

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 16. № 6

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2024. — Т. 16. — № 6. — 186 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 825**

Каретников В. В., Прохоренков А. А., Андреев Ю. Г. Лимитирующие
навигационно-гидрографические факторы при использовании
3D электронных навигационных карт для управления судном
при прохождении шлюзов 825

Галин А. В., Рудный П. С., Галин К. А. Модель оценки параметров
контейнерного терминала методом Монте-Карло 837

Заварзин Р. В., Католиков В. М. Способ определения расхода
донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного
материала 847

Оськин Д. А., Осокина Е. Б., Бочарова В. В. Практическая реализация
параметрической идентификации линейных математических моделей
морских судов по таблицам маневренных элементов 863

Акмайкин Д. А. Результаты испытаний береговой системы
для оптимизации движения морских судов 874

Подпорин С. А., Холопцев А. В. Влияние лесных пожаров
в Якутии на ледовую обстановку на участках судоходных трасс
моря Лаптевых 885

Майоров Н. Н., Язвенко М. Р. Исследование вариантов формирования
данных на основе многосценарного моделирования
для принятия решений при неопределенности по развитию
морского пассажирского терминала 898

Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа
методом сплайновой аппроксимации на векторной
электронной карте 910

Ситов А. Н., Сперанская Я. А., Слищан А. Е. Методика определения
фрахтовых индексов 935

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 946**

Цветков Ю. Н., Баранов С. Г., Фиакистов Я. О. Материалы
и технологии для восстановления изношенных при кавитации лопастей
гребных винтов: история и современное состояние 946

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.

Горбачев М. М., Букин В. Г., Васильев А. В. Экспериментальное исследование влияния свойств моторных масел на уровень крутильных колебаний валопровода судна типа «Ярославец»..... 964

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)..... 974**

Степанов Н. Е., Карлина Е. П., Хоменко Т. В. Разработка испытательного лабораторного стенда с судовым водогрейным котлом 974

Хмельницкий К. Е., Ковалев О. П., Булгаков В. П. Экспериментальное исследование влияния свойств моторных масел на уровень вибрации и шума двигателей внутреннего сгорания..... 983

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 992**

Чертков А. А., Никифоров В. Г. Автоматизация поиска кратчайшего замкнутого пути в транспортной сети средствами MATLAB..... 992

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 825

Karetnikov V. V., Prokhorenkov A. A., Andreev Yu. G. Limiting navigational and hydrographic factors when using 3D electronic navigation charts for ship handling during locks passage..... 825

Galin A. V., Rudny P. S., Galin K. A. Monte- Carlo analysis model for evaluation of container terminal parameters 837

Zavarzin R. V., Katolikov V. M. Method for determining the bed load discharge by the parameter of the average depth of the layer of moving material..... 847

Oskin D. A., Osokina E. B., Bocharova V. V. Practical implementation of parametric identification of linear mathematical models of marine vessels by tables of maneuvering elements..... 863

Akmaykin D. A. Test results of the shore system for optimizing marine vessel traffic 874

Podporin S. A., Kholoptsev A. V. Impact of Yakutia wildfires on ice conditions of parts of the Laptev sea shipping lanes..... 885

Maierov N. N., Yazvenko M. R. Research of data generation options based on multi-scenario modelling for decision-making under uncertainty in the development of maritime passenger terminal 898

Yuyukin I. V. Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart 910

Sitov A. N., Speranskaya Y. A., Slitcan A. E. Methodology for determining freight indices..... 935

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 946

Tsvetkov Y. N., Baranov S. G., Fiaktistov Ya. O. Materials and technologies for rebuilding ship propellers blades damaged under cavitation attack: history and current state 946

Gorbachev M. M., Bukin V. G., Vasiliev A. V. Experimental study of the effect of the properties of motor oils on the level of torsional vibrations of the shaft line of the Yaroslavets type vessel 964

Volume 16. № 6

2024

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).....	974
<i>Stepanov N. E., Karlina E. P., Khomenko T. V.</i> Development of a test laboratory stand with a marine hot-water boiler	974
<i>Khmelnitsky K. E., Kovalev O. P., Bulgakov V. P.</i> Experimental study of the effect of the properties of motor oils on the vibration and noise levels of internal combustion engines.....	983
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	992
<i>Chertkov A. A., Nikiforov V. G.</i> Automating the search for the shortest closed path in transport network by means of MATLAB	992

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836

LIMITING NAVIGATIONAL AND HYDROGRAPHIC FACTORS WHEN USING 3D ELECTRONIC NAVIGATION CHARTS FOR SHIP HANDLING DURING LOCKS PASSAGE

V. V. Karetnikov, A. A. Prokhorenkov, Yu. G. Andreev

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

A vessel is a qualitatively complex movable object, which motion can easily predicted when proceeding in unchanged navigation conditions. When navigation conditions become more difficult prediction of vessel requires the implementation of a complex set of actions to assess the position and parameters of the vessel's motion relative to the limits and directions of the waterway. Lock approaches are characterized by significantly congested conditions and variable dimensions, tortuosity of the waterway, and spatial navigational hazards of complex form, to indicate which floating and land marks are used, organized in complex patterns. Thus, the complexity of navigational and hydrographic conditions has a limiting effect on the navigator's ability to control the vessel. As navigation conditions become more complex, the navigator changes priorities in controlling the vessel motion, gradually shifting from controlling the course of the vessel, to controlling the vessel's speed vector, and then to controlling the motion of the stem and stern. Navigating a vessel in difficult navigational and hydrographic conditions requires periodic clarification of navigational information, for which the navigator turns to the navigational chart, which is a visual source of navigational information. Notwithstanding use of modern aids to navigation to display navigation information, such as, for example, an electronic chart navigation and information system (ECDIS), approaches to locks usually present difficulties when taking into account navigation and hydrographic factors, due to the variability of navigation conditions and the static nature of the navigation equipment system waterway. The use of ECDIS, which enables displaying 3D electronic navigation charts (ENCs) to solve the navigator's tasks enroute lock approaches, is new. The effectiveness of their use in the process of ship handling through locks, which is significant for the navigator, is performed by modern methods in this article.

Keywords: passing locks, navigational safety within lock approaches, 3D electronic navigational charts.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., A. A. Prokhorenkov and Yu. G. Andreev "Limiting navigational and hydrographic factors when using 3D electronic navigation charts for ship handling during locks passage" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 825–836.
DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

УДК 656.628

ЛИМИТИРУЮЩИЕ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ШЛЮЗОВ

В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев

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

Объектом исследования является судно как качественно сложный подвижный объект, движение которого легко поддается учету при неизменности условий плавания. Отмечается, что при усложнении условий плавания для учета и контроля движения судна необходимо выполнение сложного комплекса действий, направленного на оценку местоположения и параметров его движения относительно границ

и направлений водного пути с учетом того, что подходные пути шлюзов характеризуются значительной стесненностью и изменчивостью габаритов, извилистостью водного пути, а также навигационными опасностями, имеющими сложную пространственную форму, для обозначения которых используется плавучее и береговое навигационное оборудование в виде сложных схем. Таким образом, в работе акцентируется внимание на сложности навигационно-гидрографических условий, оказывающих ограничивающее влияние на возможности судоводителя по управлению судном. Рассмотрена особенность работы судоводителя, по мере усложнения условий плавания изменяющего приоритеты в управлении движением судна, заключающиеся в постепенном переходе от управления курсом судна к управлению вектором скорости судна и далее к управлению движением носовой и кормовой оконечностями. Обращается внимание на то, что проводка судна в сложных навигационно-гидрографических условиях требует от судоводителя периодического уточнения навигационной информации с помощью обращения к навигационной карте, являющейся наглядным источником навигационной информации. Подчеркивается, что несмотря на использование современных технических средств судовождения для отображения навигационной информации, таких как электронная картографическая навигационная информационная система, подходы к шлюзам, как правило, представляют сложности при учете навигационно-гидрографических факторов ввиду изменчивости условий плавания и статичности системы навигационного оборудования водного пути. Отмечается, что использование электронной картографической навигационной информационной системы, позволяющей отображать 3D электронные навигационные карты, является новым источником решения задач проводки судна по подходным путям шлюзов. Выполнена значимая для судоводителя оценка результативности использования электронных навигационных карт в процессе проводки судна через шлюзы с применением современных методов.

Ключевые слова: шлюзование судов, навигационно-гидрографические факторы, подходные каналы, элементы подводного рельефа, электронные навигационные карты, управление судном.

Для цитирования:

Каретников В. В. Лимитирующие навигационно-гидрографические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для управления судном при прохождении шлюзов / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 825–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

Введение (Introduction)

Шлюзование — качественно-сложный, пространственно-временной процесс проводки судна по подходным путям шлюза, включающим нижний / верхний бьефы, нижний / верхний подходные каналы, непосредственно заход и выход из шлюза. Пришлюзовые участки вызывают затруднения при проводке судов ввиду сложного механизма гидродинамического взаимодействия корпуса судна как с окружающим водным потоком, так и с элементами подводного рельефа [1]–[3]. Практическое применение методик оценки такого взаимодействия с точки зрения судовождения ограничено ввиду навигационных особенностей общего и частного характера. Осведомленность судоводителя о таких особенностях следует рассматривать как лимитирующий фактор, оказывающий существенное воздействие на возможности судоводителя по управлению судном и тем самым на навигационную безопасность плавания. Каждый из участков имеет свои особенности, которые могут быть отражены на навигационной карте с некоторой степенью подобия. Информационные системы, позволяющие судоводителю получать оперативную информацию о фактических условиях на подходах к шлюзам, не имеют пока широкого распространения [4]. Судоводитель получает знания об особенностях участка проводки судна на основе изучения навигационной карты и теоретических знаний специальных дисциплин, полученных в процессе обучения, которые должны поддерживаться за счет периодического повторного изучения навигационных карт, совершенствоваться и получать новое развитие. Изучение навигационных карт, таким образом, позволяет судоводителю получать знания с учетом изменения навигационно-гидрографических факторов.

Управление судном при прохождении шлюзов осуществляется методом визуальной навигации, когда опознавание навигационных ориентиров, оценка правильности курса судна, определение местоположения судна, оценка параметров его движения и в итоге выработка решений по управлению судном осуществляются на основании информации, получаемой визуально. Ос-

новой визуальной навигации является предварительное изучение района плавания и применение опыта управления судном, полученного при стажировке. Подходы к шлюзам, как правило, представляют сложности при учете навигационно-гидрографических факторов даже при использовании современных технических средств судовождения, таких, например, как электронная картографическая навигационная информационная система (ЭКНИС).

Среди основных качественных преимуществ использования ЭКНИС в судовождении следует выделить интеграцию, автоматизацию и адаптивность работы с навигационно-гидрографической информацией. Несмотря на значительные преимущества в работе, получаемые судоводителем при использовании, ЭКНИС как качественно-сложная техническая система требует строгого соблюдения сложных процедур настройки для получения соответствующей навигационной информации. Некоторые настройки необходимы именно для компенсации недостатков, свойственных стандартным электронным картам, среди которых необходимо отметить следующие:

- низкая пространственно-временная дискретность некоторых видов навигационно-гидрографической информации (например, изобат, глубин);
- отображение полной нагрузки карты, которое приводит к перегруженности, и, как следствие, к сложности чтения карты;
- статичность представления информации по району плавания, приводящая к необходимости соблюдения многоступенчатых алгоритмов для задания соответствующих параметров настроек.

Использование ЭКНИС, позволяющих отображать 3D электронные навигационные карты (ЭНК) для решения задач по управлению судном, является новым техническим способом [5]–[7], поэтому представляется практически важным анализировать особенности выработки навигационной информации за счет новых возможностей, имеющих принципиальные отличия в представлении навигационно-гидрографических факторов, с которыми судоводители сталкиваются при проводке судов через шлюзы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Особенности применения 3D ЭНК для анализа навигационной информации на подходах к шлюзам. При проводке судна на подходах к шлюзам понимание навигационной обстановки формируется на основе наблюдения за местоположением и движением судна относительно знаков навигационного оборудования. Для обеспечения навигационной безопасности проводки судна необходимо понимание положения линии безопасного пути судна в маршрутной системе координат, т. е. по боковому отклонению от до навигационных ориентиров и дистанции до точки поворота. Задача судоводителя состоит в том, чтобы визуально оценивать местоположение судна и параметры его движения как относительно навигационных ориентиров, так и относительно линии безопасного пути. Для этого недостаточно только знания кинематических параметров движения судна, скорости и направления их изменения, необходимо понимать и анализировать основные причины, вызывающие такие изменения. Значение навигационно-гидрографических факторов в процессе обеспечения навигационной безопасности плавания можно оценивать по степени подобия между представлением навигационной обстановки на навигационной карте и обстановкой, наблюдаемой на местности.

