшим по сравнению с плаванием под проводкой ледоколов [7].

Варианты движительной части пропульсивного комплекса, доступные для реализации на территории РФ. Совместное предприятие ПАО «Роснефть» и GE ООО «Сапфир» создавалось для сборки и обслуживания (но не производства) электрических ВРК Seajet Pod, поэтому после выхода GE из проекта предприятие лишилось ключевых технологий, необходимых в производстве. По этой причине в рамках ОКР ЭДРК по заказу Минпромторга была создана электрическая колонка меньшей мощности, что позволило специалистам АЭМ и Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) проработать несколько вариантов движительно-рулевого комплекса (ДРК) — рис. 3.

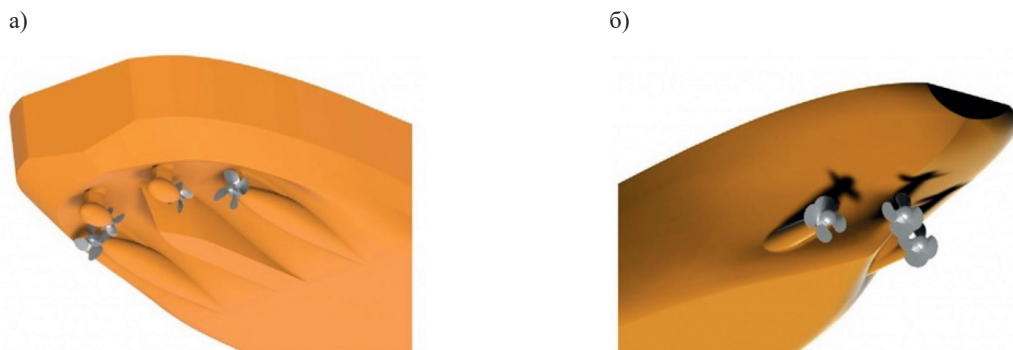


Рис. 3. Варианты винторулевого комплекса:

- а — вариант 1 — комбинированный (две бортовых валопины с ВФШ и две ВРК);
б — вариант 2 — конвенциональный (три валопины с ВФШ и рулевое устройство)
(<https://dzen.ru/a/ZD1a43T4MEPzxvwU>: дата обращения 05.02.2025)

Вариант 1 — комбинированный: два центральных ВРК мощностью ~7,5 МВт в сочетании с двумя бортовыми гребными электродвигателями (ГЭД), оснащенными винтами фиксированного шага (ВФШ) мощностью ~21 МВт.

Вариант 2 — конвенциональный: три гребных электродвигателя оснащенных ВФШ. Однако этот вариант выглядит малоперспективным, так как его ледопроездимость вряд ли сможет обеспечивать круглогодичную навигацию в Арктике без сопровождения атомных ледоколов (а/л), строительство которых в настоящее время замедлилось из-за санкций.

Следует отметить, что также существует полностью локализованное в РФ предприятие по производству ВРК АО «ЦС «Звездочка», которое производит механические винторулевые комплексы с максимальной заявленной мощностью 9 МВт, что в некоторой степени увеличивает возможности комбинирования пропульсивных комплексов.

Единая электроэнергетическая система (ЭЭС) может быть представлена ЦНИИ судовой электротехники и технологии (ЦНИИ СЭТ). Данная система [8] была разработана в рамках импортозамещения при создании головного а/л пр. 22220 «Арктика». В качестве поставщиков гребных электродвигателей (ГЭД) и валовиний с винтом фиксированного шага (ВФШ) можно рассматривать ООО «Русэлпром» и АЭМ-Пропульсия.

Варианты приводов генераторов для единой ЭЭС. Реализация газозовозов с двухтопливными дизельными двигателями на территории РФ на сегодняшний день крайне маловероятна, так как такие производители, как Wartsila и MAN, прервали сотрудничество с российскими компаниями, а альтернатива в виде китайских лицензионных двигателей возможна, но нет гарантии, что Китай сможет производить их серийно. Поэтому необходима проработка альтернативных приводов для генераторов.