Знаки навигационного оборудования, обозначающие ось и кромки подходного пути, выставляются таким образом, чтобы в каждый момент времени в поле зрения судоводителя находилось несколько ориентиров, что позволяет оценить местоположение. Боковое отклонение судна от оси подходного пути непрерывно меняется, при этом амплитуда такого отклонения будет зависеть в том числе от навигационно-гидрографических факторов. При достаточной протяженности прямолинейных участков совокупность знаков навигационного оборудования создает достаточную плотность визуальных полей навигационных параметров для ориентирования, так что при следовании по участку для обеспечения навигационной безопасности плавания достаточно оценивать местоположение судна и корректировать его за счет управления курсом.

Анализ картографических данных на подходах к шлюзам показал сложность опасных изобат, ограничивающих области, которые могут быть использованы для движения судна, обусловленные сложностью геометрической формы, изрезанностью кромок, сужением прямолинейных участков в начале криволинейных, значительными изменениями фактических габаритов криволинейных участков. Фактическое положение опасных изобат, а значит, и области водного пространства, доступные для движения судна, будут меняться в зависимости от фактического уровня воды, т. е. представляют собой динамическую информацию. Сложность формы обуславливает также сложность обозначения кромок знаками навигационного оборудования, среди которых могут быть как плавучие, так и береговые. При ориентировании с использованием нескольких знаков возможны ошибки, которые могут привести к опасности чрезмерного сближения судна с областью недостаточных глубин.

Сравнительный анализ выполнен при следовании судна полным ходом с незначительным углом дрейфа в процессе выхода на прямолинейный участок (рис. 1, а), прохождении судном крутого поворота с резким изменением курса и выходом на прямолинейный участок по инерции (рис. 1, б). Таким образом, на рис. 1 приведены примеры отображения в 3D ЭНК местоположения и параметров движения судна в виде векторов с метками масштаба времени, автоматизированного построения области опасных глубин применительно к осадке судна при фактическом уровне воды. Водное пространство, которое может быть использовано для движения судна, показано градиентной заливкой, что позволяет визуальное оценивать стесненность условий плавания [8].

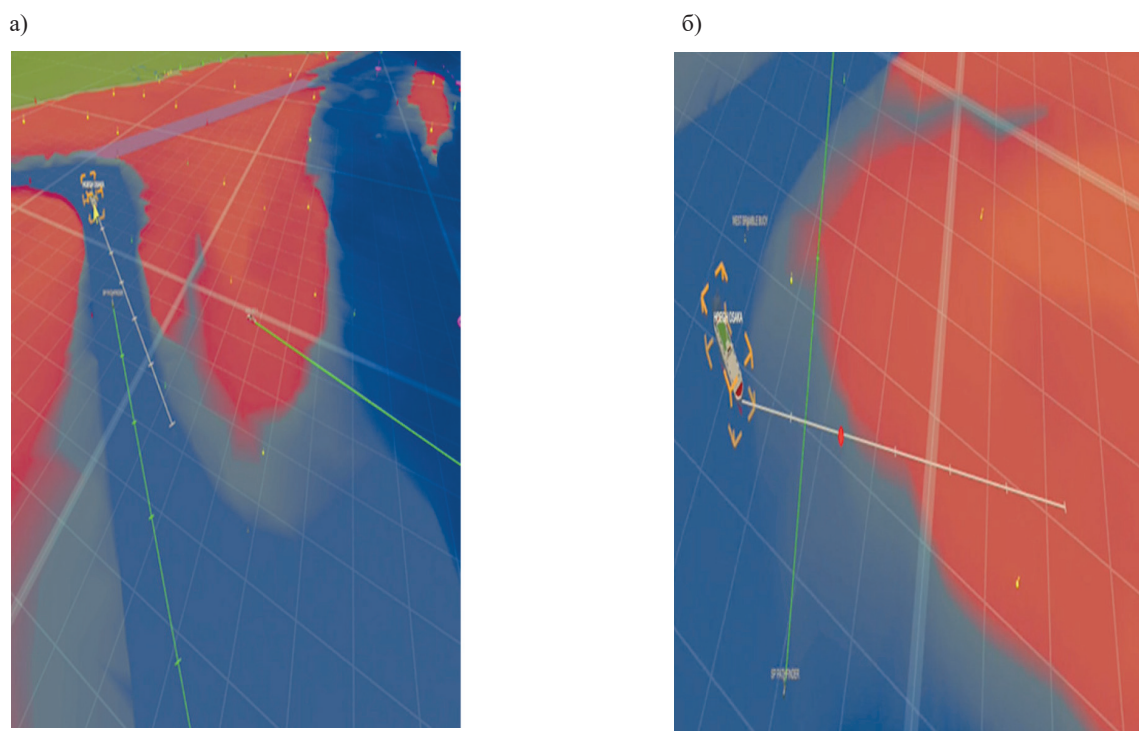


Рис. 1. Фрагмент 3D электронной навигационной карты, отображающей навигационную обстановку:
а — при выходе судна на прямолинейный участок;
б — и выходе судна на прямолинейный участок с большим углом дрейфа

Использование ЭКНИС в режиме отображения 3D ЭНК позволяет судоводителю выполнять навигацию по 3D пространству не только последовательным изменением точки обзора, но и панорамированием, т. е. выполнением одновременного перемещения и масштабирования. Панорамный обзор позволяет визуальное оценивать местоположение и движение судна как относительно знаков навигационного оборудования, так и относительно пространственных навигационных опасностей или их отдельных элементов. Достоверность наблюдаемой (моделируемой картой навигационной ситуации), обеспечивается за счет того, что 3D ЭНК отображают глубины, полученные не методом моделирования, а с учетом фактического состояния уровня воды. При этом высокая точность

информации о глубинах позволяет за счет управления точкой обзора и масштабом оценивать отдельные выступающие формы подводного рельефа, глубины над которыми близки к предельным, а окружающие глубины достаточны, что позволяет оперативно оценивать линию выбранного пути, при необходимости корректируя траекторию движения судна или метод управления рулем. Параллельно с оценкой подводной обстановки можно визуально оценивать дистанции и направления на отдельные навигационные ориентиры либо на несколько ориентиров одновременно, т. е. выполнять детализированную оценку границ и направлений подходного пути.

Изменение направления вектора скорости судна относительно области опасных глубин и одновременно знаков навигационного оборудования информирует судоводителя об эффективности принимаемых мер для следования по линии безопасного пути, а также позволяет оценить действия, необходимые для корректирования фактической траектории движения судна. В условиях плавания, характерных для пришлюзовых участков, управление судном за счет действия руля тесно связано с обеспечением безопасной скорости, поскольку при следовании судна со скоростью, превышающей безопасную, оно будет подвержено чрезмерной рыскливости. При недостаточно точном ориентировании и выполнении корректирующих действий с задержкой это может привести как к зарыскиванию и касанию корпусом судна кромки подходного пути, так и к касанию судном грунта за счет чрезмерной просадки. Для соблюдения судном скоростного режима, обусловленного лимитирующим влиянием уровня воды, необходимо постоянно регулировать работу движителей, что, в свою очередь, обуславливает режим работы органом рулевого управления. При следовании судна по прямолинейным участкам и прохождении вблизи мелей для предотвращения чрезмерного зарыскивания судна за счет гидродинамического взаимодействия с мелководными участками необходимо перекладывать руль на большие углы перекладки и осуществлять предикцию управления рулем.

Особенности применения 3D ЭНК для анализа навигационной информации при следовании в подходных каналах шлюзов. Управление судном как в подходных каналах с ограниченными по ширине габаритами, так и на участках канала, имеющих достаточное пространство для маневрирования, но с минимальным отношением глубины к осадке, представляет сложную задачу для судоводителя. Несмотря на хорошую теоретическую базу выработанные на ее основе рекомендации, получившие практическое применение, имеют обобщенный характер [9], [10]. При проводке судов в подходных каналах, которые характеризуются минимальными навигационными запасами (рис. 2), между корпусом судна и подводным рельефом проявляются взаимодействия гидродинамического характера, оказывающие влияние на способность судна удерживать курс или вызывающие значительную рыскливость. Заблаговременная проработка участков, выполненная в 3D ЭНК, поможет выработать упреждающие действия, т. е. детализировать план будущей проводки судна.

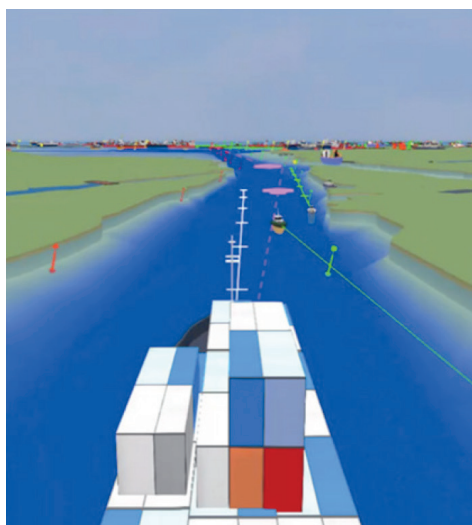


Рис. 2. Пример представления навигационной информации на подходе к шлюзу со стороны нижнего бьефа в 3D ЭНК при положении точки наблюдения на мостике судна

Сложным участком для проводки судна является заход в подходной канал шлюза, поскольку при этом возникают значительные углы сноса от течения, резко снижающие габариты подходного пути. Возникает противоречие, вызванное необходимостью снижения скорости, с одной стороны, и компенсации сноса от течения, с другой. В практике управления судном для обеспечения безопасной скорости нередко приходится сразу после захода в подходной канал следовать по инерции.

При несвоевременном снижении скорости возрастает необходимость резкого вхождения в поворот и в данном случае контроль за изменением вектора скорости судна будет иметь важное значение для своевременного выполнения корректирующих действий. При запоздалом начале поворота стремление точно выйти на середину подходного канала за счет больших переключений руля и включения движителей в работу на большие обороты приводит к значительному росту общего дрейфа, увеличивая поперечное движение кормы. При выходе судна на середину канала важное значение имеет оперативный учет дрейфа судна, который вне зависимости от точности выполнения поворота будет направлен в сторону внешнего борта циркуляции, обуславливая тем самым риск сближения с навигационными опасностями кормовой оконечности судна. При заблаговременном снижении скорости для создания управляющих сил необходимо делать большие углы переключения руля, компенсируя дрейф за счет большего изменения курса судна. Боковое отклонение судна и угол дрейфа будут определять кратчайшие расстояния от корпуса судна до навигационных опасностей и, таким образом, навигационную безопасность плавания. Для достоверной визуальной оценки движения судна необходим учет поперечных составляющих скорости носовой и кормовой оконечности.

В подходных каналах шлюзов, имеющих минимальные габариты, при отсутствии любых внешних воздействий для практики управления судном необходим учет особенностей обтекания корпуса судна водным потоком, который, ввиду стесненности условий, следует рассматривать как течение, вызванное движением судна и имеющее свою инерцию. Когда ввиду гидродинамического взаимодействия корпуса судна с подводным рельефом и кромками наблюдается отклонение судна от курса, судоводитель выполняет переключение руля для прекращения такого отклонения, однако возникающая при этом инерция судна, а также создаваемое движением судна течение, имеющее свою инерцию, усиливают этот эффект и, соответственно, снижают эффективность управления рулем. Повышение точности управления возможно за счет упреждающих переключений руля, выполняемых с учетом новых видов детализированной навигационной информации, полученных по 3D ЭНК:

- расхождение между осью канала, наблюдаемой визуально по знакам навигационного оборудования и условной линией, проходящей в средней части области наибольших глубин;
- положение оконечностей судна относительно кромок криволинейного канала;
- положение оконечностей судна относительно выступающих в направлении оси канала форм подводного рельефа.

Пример оценки навигационной безопасности при следовании судна по правой стороне подходного канала по 3D ЭНК представлен на рис. 3, где показаны как условные линии, обозначающие ось канала и его кромки, так и водное пространство, а также элементы подводного рельефа, расположенные с ближнего к кромке канала борта.

Следование с минимальной скоростью, с одной стороны, увеличивает время для выполнения оценки, а с другой — требует обоснованного и хорошо продуманного выполнения упреждающих действий, поскольку как только произойдут резкие изменения, требующие выполнения эффективного маневра (например, выхода на ось канала по траектории, имеющей минимальную кривизну), движение с работающими на задний ход или неработающими движителями станет фактором, ограничивающим возможности маневрирования. Таким образом, следование судна с минимальной скоростью требует выполнения действий с упреждением для обеспечения навигационной безопасности плавания.



Рис. 3. Пример представления навигационной информации при смещении судна с оси подходного канала шлюза в 3D ЭНК при положении точки наблюдения вне судна

При движении с минимальной скоростью выполнение детализированной оценки пространства между оконечностями судна и кромками криволинейного канала подводными навигационными опасностями выполняется не как возможность усиления контроля, а как необходимая составляющая контроля навигационной безопасности плавания судна. При анализе такого движения следует оценивать не только количество градусов, на которое необходимо изменить курс, полагая, что судно находится на оси канала, но и фактическое поперечное смещение судна под действием внешних и управляющих сил. Ввиду инерционности судна и окружающего водного потока, приводящей к временным задержкам в проявлении суммарного действия факторов, точность их качественной оценки будет иметь приоритет над оценкой количественной точности.

Особенности применения 3D ЭНК для анализа навигационной информации при заходе в шлюз / выходе из шлюза. Выход на ось шлюза может потребовать значительного изменения курса при сохранении минимального поступательного движения вперед или при движении назад. При выполнении таких маневров угловая скорость и угол дрейфа возрастают, что однозначно вызовет трудности при визуальном ориентировании ввиду значительного отличия направления движения судна от направления диаметральной плоскости судна. В этом случае судоводителю важно без промедлений придать судну криволинейное движение с заданными параметрами и своевременно одержать судно, при этом необходимо оценивать дистанции до ближайших опасностей и ориентироваться на перспективу. Примером использования 3D ЭНК для получения навигационной информации в сложных навигационных условиях может служить представленный на рис. 4 фрагмент отображения навигационной обстановки вокруг судна при подходе к точке начала маневра выхода на ось шлюза [11].

Хорошая практика управления судном требует вести наблюдение и управлять судном так, чтобы полностью оценивать обстоятельства и условия плавания. При этом возможности судоводителя для практического ведения наблюдения с учетом лимитирующего влияния навигационно-гидрографических факторов существенно ограничены. Такие ограничения связаны, в первую очередь, с особенностями зрительного восприятия пространственного положения судна, поскольку вести сосредоточенное наблюдение возможно только в ограниченном секторе. Поэтому для полноты оценки ситуации судоводитель систематически переключает внимание с оценки общего движения судна на оценку движения носовой и кормовой оконечностей или с незначительных деталей окружающей обстановки на некоторые резкие изменения. Оценка кинематических параметров движения судна при использовании знаков навигационного оборудования выполняется с определенной ошибкой, величина которой может случайным образом накапливаться при худшем сочетании обстоятельств, что приводит к наблюдению резких изменений, или может

компенсироваться при благоприятных обстоятельствах, так что наблюдаемое движение судна оценивается как плавное.

Выполняя периодический переход от наблюдения общей картины движения судна к наблюдению за движением носовой и кормовой оконечности по отдельности или выполняя наблюдение за движением одной из оконечностей с борта судна либо иной характерной точки на корпусе судна, используя при этом смену точки обзора (рис. 4, а), судоводитель может оценить новую зрительную информацию, упредив таким образом процесс ориентирования. Вывод об информативности наблюдения и оценке местоположения и движения носовой и кормовой оконечностей судна за счет изменения параметров точки обзора и масштабирования при использовании 3D ЭНК можно получить по фрагментам 3D ЭНК, представленным на рис. 4, отображающим, соответственно, выполнение маневров судов при заходе в двухниточный шлюз и выходе из него [11].

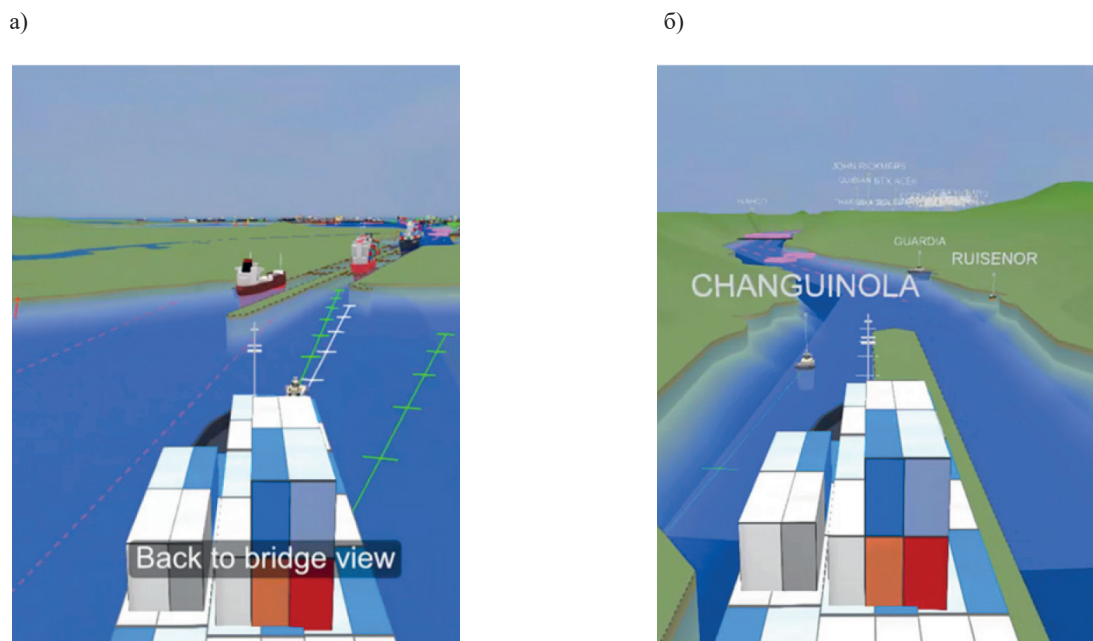


Рис. 4. Пример представления навигационной информации при положении точки наблюдения на мостике судна:
а — на подходе к шлюзу со стороны верхнего бьефа в 3D ЭНК;
б — на выходе из шлюза в сторону нижнего бьефа в 3D ЭНК

Применение современных прикладных программных приложений, позволяющих выполнять математическое моделирование управляемого движения судна, и пошаговый анализ полученных результатов позволяют сделать обоснованный вывод о том, что маневрирование судна на подходах к шлюзу имеет достаточно подробное теоретическое описание и практическое обоснование [8], [9]. Выполнение маневров по заходу в шлюз регламентируется как организационно, так и технически, что создает их видимую однотипность. Подробное фрагментарное рассмотрение каждого из маневров позволяет заключить, что практически каждый заход в шлюз имеет свои отличия как в ориентировании, несмотря на неизменное положение знаков навигационного оборудования, так и в действиях по управлению судном, несмотря на неизменность правил шлюзования.

Действия, выполняемые судоводителем для захода в шлюз, могут быть описаны в виде приведенной последовательности:

- следование с безопасной скоростью;
- визуальная навигация по знакам навигационного оборудования при невозможности ориентирования по гидротехническим сооружениям и конструкциям шлюза;
- визуальная навигация относительно гидротехнических сооружений и стенок камеры шлюза при их четком наблюдении.

Навигация по 3D ЭНК предполагает как ступенчатую смену положений точки глаза наблюдателя (например, с мостика судна, вне судна, ниже / выше ватерлинии), так и гибкую пространственно-графическую подстройку, таким образом, не вызывая необходимости следования многоступенчатым алгоритмам. Такое управление минимизирует время, затрачиваемое судоводителем на ожидание получения навигационной информации, позволяя обращать внимание не только на значительные изменения навигационной обстановки, но и принимать во внимание некоторые нюансы, которые по отдельности могут быть незначительными, но при суммарном воздействии способны оказывать значительное влияние, как положительное, т. е. не требующее дополнительных действий, так и негативное, требующее решительных действий.

Переход от суммарного анализа движения судна к детализированному движению оконечностей судна способствует такому заданию управляющих воздействия, чтобы движения осуществлялись на контролируемом расстоянии от навигационных опасностей с минимальными углами дрейфа, приемлемой точностью следования по оси подходного канала и своевременным выходом на ось камеры шлюза.

Обсуждение (Discussion)

ЭКНИС представляет собой средство судовождения, интегрирующее большинство навигационной информации, находящейся в распоряжении судоводителя, осуществляющего управление судном. Однако при отображении всей информации на стандартных ЭНК проявляется отрицательный эффект интегрирования, связанный с увеличением количества информации, предназначенной для единовременного зрительного восприятия и последующего анализа. Совершенно очевидно, что в условиях лимитирующего влияния навигационно-гидрографических факторов период времени, необходимый для выполнения аналитической работы, а также возможности судоводителя для решения соответствующих задач управления судном будут ограничены.

3D ЭНК отображает картографическую информацию в новом для ЭКНИС пространственно-графическом виде, что применительно к специфике решения задач по управлению судном в условиях лимитирующего влияния навигационно-гидрографических факторов является новым. Такое отображение не вызывает увеличения нагрузки карты и, как следствие, затруднения зрительного восприятия общей навигационной обстановки, включающей все элементы отображаемого картографического изображения как единого целого, так и его частных деталей, формируемых картографическими объектами, имеющими общие качественные признаки. Таким образом, применение 3D ЭНК предоставляет новые возможности для проведения детализированного анализа интересующей области карты.

Анализ специфичной и важной для подходных путей шлюзов информации о глубинах, границах и направлениях подходного пути, знаках берегового и плавучего навигационного оборудования открывает новые функциональные возможности 3D ЭНК:

- выявление геометрических особенностей водного пространства с наибольшими глубинами в функции уровня воды или величины превышения некоторой высотной отметки;
- создание визуального образа пространственной навигационной опасности, интегрированного из множества отличительных глубин;
- определение дифференцированного расстояния между осью подходного канала, обозначенной на карте как прямой, так и радиусной линией, и динамической линией, проходящей в средней части области наибольших глубин;
- определение динамики изменчивости водного пространства между оконечностями судна и кромками криволинейного канала;
- контроль динамики изменчивости кратчайшего расстояния между подводной частью корпуса судна и отдельными выступающими в направлении оси канала формами подводного рельефа.

Достижение целостности оценки обеспечивается количественными характеристиками наблюдения, переходящими в качественные за счет аналитической работы судоводителя с визуальной картографической информацией.

Выводы (Summary)

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ особенностей использования 3D ЭНК применительно с специфическим задачам проводки судна по подходным путям шлюзов, обладающих различными характеристиками, проявляющимися в изменчивости навигационных условий плавания, с одной стороны, и стабильности системы навигационного оборудования, с другой. Данное противоречие предъявляет особые требования к объему знаний, умениям и навыкам судоводителей в процессе работы с навигационными картами для получения как предварительной, так и оперативной навигационной информации.

2. Представление картографической информации в виртуальном пространстве, реализуемое в 3D ЭНК, позволяет устранить недостатки, присущие стандартным ЭНК, давая возможность работать с большими объемами информации благодаря простоте и скорости переключения от единого информационного массива, обладающего целостностью, к отдельным ситуативно значимым фрагментам. Такая функциональность является ключевым фактором предоставления судоводителю полного спектра навигационной информации вне зависимости от специфичности и изменчивости характеристик, свойственных для подходных путей шлюзов, а также может найти применение при организации дистанционного управления флотом [12], [13].

3. Управление представлением навигационно-гидрографических факторов и плотности нагрузки карты, необходимой для их отображения, осуществляется за счет панорамирования, включающего одновременное выполнение навигации и масштабирования 3D пространства, т. е. исключает активирование специальных сложно настраиваемых функций, имеющих ступенчатое управление. Панорамирование позволяет выполнять предварительную проработку любого участка маршрута за счет управления качественными и количественными характеристиками имеющейся навигационной информации, а не использования картографической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыда А. А. Подход к управлению судном по траектории на основе градиента вспомогательной функции / А. А. Дыда, К. Н. Чумакова, И. И. Пушкарёв // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 65. — С. 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125. — EDN G1NHZT.

2. Клементьев А. Н. Методические аспекты исследования гидродинамических полей вокруг корпуса судна при моделировании его движения в стесненных условиях / А. Н. Клементьев, И. В. Липатов, А. Н. Ситнов // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–2(42). — С. 56–62. — EDN IMEWAN.

3. Wang H.-Z. Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock / H.-Z. Wang, Z.-J. Zou // Ocean Engineering. — 2014. — Vol. 88. — Pp. 409–425.

4. Каюда А. В. Разработка контрольно-информационной системы обеспечения безопасности судопропуска / А. В. Каюда, М. А. Колосов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 337–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-337-345.

5. Каретников В. В. Динамика методологии управления судном в узкости при использовании 3D навигационных карт / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, К. И. Ефимов // Морская радиоэлектроника. — 2019. — № 3(69). — С. 44–49. — EDN JTKWVW.