Одним из возможных вариантов является применение комбинированной газопаротурбинной установки (рис. 4), в которой отработавшие газы от главного газотурбинного двигателя, приводящего в действие генератор, идут в утилизационный котел, который производит пар для турбогенератора. КПД подобных установок составляет ~38 % [6].

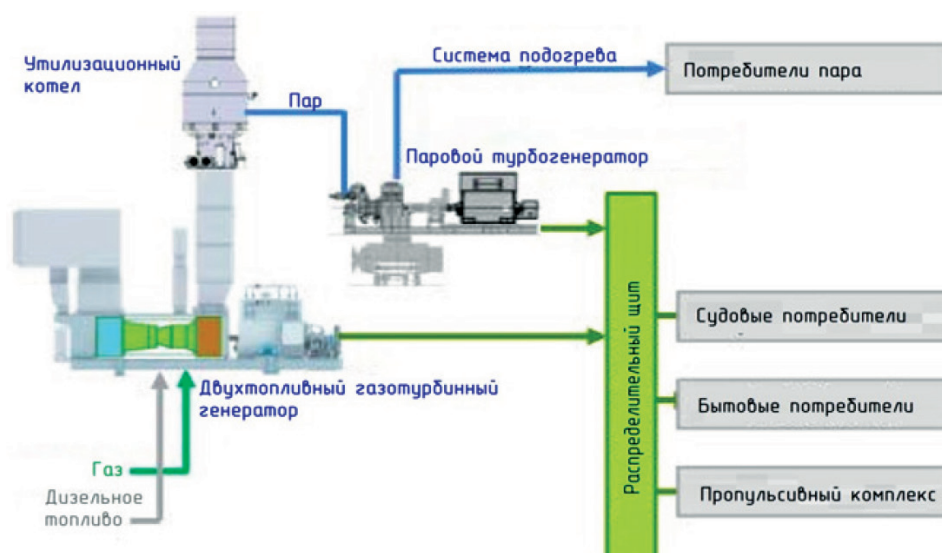


Рис. 4. Комбинированная газопаротурбинная установка
(<https://www.mdpi.com/2411-9660/8/4/66>: дата обращения 05.02.2025)

Наиболее близким по требуемым характеристикам к отечественным судовым газотурбинным двигателям (ГТД) является М90ФР мощностью до 20 МВт, разработанный ОАО «НПО «Сатурн» ПАО «ОДК-Сатурн» [9]. Среди существенных недостатков данного двигателя следует отметить его относительно малый моторесурс — всего 40000 ч, который, вероятно, может быть увеличен за счет уменьшения уровня форсированности двигателя, а также реализации более оптимальных технических решений.

Разработчиками утилизационного турбогенератора могут выступить либо Калужский турбинный завод, либо ПАО «Кировский завод», являющиеся поставщиками главных турбо-генераторов (ГТГ) для отечественных атомных ледоколов. Разработчиком утилизационного котла может выступить АО «Специальное конструкторское бюро котлостроения» («СКБК»).

Помимо эффективности положительным качеством установок данного типа является их компактность. Китайская судостроительная верфь Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co. Ltd. (HZ) получила одобрение American Bureau of Shipping (ABS) для дизайн-проекта СПГ-танкера грузоместимостью 178 000 м³. Объем новой грузовой системы на 4 000 м³ больше, чем у аналогичных судов при идентичных основных размерениях, за счет применения системы COGES (COmbined Gas turbine Electric and Steam) от GE. Также специалисты GE заявляют о том,

что для их системы предусмотрены более низкие операционные расходы по сравнению с дизельными установками.