6. Каретников В. В. Использование 3D электронных навигационных карт для предупреждения навигационных аварий судов при прохождении шлюзов на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Н. Лысенко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 537–550. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-537-550. — EDN MXNKEQ.

7. 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.

8. GeoVS Viewer — Hoegh Osaka grounding in Southampton 3-Jan-2015: demonstration video [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vimeo.com/115963050> (дата обращения: 14.10.2024).

9. Vantorre M. Maneuverability in lock access channels. “What’s new in the design of navigation locks?” / M. Vantorre, J. Richter. // 2nd International Workshop, PIANC, New Orleans. 13–14 September 2011. — 2011. — Vol. 2. — Is. 6. — Pp. 1–5.

10. Duarte H. O. Review of practical aspects of shallow water and bank effects / H. O. Duarte, E. L. Drogue, M. R. Martins // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering. — 2016. — Vol. 158. — Pp. 177–186. DOI: 10.3940/rina.ijme.2016.a3.362.

11. SRT plc group, C–Vu® 3D VTS. PPU in Panama Canal — with traffic: demonstration video [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vimeo.com/51063876> (дата обращения: 14.10.2024).

12. Каретников В. В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.

13. Буцанец, А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Артем Александрович Буцанец. — СПб.: ФГБОУ ВО ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2021. — 189 с. — EDN MFMQJR.

REFERENCES

1. A. A. Dyda, K. N. Chumakova, I. I. Pushkarev «Podkhod k upravleniyu sudnom po traektorii na osnove gradienta vspomogatelnoy funktsii.» *Nauchnye problemy vodnogo transporta* 65. (2020.): 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.

2. A. N. Klementev, I. V. Lipatov, A. N. Sitnov “Metodicheskie aspekty issledovaniya gidrodynamiceskikh polej vokrug korpusa sudna pri modelirovanii ego dvizheniya v stesnnykh usloviyakh.” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 4–2(42). (2018): 56–62.

3. Wang, Hong-Zhi, and Zao-Jian Zou. “Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock.” *Ocean Engineering* 88 (2014): 409–425.

4. A. V. Kayuda, M. A. Kolosov “Razrabotka kontrolno-informatsionnoy sistemy obespecheniya bezopasnosti sudopropuska.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 337–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-337-345.

5. V. V. Karetnikov, A. A. Prokhorenkov, K. I. Efimov “Dinamika metodologii upravleniya sudnom v uzlosti pri ispolzovanii 3D navigatsionnykh kart.” *Morskaya radioelektronika* 3(69). (2019): 44–49.

6. V. V. Karetnikov, A. A. Prokhorenkov, Yu. N. Lysenko “Isolzovanie 3D elektronnykh navigatsionnykh kart dlya preduprezhdeniya navigatsionnykh avarijsudov pri prokhozhenii shlyuzov na vnutrennikh vodnykh putyakh.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 537–550. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-537-550.

7. A. A. Prokhorenkov “Povyshenie effektivnosti resheniya zadach upravleniya sudnom v stesnnykh usloviyakh pri ispolzovanii morskikh 3-D elektronnykh navigatsionnykh kart.” *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* 4. (2019): 76–85.

8. GeoVS Viewer — Hoegh Osaka grounding in Southampton 3-Jan-2015: demonstration video. Web. 14 Oct. 2024 <<https://vimeo.com/115963050>>.

9. Vantorre, Marc, and Jan Richter. “Maneuverability in lock access channels.” *What’s new in the design of navigation locks* 2nd International Workshop, PIANC–New Orleans, 13–14 Sept. 2011 2.6 (2011): 1–5.

10. Duarte H. O., Drogue E. L., Martins M. R. “Review of practical aspects of shallow water and bank effects.” *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering* 158 (2016): 177–186. DOI: 10.3940/rina.ijme.2016.a3.362.

11. SRT plc group, C–Vu® 3D VTS. PPU in Panama Canal — with traffic: demonstration video. Web. 14 Oct. 2024 <<https://vimeo.com/51063876>>.

12. V. V. Karetnikov, S. V. Rudykh, A. A. Butsanets “K voprosu razrabotki osnovnykh kontseptualnykh polozhenij sistemy distantsionnogo upravleniya tekhnicheskimi flotom.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2. (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.

13. Bucanec, A. A. Organizaciya sistemy distancionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya obespecheniya sudohodstva na vnutrennih vodnyh putyakh. PhD diss. SPb.: FGBOU VO GUMRF im. admiral S. O. Makarova, 2021.

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: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Прохоренков Андрей Александрович — кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: a.a.prokhorenkov@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru
Андреев Юрий Геннадьевич — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: urgendocent@yandex.ru, kaf_svvp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. — Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Prokhorenkov, Andrei A. — PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: a.a.prokhorenkov@mail.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru
Andreev, Yuri G. — PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: urgendocent@yandex.ru, kaf_svvp@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2024 г.
Received: Oct. 25, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-837-846

MONTE-CARLO ANALYSIS MODEL FOR EVALUATION OF CONTAINER TERMINAL PARAMETERS

A. V. Galin¹, P. S. Rudny¹, K. A. Galin²

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

² St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russian Federation

This paper considers using Monte-Carlo analysis method for evaluation some of the parameters of a container terminal. A high amount of scientific work on this topic is noted in domestic literature. International scientific literature concerning usage of Monte-Carlo method for simulating different parameters of container terminals is also analyzed. We note that foreign authors often use Monte-Carlo analysis as an auxiliary method, for example, for checking results of discrete-event simulation model of a complicated logistical system for adequacy, whereas domestic authors often use Monte-Carlo analysis as a method for direct evaluation of container or other cargo terminals parameters. This study proposes a variant of a model for evaluating the necessary container yard capacity, its area and berth utilization of a container terminal, using Monte-Carlo analysis method. We develop a model based on analytical formulas, where some initial parameters take form of probabilistic distributions, rather than determined values. Such parameters are expected cargo turnover, vessel handling equipment productivity and container dwell times. It should be noted that all these parameters can be preliminarily evaluated by port designers, investors or cargo terminal operators. We show an example of model calculations using Monte-Carlo analysis method and some values of initial parameters. Observed results are adequate for a model of such scope as it shows, for example, that most expected value of berth utilization becomes lower as the number of berths becomes larger.

Keywords: container terminal, throughput capacity, Monte-Carlo analysis, evaluating cargo terminal parameters, probabilistic method

For citation:

Galina, Aleksandr V., P. S. Rudny and K. A. Galin "Monte-Carlo analysis model for evaluation of container terminal parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 837–846. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-837-846.

УДК: 656.6

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А. В. Галин¹, П. С. Рудный¹, К. А. Галин²

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

² ФГБОУ ВО «СПбГЭУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрено применение метода статистических испытаний, также известного как метод Монте-Карло, для оценки некоторых параметров контейнерных терминалов. Отмечается высокий уровень исследования этой темы в современной научной литературе, как отечественной, так и зарубежной. При этом авторы зарубежных исследований чаще используют метод Монте-Карло как вспомогательный инструмент, например, при проверке адекватности дискретно-событийных и имитационных моделей сложных транспортных систем, в то время как авторы отечественных исследований чаще применяют данный метод непосредственно для решения задач, связанных с оценкой параметров контейнерных или других грузовых терминалов. Проанализирована международная научная литература по вопросу использования метода Монте-Карло для оценки и моделирования различных параметров контейнерных терминалов. В настоящем исследовании предложен новый вариант модели оценки потребной вместимости склада, площади складских площадок и коэффициента использования причальной стенки контейнерного терминала с применением метода статистических испытаний. Построена математическая модель

на основе аналитических формул, при этом некоторые исходные параметры заданы не в виде детерминированных значений, а в виде вероятностных распределений. К таким параметрам относятся расчетный грузооборот, производительность оборудования, размещенного на причалах для обработки судов, и средний срок хранения контейнеров. Отмечается, что все эти параметры могут быть в той или иной степени оценены проектировщиками, инвесторами и администрацией грузовых терминалов. Приведен пример расчетов на модели с использованием метода статистических испытаний при определенных заданных исходных данных. Наблюдаются адекватные результаты моделирования, такие, например, как снижение наиболее вероятного значения коэффициента использования причалов с ростом числа причалов, входящих в состав контейнерного терминала.

Ключевые слова: контейнерный терминал, пропускная способность, метод Монте-Карло, показатели грузового терминала, метод статистических испытаний

Для цитирования:

Галин А. В. Модель оценки параметров контейнерного терминала методом Монте-Карло / А. В. Галин, П. С. Рудный, К. А. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 837–846. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-837-846.

Введение (Introduction)

В современных условиях контейнерные перевозки являются одной из приоритетных сфер транспортной отрасли Российской Федерации, поскольку позволяют обеспечивать импорт товаров массового потребления, а также экспорт некоторых видов грузов. Важными звеньями логистических цепочек контейнерных поставок являются грузовые контейнерные терминалы, как морские, так и «сухие» (не имеющие выхода к акватории). Для обеспечения надежной работы отрасли контейнерных перевозок необходимо поддерживать эти элементы инфраструктуры в надлежащем состоянии. Для этого требуется строительство новых и реконструкция некоторых из имеющихся контейнерных портов и грузовых терминалов. Неотъемлемой частью проектирования контейнерного терминала как в рамках нового проектирования, так и в рамках реконструкции, является определение его пропускной способности. Вопросы определения пропускной способности морских портов регламентированы СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹.

Определение пропускной способности, согласно нормам технологического проектирования, выполняется при помощи аналитических формул, полученных на основе исследований, проведенных в середине – конце XX в. Среди методов, применявшихся в этих исследованиях, можно выделить использование теории массового обслуживания (ТМО) и методы статистических испытаний (метод Монте-Карло). Формулы имеют некоторые предпосылки и ограничения, позволяющие использовать их как быстрый, но не очень точный способ оценки пропускной способности грузового терминала. Так, например, в книге [1] отмечается, что точные аналитические решения уравнений ТМО возможны только для двух случаев, имеющих Пуассоновское распределение периодов прибытия судов в порт, а также либо экспоненциальное распределение времени обслуживания судов, либо постоянное время обслуживания судов.

Один из примеров применения метода статистических испытаний (Монте-Карло) для определения параметров проектируемых морских портов приведен в Руководстве². В прил. II данного документа предложен вариант использования метода Монте-Карло применительно к оценке потребности порта в причалах для обработки заданного грузооборота. В современной отечественной литературе применение метода Монте-Карло для определения параметров грузовых терминалов исследовано достаточно подробно. В частности, большая работа была проведена специалистами Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. Так, в статье [2] метод

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 с.

² UNCTAD. Port development. A handbook for planners in developing countries. New York: UN Publications, 1985. 240 p.

Монте-Карло использован для оценки необходимого числа технологических линий, занятых на перегрузке некоторого груза. Отмечается, что несмотря на то, что в результатах исследования уточняются показатели, полученные расчетно-аналитическими методами, они не позволяют оценить последствия временного превышения требований над средними значениями. При составлении расчетной модели цикл технологической операции разделен на некоторое количество отдельных стадий, или «движений», таких, например, как погрузка груза на средство горизонтальной транспортировки, перемещение груза от одного грузового фронта к другому (или в пределах грузового фронта), разгрузка транспортного средства и возвращение средства горизонтальной транспортировки в исходную позицию. При рассмотрении длительности каждой стадии как случайной величины, имеющей некоторое распределение, авторы применяют метод Монте-Карло для генерации случайных значений этих величин, оценки длительности цикла перегрузки груза, и, как следствие, производительности оборудования.

В работе [3] рассмотрены некоторые особенности применения метода Монте-Карло относительно определения потребной вместимости склада. В данном исследовании результаты, полученные с использованием метода Монте-Карло, сравниваются с результатами, полученными графическим методом построения трехмерной поверхности вероятности потребности во вместимости в зависимости от двумерных распределений вместимости расчетных судов и интервалов судозаходов. Сделан вывод о том, что с увеличением количества генераций значений случайных величин (например, при переходе от генерации 1000 результатов методом Монте-Карло к генерации 10000 значений) увеличивается точность проводимых статистических испытаний. Выдвинуто предположение о том, что это может являться косвенным следствием центральной предельной теоремы. В статье [4] рассмотрен пример применения метода Монте-Карло к задаче управления конфигурацией контейнерных штабелей на складе терминала. Применение метода статистических испытаний в этой работе состоит в генерации распределения заданного числа контейнеров по доступным на складе слотам для их хранения. В результате проведения статистических испытаний строятся гистограммы среднего числа движений на каждый контейнер.

Зарубежные исследователи тоже активно используют метод Монте-Карло в научных работах, связанных с морскими портами и грузовыми терминалами. Так, авторы статьи [5] применяют моделирование методом Монте-Карло в рамках вероятностного анализа устойчивости показателей девяти действующих контейнерных терминалов. В исследовании [6] метод Монте-Карло применен для определения оптимального распределения технологических линий (контейнерных перегружателей) и их синхронизации по грузовым фронтам. В указанной публикации ставится задача разработки работоспособной модели, позволяющей оптимально распределять ресурс контейнерного перегружателя, размещаемого на железнодорожном грузовом фронте. Помимо метода статистических испытаний, авторы применяют также имитационное и 3D-моделирование. В статьях [7], [8] выполнено исследование со сложной комбинацией методов дискретно-событийного моделирования (ДСМ), а также методов конечных автоматов и метода Монте-Карло для одновременной оптимизации выделения и составления расписания работ причальных перегружателей, складских перегружателей и движения терминальных тягачей. Метод статистических испытаний в данных работах используется как вспомогательный мета-метод для оценки эффективности предложенных авторами алгоритмов на имеющихся в их распоряжении данных. Разновидность поискового алгоритма, основанного на методе Монте-Карло, предлагается в исследовании [9]. В этой работе метод Монте-Карло используется для решения NP-трудной задачи оптимизации выборки экспортных контейнеров из штабелей.

Целью данного исследования является разработка модели, позволяющей оценивать потребность во вместимости и площади складов, а также коэффициента использования причалов методом Монте-Карло. Сформулированы задачи формирования математической модели в виде набора формул, применения метода Монте-Карло к разработанной модели, проверки результатов моделирования при определенных исходных данных, оценки работоспособности модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предлагаемая модель оценки параметров контейнерных терминалов методом Монте-Карло включает три входных параметра, распределенных по некоторым (произвольным) законам распределения:

1. Расчетный грузооборот контейнерного терминала (Q , тыс. TEU / год). Обычно предположения об этом параметре имеются у заказчика проектирования / реконструкции контейнерного терминала или инвестора;

2. Производительность причального контейнерного перегружателя (P_{STS} , конт. / ч). Этот параметр может быть измерен на действующем терминале при его реконструкции или выбран на основе ежегодно публикуемой статистики, например, UNCTAD Maritime Review или Container Port Performance Index;

3. Средний срок хранения контейнеров на складе (t_{xp} , сут). Этот показатель также может быть измерен на основе статистики действующего контейнерного терминала. Кроме того, администрация действующего терминала может оказывать влияние на этот параметр путем изменения количества бесплатных суток хранения контейнеров на складе и / или изменением размеров тарифов на хранение контейнеров.

Примеры заданных распределений исходных параметров приведены на рис. 1.

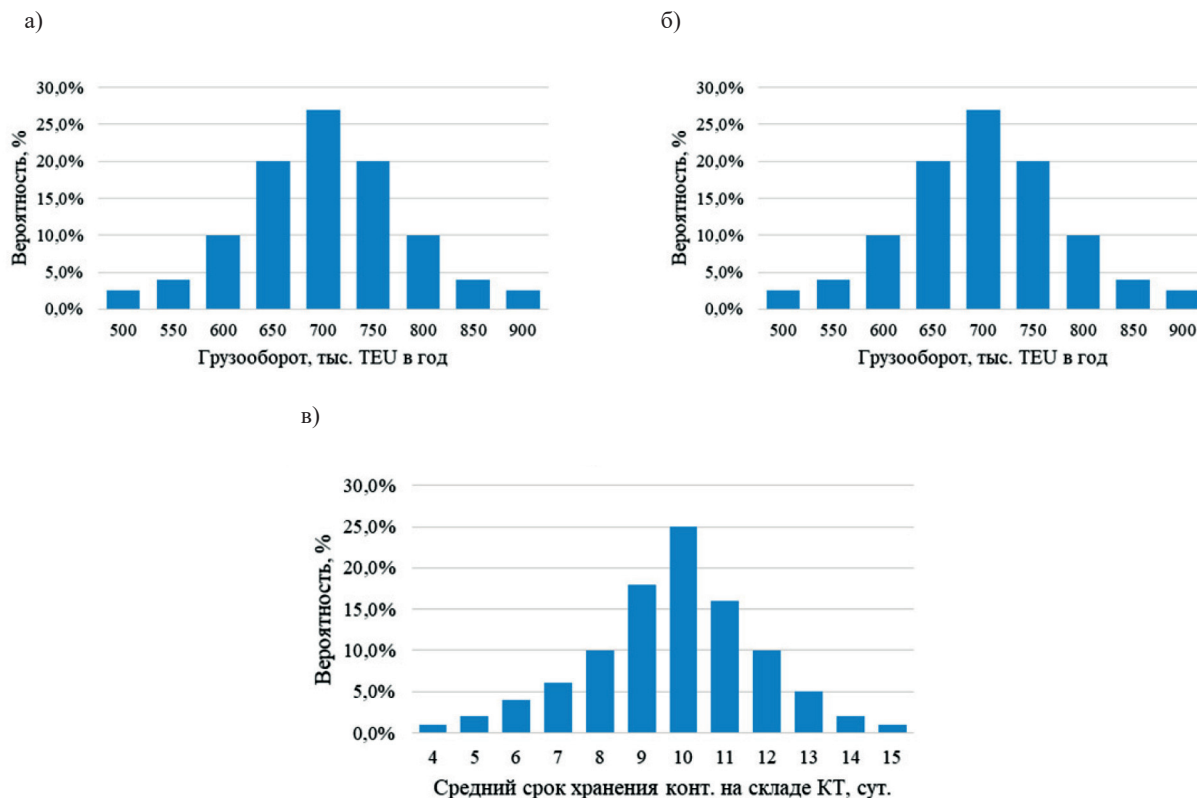


Рис. 1. Примеры распределения случайных величин исходных параметров:

- а — распределение расчетного грузооборота;
б — распределение производительности одной единицы техники;
в — распределение среднего срока хранения контейнеров на складе

Метод статистических испытаний позволяет использовать данные распределения вместо одного predetermined значения расчетной величины. Такой подход лучше отражает реальное положение вещей, в котором заказчик / инвестор / проектировщик не может со 100 %-й вероятностью назвать одно значение ожидаемого расчетного грузооборота, производительности техники или срока хранения контейнеров на складе, однако лицо, принимающее решения, кем бы оно ни являлось в рассматриваемой ситуации, обычно может сказать, какие значения исходных

параметров наиболее вероятны, а какие — почти невозможны. Если на основе анализа грузовой базы заказчиком проектирования сделан вывод о том, что расчетный грузооборот контейнерного терминала составит 700 тыс. TEU в год, в реальности это не означает, что такой грузооборот гарантированно будет обеспечен терминалу. Однако при этом можно с определенной уверенностью утверждать, что маловероятны существенные отклонения от этого грузооборота, т. е. вероятность того, что он будет равен 500 тыс. TEU в год или, наоборот, 900 тыс. TEU в год невелика. Конкретные значения этих вероятностей должны формироваться на основе маркетинговых исследований и опыта инвестора / проектировщика.

Расчетная модель строится на основе следующих формул. Потребная вместимость склада определяется исходя из расчетного грузооборота, среднего срока хранения и бюджета рабочего времени складских площадок в году:

$$E = \frac{Qt_{\text{xp}}}{T_{\text{скл}}}, \quad (1)$$

где Q — расчетный грузооборот, тыс. TEU/год;

t_{xp} — средний срок хранения, сут;

$T_{\text{скл}}$ — бюджет рабочего времени складских площадок в году, сут/год.

Нетрудно заметить, что сразу два из трех расчетных параметров в этой формуле случайными величинами в рамках модели: расчетный грузооборот и средний срок хранения.

Потребная площадь открытых складских площадок определяется по формуле

$$S = \frac{Es_{\text{TEU}}}{r}(1 + k_{\text{зап}}), \quad (2)$$

где E — потребная вместимость контейнерного склада, определяемая по формуле (1);

s_{TEU} — площадь, занимаемая одним контейнером на терминале с учетом максимальной высоты хранения контейнеров, м²;

r — отношение средней высоты хранения контейнеров на складе к максимальной высоте хранения;

$k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса вместимости контейнерного склада.

Один причальный контейнерный перегружатель обеспечивает максимальную суточную интенсивность грузовых работ в соответствии с формулой

$$M_{\text{сутSTS}} = P_{\text{STS}}T_{\text{м/сут}}, \quad (3)$$

где P_{STS} — производительность причального контейнерного перегружателя, конт./ч; задается в виде распределения случайной величины в рамках настоящей модели;

$T_{\text{м/сут}}$ — суточный бюджет рабочего времени морского грузового фронта, ч/сут.

Суточная интенсивность грузовых работ, обеспечиваемая на одном причале, определяется по формуле

$$M_{\text{сутприч}} = M_{\text{сутSTS}}n_{\text{ТЛ}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{сутSTS}}$ — суточная интенсивность грузовых работ одного причального перегружателя, конт./сут (определяется по формуле (3));

$n_{\text{ТЛ}}$ — количество технологических линий на причале, ед. Это значение может быть дробным. Например, при двух причальных перегружателях, работающих на одном причале (следует принимать $n_{\text{ТЛ}} = 1,8$ для учета одновременности работ).

Время стоянки судна у причала определяется по формуле

$$t_c = \frac{24D_c}{M_{\text{сутприч}}} + t_{\text{всп}}, \quad (5)$$

где D_c — судовая партия, т. е. сумма количества контейнеров к выгрузке из судна и количества контейнеров к погрузке на судно, конт.;

$M_{\text{сут прич}}$ — суточная интенсивность грузовых работ на причале, конт. / сут. Определяется по формуле (4);

$t_{\text{всп}}$ — время вспомогательных работ с судами, ч. В это время входит продолжительность швартовых операций при постановке и убытии судна от причала, продолжительность оформления документов, комиссий и других непроизводственных стоянок в рамках одного судозахода³.

Потребность в бюджете рабочего времени причальной стенки определяется в модели по формуле

$$t_{\text{раб. прич}} = \frac{t_c Q}{D_c 24}, \quad (6)$$

где t_c — время стоянки судна у причала, определяемое по формуле (5), ч;

Q — расчетный грузооборот, тыс. TEU в год;

D_c — судовая партия, конт.

Количество причалов $N_{\text{прич}}$ задается в модели пользователем вручную и не является расчетным параметром. Благодаря этому можно оценить, достаточным ли является количество причалов некоторого порта для обработки заданного расчетного грузооборота. Для оценки используется коэффициент использования причалов, определяемый как отношение потребности в бюджете рабочего времени причалов к фактически доступному бюджету рабочего времени причальной стенки:

$$k_{\text{исп}} = \frac{t_{\text{раб. прич}}}{N_{\text{прич}} T_{\text{м. год}}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{раб. прич}}$ — потребность в бюджете рабочего времени, определяемая по формуле (6), сут/год;

$N_{\text{прич}}$ — количество причалов контейнерного терминала, ед.;

$T_{\text{м. год}}$ — годовой бюджет рабочего времени одного причала (должен быть снижен с учетом остановок работ по метеоусловиям).

Выходными оцениваемыми параметрами модели являются:

- потребная вместимость склада (E , тыс. TEU);
- потребная площадь складских площадок (S , тыс. м²);
- коэффициент использования причальной стенки $k_{\text{исп}}$.

Результаты (Results)

В прогонах модели методом статистических испытаний были использованы исходные значения параметров, приведенные в следующей таблице.

Исходные значения параметров

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Бюджет рабочего времени складских площадок в году	$T_{\text{скл}}$	сут/год	365
Площадь, занимаемая одним контейнером на терминале	S_{TEU}	м ²	3,6
Отношение средней к максимальной высоте хранения контейнера	r	—	0,7
Коэффициент запаса вместимости склада	$k_{\text{зап}}$	—	15 %
Суточный бюджет рабочего времени причалов	$T_{\text{м. сут}}$	ч/ сут	22
Количество технологических линий на одном причале	$n_{\text{ТЛ}}$	ед.	1,8
Судовая партия	D_c	конт.	1000
Время вспомогательных работ с судами	$t_{\text{всп}}$	ч	7,5
Количество причалов	$N_{\text{прич}}$	ед.	4, 5, 6
Годовой бюджет рабочего времени одного причала	$T_{\text{м. год}}$	сут/год	310

³ Значения $t_{\text{всп}}$ могут быть подобраны в соответствии с разд. 5.4 «Терминалы, специализированные для контейнеров» или прил. Г СП 350.1326000.2018.

Были выполнены прогоны модели для количества причалов $N_{\text{прич}} = 4, 5, 6$.
Результаты моделирования представлены на рис. 2.