Однако газотурбогенераторы являются маршевыми двигателями и имеют достаточную надежность только при длительной эксплуатации на постоянной мощности, в то время как основным режимом работы газозова арктического класса является постоянное изменение мощности при активном маневрировании во время ледовой навигации. При таких условиях эксплуатации надежность и моторесурс ГТД резко снижаются. По этой причине наиболее вероятным источником электроэнергии являются главные турбогенераторы (ГТГ) типа ПТУ-72, разработанные для атомных ледоколов, работающих при следующих параметрах слабо перегретого пара: давление — 3,4 МПа, температура — 285 °С [10]. Для данного типа паротурбинных установок АО «СКБК» могут предоставить котлы типа КВГ2МД, производящие пар со следующими параметрами: давление — 3,4 МПа, температура — 300 °С. Примерная схема предлагаемого пропульсивного комплекса приведена на рис. 5.

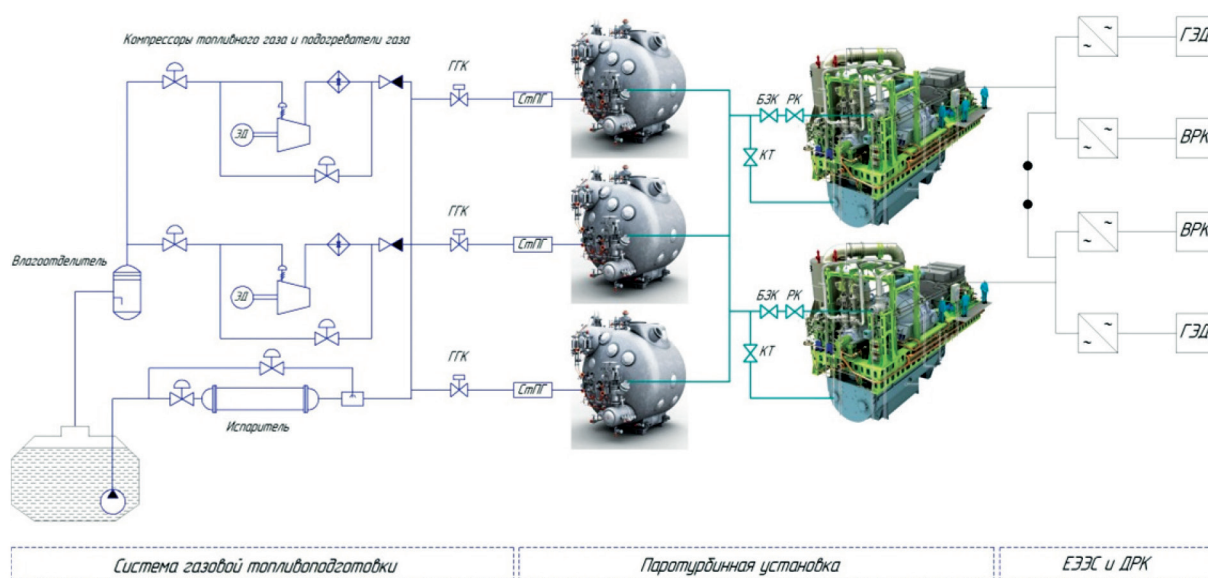


Рис. 5. Пропульсивный комплекс для газозова класса Arc7 на базе ПТУ-72:

СтПГ — станция подготовки газа; ГГК — главный газовый клапан;

БЗК — быстрозапорный клапан; РК — регулирующий клапан; КТ — клапан травления

Суммарная мощность двух ГТГ ПТУ-72 составляет 72 МВт при необходимой мощности ЭЭС проектируемого судна 61,9 МВт (данная мощность предварительно принята по аналогии с существующими газозовами Arc7). Мощность данной ПТУ может быть снижена по аналогии с ГТГ642, разработанными для линейных АЛ пр. 1052 «Арктика» и затем установленными в деформированном варианте под индексом ГТГ642Т на мелкосидящих а/л «Таймыр» и «Вайгач» [11].

Опыт деформировки ПТУ показал, что подобные модификации влекут за собой увеличение скорости эрозионного износа последних ступеней паровой турбины, однако не столь критичного, так как ГТГ642Т находятся в эксплуатации в течение уже почти 35 лет без необходимости замены рабочих лопаток или соплового аппарата. На разработку и реализацию ПТУ пониженной мощности уйдет ~2–3 года, что вполне приемлемо в создавшейся ситуации. Недостатком этого варианта является его низкая экономичность. Ввиду заниженных начальных параметров пара в ПТУ, общий КПД пропульсивного комплекса будет на уровне а/л — ~20 % [10]. По предварительным расчетам, ПТУ будет потреблять около 300 т/ч слабоперегретого пара на максимальной мощности и для того, чтобы удовлетворить потребности судна в паре, потребуется три котла КВГ2МД производительностью 119 т/ч.