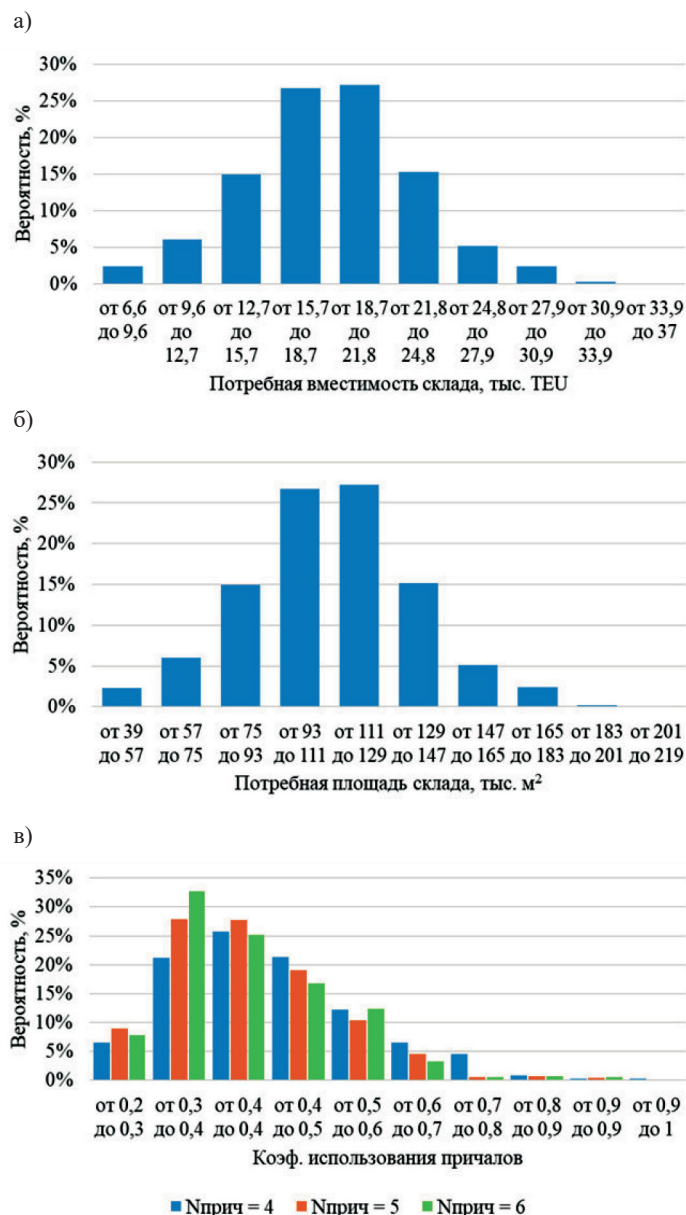


Рис. 2. Результаты моделирования параметров контейнерного терминала методом Монте-Карло:

а — гистограмма потребности во вместимости склада;

б — гистограмма потребности в складской площади;

в — гистограммы использования причальной стенки в зависимости от количества причалов

Результаты моделирования методом Монте-Карло показали, что при заданных значениях и распределениях исходных параметров с вероятностью 92 % потребная вместимость склада не превысит 24,8 тыс. TEU, а потребная площадь складских площадок — 147 тыс. м².

Вероятность того, что коэффициент использования причальной стенки примет значение до 0,6, составляет 87 % в случае четырех причалов, 94 % в случае пяти причалов и 95 % в случае шести причалов.

Обсуждение (Discussion)

При применении метода Монте-Карло в оценке показателей контейнерных терминалов необходимо следить за верной трактовкой результатов моделирования. Гистограммы, представленные

на рис. 2, показывают плотности распределения вероятностей. Например, для оценки вероятности того, что потребная вместимость склада составит до 24,8 тыс. TEU, следует просуммировать вероятности всех предыдущих столбцов гистограммы. Если рассматривается вероятность того, что потребная вместимость составит 21,8–24,8 тыс. TEU, то необходимо выделить только этот столбец. В этом случае значение вероятности составит 15 %. Такие же рассуждения применимы к потребной площади и к коэффициенту использования причалов. Из рис. 2, *а* и *б* видно, что распределения вероятностей потребной вместимости и потребной складской площади практически идентичны. Это связано с заданной линейной зависимостью между данными показателями в рамках модели.

Интересный эффект наблюдается с увеличением числа причалов в модели. При $N_{\text{прич}} = 4$ наиболее вероятные значения коэффициента использования причалов находятся в диапазоне от 0,35 до 0,44 (с вероятностью 26 %). При $N_{\text{прич}} = 5$ коэффициент использования находится с одинаковой вероятностью (28 %) в диапазоне от 0,27 до 0,35 и в диапазоне от 0,35 до 0,44. При $N_{\text{прич}} = 6$ наиболее вероятным (33 %) является диапазон от 0,27 до 0,35. Таким образом, видно, что с ростом числа причалов в модели сдвигается «гребень» волны вероятности с более высоких значений использования причальной стенки к более низким. Это логично, поскольку при прочих равных условиях большее число причалов существенно снижает нагрузку на причальную стенку за счет дополнительных мест для швартовки и обработки судов.

Выводы (Conclusions)

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Метод Монте-Карло, также известный как метод статистических испытаний, активно используется современными исследователями в области работы грузовых терминалов, дополняя инструментарий проектировщика или исследователя в области грузовых терминалов и его применение не является взаимоисключающим для применения других методов, в том числе аналитических формул.
2. Разработана модель оценки некоторых параметров (потребной вместимости склада, потребной площади складских площадок и коэффициента использования причальной стенки) с использованием метода Монте-Карло.
3. Результаты, полученные на основе модели с использованием метода Монте-Карло, подтверждают работоспособность модели. Отмечается, что результаты моделирования с применением метода Монте-Карло должны корректно интерпретироваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agerschou H.* Planning and design of ports and marine terminals. / H. Agerschou — London: Thomas Telford Publishing, 2004. — 444 p.
2. *Изотов О. А.* Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50. — EDN XSRHIT.
3. *Кузнецов А. Л.* Аналитическое уточнение метода статистических испытаний для исследования морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914. — EDN CSBML.
4. *Кузнецов А. Л.* Стратегия управления штабелем контейнерного терминала / А. З. Борович, А. А. Радченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860. — EDN IMDHTM.
5. *Junior I. C. L.* Probabilistic analysis of the sustainable performance of container terminals / I. C. L. Junior, U. R. de Oliveira, V. de Almeida Guimarães, L. G. Ribeiro, V. A. Fernandes // Research in Transportation Business & Management. — 2022. — Vol. 43. — С. 100725.

6. Alali K. Management of Container Terminal Operations Using Monte Carlo Simulation / K. Alali, A. Al-Bazi // *OR55 Annual Conference*. — 2013. — Pp. 115–121.

7. Cahyono R. T. Simultaneous allocation and scheduling of quay cranes, yard cranes, and trucks in dynamical integrated container terminal operations / R. T. Cahyono, S. P. Kenaka, B. Jayawardhana // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2021. — Vol. 23. — Is. 7. — Pp. 8564–8578.

8. Nourmohammadzadeh A. A robust multiobjective model for the integrated berth and quay crane scheduling problem at seaside container terminals / A. Nourmohammadzadeh, S. Voß // *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. — 2022. — Vol. 90. — Is. 7. — Pp. 831–853.

9. Xuan B. Monte Carlo Tree Search algorithm for the receiving containers intelligently problem among container shipping terminals / B. Xuan, N. Zhao, Y. Shen, X. Du // *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. — 2022. — Vol. 22. — Is. 1. — Pp. 89–96.

REFERENCES

1. H. Agerschou [et al.]. *Planning and design of ports and marine terminals*. London: Thomas Telford Publishing, 2004.

2. O. A. Izotov, A. V. Gulyaev “Otsenka trebuemykh tekhnologicheskikh resursov putem statisticheskogo modelirovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.

3. A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov “Analiticheskoe utochnenie metoda statisticheskikh ispytaniy dlya issledovaniya morskikh portov.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914.

4. A. L. Kuznetsov, A. Z. Borevich, A. A. Radchenko “Strategiya upravleniya shtablem kontejnernogo terminala.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860.

5. Junior, I. C. L., de Oliveira, U. R., de Almeida Guimarães, V., Ribeiro, L. G., & Fernandes, V. A. “Probabilistic analysis of the sustainable performance of container terminals.” *Research in Transportation Business & Management* 43 (2022): 100725.

6. Alali, Kareem, and Ammar Al-Bazi. “Management of Container Terminal Operations Using Monte Carlo Simulation.” *OR55 Annual Conference* (2013): 115–121.

7. Cahyono, Rully Tri, Saskia Puspa Kenaka, and Bayu Jayawardhana. “Simultaneous allocation and scheduling of quay cranes, yard cranes, and trucks in dynamical integrated container terminal operations.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.7 (2021): 8564–8578.

8. Nourmohammadzadeh, Abtin, and Stefan Voß. “A robust multiobjective model for the integrated berth and quay crane scheduling problem at seaside container terminals.” *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 90.7 (2022): 831–853.

9. Xuan, Beng, et al. “Monte Carlo Tree Search algorithm for the receiving containers intelligently problem among container shipping terminals.” *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* 22.1 (2022): 89–96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Рудный Павел Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: pavelrudny@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Rudny, Pavel S. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: pavelrudny@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Галин Кирилл Александрович — инженер,
ФГБОУ ВО «СПбГЭУ»
191023, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30/32
e-mail: galin.kirill55@mail.ru

Galin, Kirill A. — engineer
St. Petersburg State University of Economics
30/32 Griboedov canal emb., St. Petersburg,
191023, Russian Federation
e-mail: galin.kirill55@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 28 октября 2024 г.
Received: October 28, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862

METHOD FOR DETERMINING THE BED LOAD DISCHARGE BY THE PARAMETER OF THE AVERAGE DEPTH OF THE LAYER OF MOVING MATERIAL

R. V. Zavarzin, V. M. Katolikov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The object of the study in this paper is the dunes form of transport of bed load in the channels of lowland navigable rivers. An accurate assessment of the bed load discharge is important when considering river morphology, conducting dredging and river regulation works to ensure navigational conditions, as well as when designing various engineering structures. This paper analyzes modern methods for measuring bed load discharge based on dune parameters. Considering the identified shortcomings and limitations of existing measurement methods, a new method for measuring bed load discharge is proposed. A distinguishing feature of the proposed method is the use of the average depth of the layer of moving material when determining bed load discharge. This parameter is defined as the ratio of the area of the moving material to the length of the moving material layer. Essentially, the moving material consists of dunes identified after filtering out minor bottom protrusions. The advantage of this method lies in using of the average depth of the moving material layer, which allows for all the dunes identified in the longitudinal profile to be accounted for when calculating the bed load discharge. The use of areal dune characteristics also enables the determination of bed load discharge in rivers where the bottom relief consists of deficit dunes. To confirm the effectiveness of this method, a series of experiments were conducted in the Channel Laboratory of the State Hydrological Institute in hydraulic flumes with a movable sand bed. The channel bedforms consisted of three-dimensional dunes. The flow regime in the flume was adjusted to replicate conditions typical of lowland navigable rivers. The experiments confirmed that even with the complex three-dimensional structure of the channel bedforms, the proposed method is highly accurate compared to existing methods.

Keywords: bed load discharge, the dunes form of transport of bed load, measurement methods, three-dimensional dunes, experimental studies of bed load transport, deficit dunes.

For citation:

Zavarzin Ruslan V. and V. M. Katolikov. "Method for determining the bed load discharge by the parameter of the average depth of the layer of moving material" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 847–862. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

УДК 556.537

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ ПО ПАРАМЕТРУ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ СЛОЯ ПОДВИЖНОГО МАТЕРИАЛА

Р. В. Заварзин, В. М. Католиков

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

В настоящей работе объектом исследования является грядовая форма движения донных наносов в руслах равнинных судоходных рек. Отмечается, что объективная оценка расхода донных наносов важна при рассмотрении морфологии рек, проведении дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения условий судоходства, а также при строительстве различных инженерных сооружений. В представленной работе выполнен анализ современных методов измерения расхода наносов по параметрам гряд. Учитывая недостатки и ограничения существующих методов измерения, предложен новый метод измерения расхода донных наносов. Отличительной чертой предлагаемого метода является использование параметра средней мощности слоя подвижного материала при определении расхода наносов. Данный параметр является отношением площади подвижного материала к длине слоя подвижного материала. По сути, подвижным

материалом являются донные гряды, выделенные после проведения фильтрации малых выступов дна. Подчеркивается, что преимуществом предлагаемого метода является использование параметра средней мощности слоя подвижного материала, благодаря чему при вычислении расхода учитываются все гряды, выделенные на продольном профиле. Благодаря использованию площадной характеристики гряд становится возможным определение расхода донных наносов в реках с донным рельефом, состоящем из дефицитных гряд. Для подтверждения эффективности данного метода в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института была проведена серия экспериментов в гидравлических лотках с песчаным подвижным дном. Русловой рельеф состоял из трехмерных гряд. Режим течения в лотке был приближен к режиму в руслах равнинных судоходных рек. Исследования подтвердили, что даже при такой сложной трехмерной структуре руслового рельефа применяемый метод является весьма точным по сравнению с другими известными методами.

Ключевые слова: расход донных наносов, грядовая форма, движение наносов, методы измерения, трехмерные гряды, транспорт донных наносов, дефицитные гряды.

Для цитирования:

Заварзин Р. В. Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 847–862. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

Введение (Introduction)

Объективная оценка расхода донных наносов в руслах равнинных судоходных рек важна при выполнении многих практических задач (например, для составления прогноза по переформированиям донного рельефа, для составления плана по улучшению судоходных условий). В частности, корректная оценка величины расхода донных наносов необходима для проведения дноуглубительных и выправительных работ и при строительстве различных инженерных сооружений. Точное измерение расхода донных наносов при их грядовой форме движения остается сложной задачей в особенности в руслах рек со сложным трехмерным рельефом.

В современной практике существует множество методов измерения расхода донных наносов, основанных на использовании параметра, определяющего высоту перемещающейся области руслового рельефа на продольном профиле [1]–[3]. Согласно этому подходу расход донных наносов рассматривается как функция высоты и скорости перемещения гряд. По средним параметрам гряд, определенным на продольных профилях руслового рельефа, находится элементарный расход донных наносов. В этом случае под элементарным расходом подразумевается площадь донных наносов, перемещаемая потоком на вертикали за единицу времени.

Полный расход наносов, осредненный по длине участка реки, находится путем интегрирования элементарных расходов по ширине участка. На основе данного подхода было сформулировано множество конкретных способов определения расхода наносов, различающихся по способу измерения характеристик перемещающейся области руслового рельефа. В настоящей работе выполнен анализ существующих методов измерения. Учитывая найденные преимущества и недостатки существующих методов, предлагается новый метод измерения, основанный на использовании параметра средней мощности слоя подвижного материала. Для проверки точности разработанного метода проведены экспериментальные исследования в гидравлических лотках в Русловой лаборатории ГГИ. Результаты исследования показали высокую точность разработанного метода в условиях, когда русловой рельеф состоит из трехмерных гряд, а режим потока соответствует условиям равнинных судоходных рек.

Задачи данного исследования:

1. Выполнить анализ существующих методов измерения расхода донных наносов, найти в них недостатки и ограничения, которые могут приводить к ошибкам в получаемой величине расхода.
2. Разработать новый метод измерения, учитывающий преимущества и недостатки существующих методов.

3. Выполнить экспериментальную проверку точности разработанного метода измерений расхода донных наносов при режиме потока, приближенном к условиям равнинных судоходных рек.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методы, основанные на использовании высоты гряд в явном виде. В отечественной практике наиболее распространенным является метод, разработанный в Государственном Гидрологическом институте, который представлен в Руководящем документе РД 52.08.163–88. Согласно этому методу высота гряды определяется как разность между высотными отметками гребня гряды и нижнего по течению подваля. Длина гряды определяется как расстояние между гребнями двух соседних гряд. На практике (например, при трехмерном хаотичном характере грядового рельефа) чаще всего параметры гряд определяются по нескольким избранным грядам.

Скорость движения гряд определяется по смещению характерных точек гряд. По гребням нескольких гряд устойчивой продольной формы определяется их среднее смещение за временной интервал между съемками. Для получения скорости гряд расстояние смещения гряд делится на временной интервал между измерениями. Коэффициент формы гряд по умолчанию принимается равным 0,6. Использование коэффициента формы гряд позволяет исключить площадь пустот между грядами и перейти к площади транспортирующихся донных наносов. Итоговый расход наносов рассчитывается по средним значениям высот и скоростям гряд устойчивой продольной формы:

$$q_{\text{эле}} = \alpha h_{\text{г}} C_{\text{г}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{эле}}$ — элементарный расход наносов;

α — коэффициент формы гряд;

$h_{\text{г}}$ — высота гряд;

$C_{\text{г}}$ — скорость смещения гряд.

Недостатком такого метода является неопределенность в выборе измеряемых гряд, приводящая на практике к субъективизму при их выборе. Также постоянный коэффициент формы гряд не позволяет учесть всю сложность строения руслового рельефа. В итоге указанные недостатки приводят к ошибкам в получаемой величине расхода донных наносов.

Другой наиболее известный отечественный метод измерения расхода донных наносов разработан в МГУ А. Ю. Сидорчуком [4] и Н. И. Алексеевским [5], предложившими иерархическую классификацию русловых форм. Согласно их классификации, структура руслового рельефа состоит из пяти типов гряд, расположенных в иерархичном порядке. Расход донных наносов определяется для каждого активного типа гряд по формуле (1). Полный расход наносов получают путем суммирования расходов, полученных для каждого активного типа гряд. Недостатком такого подхода является неопределенность в выборе активных типов гряд. При возможной ошибке в их определении вычисленный полный расход донных наносов может превышать фактический расход в несколько раз. Следует отметить, что в других методах, рассматриваемых в настоящей работе, для определения расхода наносов используются только параметры одного типа гряд. Исходя из этого возникает вопрос о целесообразности использования каких-либо дополнительных типов гряд, кроме донных (по определению ГГИ).

Один из наиболее современных отечественных методов измерений, разработанный А. А. Костюченко [6], характеризуется применением статистических приемов обработки руслового рельефа. Вначале выполняется фильтрация выступов дна. Для этого из профиля исключаются незначительные выступы, мерой значимости служит величина, кратная среднеквадратическому отклонению отметок точек на профиле, определяемому методом последовательных разностей. Высота всех оставшихся на продольном профиле гряд учитывается при расчете их средней высоты. Коэффициент формы определяется для каждого продольника отдельно. Оценка среднего смещения гряд выполняется по характеристикам пространственно-временной корреляции высотных отметок последовательно снятых продольных профилей. Полный

расход наносов на всем участке реки находится путем интегрирования элементарных расходов по ширине участка.

Недостатком этого метода является то, что для выделения гряд на профиле используется величина, кратная среднеквадратическому отклонению. Из научной литературы по теме [7] известно, что высота гряд зависит от характеристик потока на участке реки, тогда как среднеквадратическое отклонение является статистическим параметром, определяемым по массиву измеренных высотных отметок дна. Так, в зависимости от точности измерений (количества измеренных отметок дна на единицу длины продольного профиля) среднеквадратическое отклонение на одном и том же участке реки может иметь разные значения. Таким образом, непредсказуемость среднеквадратического отклонения может приводить к некорректному выделению гряд и в конечном итоге к неточностям в получаемой величине расхода донных наносов.

Среди методов, разработанных за рубежом, известным является метод, описанный в статье Г. Гаумана и Р. Б. Якобсона [8], где высота гряд определяется как разность между уровнем гребня и средним уровнем верхнего и нижнего подвалов. Расход наносов вычисляется по формуле (1) для каждой отдельной гряды. Полный расход донных наносов рассчитывается исходя из средневзвешенных расходов каждой отдельной гряды, при этом весом гряды является ее длина. Недостатком описываемого метода является отсутствие каких-либо конкретных рекомендаций о выборе измеряемых гряд. При субъективном выборе измеряемых гряд расход может быть как завышен, так и занижен относительно фактических значений.

Методы, основанные на использовании иных параметров гряд. По мере широкого распространения современных компьютерных программ и современного оборудования для измерения рельефа русла начали разрабатываться методы, использующие иные параметры гряд для определения расхода донных наносов. В частности, была разработана и исследована методика измерения расхода донных наносов — ISSDOT (Integrated Section Surface Difference Over Time) [9], [10]. Предлагаемый способ основан на сопоставлении последовательно измеренных планов русла и измерении областей размыва гряд. Два 3D плана руслового рельефа разделяются на несколько полос и совмещаются между собой. Далее измеряются объемы размыва напорного склона гряд и между ними находится среднее для каждой полосы.

Расход донных наносов вычисляется по формуле (2), которая является модификацией формулы (1). Скорость гряд представляется как отношение расстояния к времени сдвига. В свою очередь произведение высоты гряд, расстояния сдвига и ширины полосы представляется как объем размыва напорного склона гряд. Вычисление расхода выполняется для полосы заданной ширины. Формула расхода донных наносов приобретает вид

$$Q_{\text{плс}} = a\Delta V / \Delta t, \quad (2)$$

где $Q_{\text{плс}}$ — расход наносов в полосе;

ΔV — объем размыва напорного склона гряд;

Δt — временной интервал между измерениями рельефа.

Коэффициент формы гряды, согласно исследованиям А. Уилберса [11], рекомендуется брать равным 0,57. Полный расход донных наносов на участке реки вычисляется путем суммирования расходов во всех полосах. Недостатком данного способа является то, что при сложном трехмерном строении руслового рельефа корректно измерить объем размыва гряд можно лишь по некоторым избранным грядам, перемещенным на расстояние, не превышающее половину своей длины, тогда как при сложном строении руслового рельефа многие другие гряды перемещаются на расстояние, близкое к их длине или даже превышающее ее. В этом случае измерить объем размыва невозможно. Таким образом, определение расхода выполняется лишь по наибольшим по размеру грядам, что приводит к неоправданному завышению расхода донных наносов.

Еще один метод, применяемый Д. Гауманом и Р. Б. Якобсоном, изложенный в работе [8], заключается в определении высоты гряды по ее площади. Для этого на продольном профиле выделяются подвалы гряд, соединяемые прямыми линиями. Высота гряд вычисляется путем деления площади

гряды над линией подвалов на длину этой линии. В данном случае вместо высоты гряды используется отметка средней линии гряды, и уравнение (1) применяется без коэффициента формы гряды. Скорость смещения гряд определяется по смещению гребней. Тема выбора измеряемых гряд в данном методе не раскрывается.

Перспективным направлением измерения расхода донных наносов является метод, разработанный Ж. А. Ниттруэром, М. А. Эллисоном и Р. Кампанеллой [12]. На плане русла выделяются полигоны размерами порядка нескольких гряд. На каждом полигоне выделяются гряды, на которых измеряется объем аккумуляции наносов. Для определения скорости движения гряд сумма площадей аккумуляции делится на число гряд и ширину полигона. Элементарный расход наносов вычисляется как произведение среднего горизонтального смещения на среднее вертикальное смещение, деленное на время между съемками. Одним из его главных преимуществ является возможность получения картины планового распределения расхода донных наносов по всему участку измерений. Однако выделение точного количества гряд на полигоне может быть затруднено ввиду сложного характера рельефа.

Ограничением в большинстве описанных методов является то, что при русловом рельефе, состоящем из «дефицитных» гряд, их применение становится некорректным. Особенность дефицитных гряд состоит в наличии на продольных профилях между грядами обширной зоны, незаполненной подвижными донными наносами, где расход донных наносов равен нулю. Такой характер транспорта донных наносов в форме «дефицитных» гряд наблюдается в руслах многих судоходных рек, например, в русле р. Невы [13]. Все описанные методы, кроме метода, разработанного Ж. А. Ниттруэром и др. [12], не позволяют учитывать такую особенность строения руслового рельефа. Таким образом, применение описываемых методов в данных условиях может приводить к завышению величины расхода донных наносов.

Некоторые из описанных ранее способов были исследованы экспериментально в рамках работы [1]. На основе экспериментальных данных, полученных в гидравлических лотках, были применены: классический метод ГГИ, метод ISSDOT и метод А. А. Костюченко. В результате было обнаружено, что метод А. А. Костюченко имеет наилучшую точность (ошибка составила 22,25 % и 5,25 % с использованием поправочного коэффициента), тогда как методы ГГИ и ISSDOT имеют ошибки 53,2 % и 40,6 % соответственно. В работе сделан вывод о том, что метод А. А. Костюченко оказался наиболее точным благодаря применению фильтрации малых выступов дна и учету параметров всех гряд, находящихся на продольном профиле.

Большинство описанных методов основано на измерении параметров гряд и скорости их смещения. Итоговый расход наносов при этом считается по средним параметрам гряд (высоте, площади размыва, длине и площади гряд), но часто определение таких параметров бывает затруднено ввиду сложного характера руслового рельефа, где одновременно присутствуют гряды очень разного размера. Из этого следует, что при измерении расхода необходимо проведение специальной фильтрации выступов дна с целью корректного выделения донных гряд. Таким образом, будут учтены все гряды, выделенные на продольниках.