Основные характеристики рассмотренных пропульсивных комплексов сведены в следующую таблицу:

Перспективные пропульсивные комплексы

Тип пропульсивного комплекса	КПД	Маневренность	Недостающие элементы	Перспективность реализации
Двухтопливный дизель-генератор в составе ЕЭЭС	До 41 %	Высокая	Главный двухтопливный дизель-генератор	Низкая
Газопаротурбинная установка в составе ЕЭЭС	До 38 %	Низкая	Утилизационный турбогенератор, утилизационный котел	Средняя
ПТУ в составе ЕЭЭС	До 20 %	Высокая	Дефорсированная ПТУ-72	Высокая

Как показывает проведенный анализ, в отсутствии дизель-генераторных установок основной проблемой является поиск компромисса между маневренностью и эффективностью пропульсивного комплекса.

Заключение (Conclusion)

Наиболее перспективной альтернативой недостающим пропульсивным комплексам является паротурбинная установка в составе единой ЭЭС на базе ПТУ-72. Однако КПД данной энергетической установки крайне низок (составляет всего 20 %). Возможным вариантом является постройка судна с опытным пропульсивным комплексом на базе газопаротурбинной установки. Полученный на головном судне опыт эксплуатации комбинированных двигателей позволит в значительной мере повысить возможности конструирования и реализации современных отечественных судовых энергетических установок. Для определения конфигурации движительно-рулевого комплекса необходимо проведение дополнительных модельных испытаний с различными комбинациями ГЭД и ВРК, на основании которых можно определить наиболее перспективный вариант в оптимальном соотношении ресурсозатратность / ледопроеходимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шляхтенко А. В. Тенденции эволюционного развития схемного исполнения энергетических установок многоцелевых надводных кораблей / А. В. Шляхтенко, И. Г. Захаров, В. В. Барановский // Морской вестник. — 2021. — № 3(79). — С. 43–53. — EDN KMIUR.
2. Половинкин В. Н. Оценка целесообразности и способов разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя 5-го поколения / В. Н. Половинкин, В. В. Барановский, Д. Ю. Колодяжный // Судостроение. — 2019. — № 1(842). — С. 11–31. — EDN CAROPZ.
3. Кузнецов Р. В. Обобщение и оценка вариантов перспективных газотурбинных агрегатов и их редукторных передач для нужд отечественного судостроения / Р. В. Кузнецов // Судостроение. — 2022. — № 3(862). — С. 49–52. — EDN PAZZK.
4. Афанасьева С. Ю. Применение аккумуляторных систем в качестве основного источника энергии на судах / С. Ю. Афанасьева, А. В. Кошелев, П. В. Чернев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2024. — № 4(410). — С. 149–162. — EDN JCUVXB.
5. Доржиева Б. С. Главные турбогенераторы для судовых электроэнергетических систем / Б. С. Доржиева, В. Н. Железняк, А. Б. Раднаев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № S1. — С. 118–123. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-118-123. — EDN JFARMF.
6. Kissas N. A Comparative Techno-Economic Analysis of TFDE, ME-GI and X-DF Propulsion Systems for LNG Carriers. Case study for Alternative Multi-Annual Operational Profiles. / N. Kissas, Ch. Papaleonidas, D. Foulfias, D. Lyridis // IAME Conference, Athens, Greece. — 2019. — Vol. 362. — Pp. 1–25.
7. Штрек А. А. Проектные вопросы маневренности и ходкости при ледовых сжатиях перспективных крупнотоннажных судов арктического плавания / А. А. Штрек // Морской вестник. — 2013. — № 4(48). — С. 090–093. — EDN SDUTAJ.

8. Вершинин В. И. Алгоритм управления гребным электроприводом универсального атомного ледокола проекта 22220 / В. И. Вершинин, С. В. Махонин, В. А. Паршиков, В. А. Хомяк // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 4(382). — С. 95–102. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-95-102. — EDN YMBWHP.

9. Никитин В. С. Современное состояние и перспективы развития отечественных газотурбинных энергетических установок / В. С. Никитин, В. Н. Половинкин, В. В. Барановский // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 3(381). — С. 75–90. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-75-90. — EDN ZFUXOR.

10. Кудинович И. В. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения / И. В. Кудинович, А. Ж. Сутеева, В. Г. Хорошев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 4(386). — С. 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106. — EDN VNJZUG.

11. Болгаров С. П. Особенности АЭУ для перспективных ледоколов / С. П. Болгаров, А. В. Воронцов, Л. П. Седаков // Судостроение. — 2003. — № 6(751). — С. 27–31. — EDN HVGJER.

REFERENCES

1. Shlyakhtenko, A. V., I. G. Zakharov and V. V. Baranovskiy. “Tendentsii evolyutsionnogo razvitiya skhemnogo ispolneniya energeticheskikh ustanovok mnogotselevykh nadvodnykh korablye.” *Morskoy vestnik* 3(79) (2021): 43–53.

2. Polovinkin, V. N., V. V. Baranovskiy and D. Yu. Kolodyazhnyy. “Estimating feasibility and development methods of shipboard gas-turbine motor of 5th generation.” *Shipbuilding* 1(842) (2019): 11–31.

3. Kuznetsov, R. V. “Generalization and estimation of prospective gas-turbine units and their reduction gear for the needs of domestic shipbuilding.” *Shipbuilding* 3(862) (2022): 49–52.

4. Afanas'eva, S. Yu., A. V. Koshelev and P. V. Chernov. “Application of storage batteries as primary power source for ships.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(410) (2024): 149–162.

5. Dorzhieva, B. S., V. N. Zheleznyak and A. B. Radnaev. “Main turbogenerators for marine electric power systems.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1 (2023): 118–123. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-118-123.

6. Kissas N., Ch. Papaleonidas, D. Fouflias and D. Lyridis “A Comparative Techno-Economic Analysis of TFDE, ME-GI and X-DF Propulsion Systems for LNG Carriers. Case study for Alternative Multi-Annual Operational Profiles.” *IAME Conference, Athens, Greece* 362 (2019): 1–25.

7. Shtrek, A. A. “Proektnye voprosy manevrennosti i khodkosti pri ledovykh szhatyakh perspektivnykh krupnotonnazhnykh sudov arkticheskogo plavaniya.” *Morskoy vestnik* 4(48) (2013): 090–093.

8. Vershinin, V. I., S. V. Makhonin, V. A. Parshikov and V. A. Khomyak. “Control algorithm for electric propulsion drive of Project 22220 multi-purpose nuclear icebreaker.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(382) (2017): 95–102. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-95-102.

9. Nikitin, V. S., V. N. Polovinkin and V. V. Baranovskiy. “Current status and development prospects of Russian gas turbines.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(381) (2017): 75–90. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-75-90.

10. Kudinovich, I. V., A. Zh. Suteeva and V. G. Khoroshev. “Nuclear power plants for advanced civil marine technology.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

11. Bolgarov, S. P., A. V. Vorontsov and L. P. Sedakov. “Particulars of NPP for prospective icebreakers.” *Shipbuilding* 6(751) (2003): 27–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ватолин Дмитрий Сергеевич —
кандидат технических наук,
Государственный университет морского
и речного флота им. адм. С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: vatolinds@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vatolin, Dmitrii S. — PhD,
Admiral Makarov State university of maritime
and inland shipping
Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vatolinds@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 января 2025 г.

Received: Jan. 14, 2025.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 17. № 1

2025 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 26.02.25. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 19,5. Тираж 500 экз. Заказ № 77/25

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7