Исходя из выполненного анализа можно сделать вывод о том, что все современные методы измерения расхода имеют те или иные недостатки и ограничения, в результате чего появляется необходимость в разработке нового метода измерения, позволяющего повысить точность измерения расхода. Также необходима разработка метода, позволяющего измерять расход при русловом рельефе, состоящем из дефицитных гряд.

Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала. Данный метод, разработанный в рамках настоящей работы, основан на определении расхода донных наносов исходя из величины средней мощности слоя подвижного материала [14]. Рассмотрим упрощенную схему руслового рельефа, как показано на рис. 1. Согласно этой схеме, русловый рельеф состоит из нескольких гряд разного размера. При этом движущиеся донные наносы (подвижный материал) ограничены сверху линией поверхности гряд, а снизу линией подвалов гряд. Вводится предположение о том, что критерием расхода донных наносов является средняя мощность слоя подвижного материала. Получение этой характеристики осуществляется делением площади всего слоя подвижного материала на длину линии подвалов гряд.

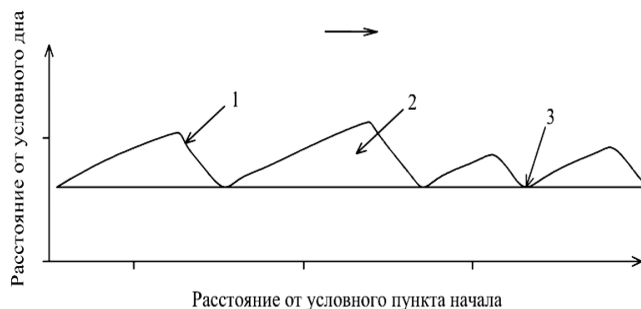


Рис. 1. Упрощенная схема руслового рельефа: 1 — поверхность гряд; 2 — слой подвижного материала (сумма площадей гряд); 3 — подвалья гряд

В данном случае уравнение (1) следует использовать без коэффициента формы гряды, так как средняя мощность подвижного материала исключает область пустот:

$$q_{\text{эле}} = (1 - p)h_{\text{под.мат}} C_{\Gamma}. \quad (3)$$

Для реализации описываемого метода необходимо предварительное измерение рельефа русла реки. Длина измеряемого участка реки должна быть достаточной, чтобы каждый продольный профиль дна русла включал минимум 20–30 гряд. При проведении измерительных работ необходимо руководствоваться стандартными рекомендациями, которые содержатся в РД 52.08.163–88.

Определение расхода донных наносов по разработанному способу можно разделить на несколько этапов. На первом этапе после первичной технической обработки данных примеров руслового рельефа и получения графика продольного профиля производится исключение малых выступов. Для упрощения процесса обработки рельефа дна вводится понятие *выступов на дне*, в которые включаются гряды и малые выступы. Под грядами подразумеваются дискретные русловые образования, в форме которых осуществляется транспорт донных наносов, под малыми выступами — русловые образования, имеющие высоту меньшую, чем гряды.

Для определения границы возможных размеров гряд и малых выступов выделяются и измеряются высоты всех выступов на дне, включая гряды. Затем строится гистограмма распределения выступов по диапазонам их высот (рис. 2). На гистограмме отделяется область малых выступов от области гряд, характерной наличием максимума в первом диапазоне высот, тогда как для области гряд характерно более равномерное распределение количества выступов по диапазонам высот. Область малых выступов начинается с нуля и заканчивается перед диапазоном высот, где количество выступов наиболее близко к количеству выступов в следующих диапазонах высот, т. е. к началу зоны равномерного распределения. Пример выделения областей выступов приведен на рис. 2.

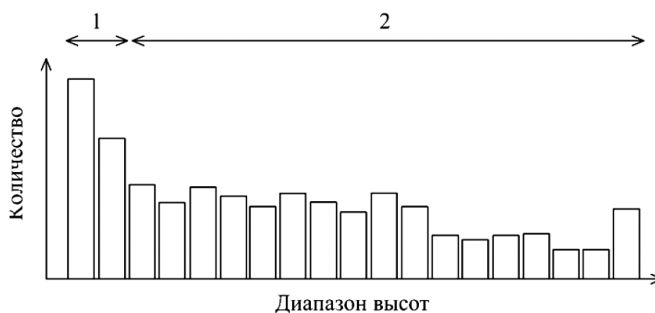


Рис. 2. Пример распределения количества выступов дна по диапазонам высот: 1 — область малых выступов; 2 — область гряд

Далее производится повторное выделение гряд с применением коэффициента фильтрации, позволяющего исключить все выступы, имеющие высоту, меньшую высоты гряд. Коэффициент

фильтрации принимается равным максимально возможной высоте малых выступов. Подвалы выделенных гряд последовательно соединяются. Получившаяся линия называется *линией подвалов*.

На втором этапе измеряется площадь слоя подвижного материала, ограниченная сверху поверхностью гряд, а снизу линией подвалов. Средняя мощность слоя подвижного материала находится путем деления площади слоя подвижного материала на длину линии подвалов:

$$h_{\text{под.мат}} = S_{\text{под.мат}} / L_{\text{под.мат}}, \quad (4)$$

где $h_{\text{под.мат}}$ — средняя мощность слоя подвижного материала;

$S_{\text{под.мат}}$ — площадь подвижного материала;

$L_{\text{лин. под}}$ — длина линии подвалов.

На третьем этапе измеряется скорость движения гряд. В зависимости от качества и количества исходных данных определение скорости гряд может выполняться различными способами. При наличии двух и более последовательно снятых с временным интервалом продольных профилей дна рекомендуется применять ранее известные способы измерения скорости гряд:

1. Измерение скорости смещения гряд на основе ручного измерения на продольном профиле фактического расстояния сдвига гряд за временной интервал с последующим осреднением измеренных скоростей отдельных гряд (аналогично методу, применяемому в ГГИ [5]).

2. Измерение сдвига гряд по характеристикам пространственно-временной корреляции высотных отметок последовательно снятых продольных профилей (аналогично методу А. А. Костюченко [11]). Для этого массив данных промеров представляют в виде табличной функции с равной дискретностью по продольной координате. Затем выполняют расчет значений корреляционной функции для табличных функций двух последовательных промеров по одному и тому же створу. Значение сдвига, соответствующее первому максимуму корреляционной функции, равно среднему смещению донных форм по профилю за период между измерениями. Описание метода приведено в работе [6], на практике он применялся в работах [1], [15], где хорошо себя зарекомендовал. В условиях отсутствия последовательно снятых продольных профилей дна допустимо применение расчетных методов получения скорости движения гряд.

Методика проведения экспериментов. Для подтверждения эффективности предлагаемого способа изменения расхода донных наносов в Руслевой гидравлической лаборатории ГГИ была проведена серия экспериментов по методике, разработанной и многократно апробированной в отделе русловых процессов ГГИ [16]. Важнейшим условием проведения экспериментов является соблюдение динамического равновесия. Согласно методике проведения экспериментов, скоростное поле потока и характеристики русловых форм фиксируются после того, как система «поток — деформируемое дно» достигнет динамически равновесного состояния. Критерием такого состояния является неизменность уклона водной поверхности, равенство расходов наносов, подаваемых в поток, и наносов в конце лотка, а также неизменность размеров русловых форм во времени [16].

Экспериментальные исследования проводились в абстрагированных условиях без моделирования каких-либо конкретных водных объектов. Однако исходя из поставленных задач, режим течения в лотке должен соответствовать режиму течения, наблюдаемому в руслах судоходных равнинных рек. Согласно методике ГГИ, определяющим критерием состояния потока является число Фруда, представляющее собой соотношение кинетических сил в потоке и потенциальных сил. Согласно гидравлической классификации рек, предложенной О. А. Петровской [7], равнинные реки можно разделить на две категории:

- крупные равнинные реки — $Fr < 0,2$;
- малые равнинные реки — $0,2 \leq Fr \leq 0,5$.

Экспериментальные исследования проводились гидравлических режимах, условия которых представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, критерий состояния потока (число Фруда) во всех экспериментах находился в диапазоне 0,30–0,46. Такое значение соответствует условиям на малых равнинных реках.

Таблица 1

Условия экспериментов в 100- и 8-метровом гидравлических лотках

Место эксперимента	Номер эксперимента	Q , л/с	$H_{\text{пот}}$, см	$V_{\text{ср}}$, см/с	Fr	t , мин *
100-метровый лоток	1	35,0	10,0	34,8	0,35	584
	2	55,0	15,0	36,7	0,30	655
	3	45,0	12,5	36,3	0,33	630
8-метровый лоток	4	2,9	4,5	28,2	0,42	312
	5	3,5	5,5	22,9	0,31	217
	6	4,4	5,7	33,2	0,44	170
	7	6,0	6,6	36,7	0,46	143
	8	5,7	8,0	29,0	0,33	83
	9	3,3	6,0	26,4	0,34	520

*Время эксперимента без учета времени формирования донного рельефа.

В качестве донного материала был использован песок, гранулометрический состав которого приведен в табл. 2. При заданных гидравлических условиях эксперимента обеспечивалось движение всех фракций донных наносов.

Таблица 2

Гранулометрический состав донных наносов

Место эксперимента	$d_{10\%}$, мм	$d_{50\%}$, мм	$d_{90\%}$, мм	$d_{90\%} / d_{10\%}$
100-метровый лоток	0,15	0,29	0,68	4,53
8-метровый лоток	0,12	0,15	0,25	2,08

На подготовительном этапе эксперимента в гидравлический лоток с ровным песчаным дном подается необходимый расход воды. Во время этого этапа песчаное дно лотка трансформируется и формируются гряды. Одновременно определяется положение задвижки в нижней части лотка, необходимое для обеспечения условий динамического равновесия потока и песчаного дна. По окончании подготовительного этапа и достижения условия динамического равновесия по всей длине рабочего участка лотка образовались трехмерные гряды (рис. 2).

Для измерения грядового дна и скорости потока были использованы измерители Vectrino, основанные на использовании доплеровского способа измерения скорости и расстояния. Данные инструменты хорошо подходят для использования в лабораторных условиях, а также имеют высокую точность [17].

а)



б)



Рис. 3. Сформировавшийся грядовый рельеф дна:
а — эксперимент 1; б — эксперимент 2

В 100-метровом лотке измерения рельефа проводились по девяти продольным створам, расположенным по ширине лотка на расстоянии 10 см друг от друга, длина каждого створа составила 6 м. Каждый створ измерялся 4 раза с временным интервалом в эксперименте № 1 — 15 мин, в экспериментах № 2 и 3 — 27 мин. В экспериментах № 4–9 измерялись три продольных профиля, расположенные на равном расстоянии по ширине лотка, интервалы составляли 30 мин. Одновременно выполнялась фото- и видеосъемка механизма движения донных наносов по поверхности грядового дна (рис. 3).

Для получения фактического расхода донных наносов после окончания экспериментов измерялось количество песка, вынесенного за пределы рабочего участка. Получение картины распределения расхода наносов по ширине 100-метрового лотка достигалось путем деления выноса песка на 10 участков (струй), по 10 см каждая по ширине лотка. Далее объем выноса делился на длительность эксперимента. Таким образом, объемным методом измерялся эталонный (фактический) расход донных наносов. Полный расход наносов был получен путем суммирования расходов всех струй. В случае экспериментов в 8-метровом лотке вынос песка измерялся сразу по всей ширине лотка.

Результаты (Results)

На рис. 3 приведен грядовый рельеф дна, наблюдавшийся в условиях первого эксперимента. На выполненных фотографиях дна видно, что структура полученного руслового рельефа весьма хаотична. В большинстве случаев гряды имеют криволинейную плановую форму. Часто встречаются гряды, гребни которых наползают друг на друга, что приводит к формированию гряд с несколькими гребнями.

Наблюдения за движением наносов во время экспериментов показывают, что частицы песка под действием потока воды движутся по напорному склону гряды, где формируется транзитный слой наносов. В таком слое песка частицы перемещаются, перекачиваясь до гребня гряды, где наиболее мелкие частицы продолжают движение сальтацией и переносятся потоком на напорный склон нижерасположенной гряды, а крупные частицы сваливаются в подвалье. Такой характер движения донных наносов наблюдался во всех экспериментах.

Наиболее длительные эксперименты проводились с перерывами. После каждой остановки подачи воды проводились измерение выноса песка. Итоговая величина расхода была получена путем осреднения результатов измерений нескольких этапов эксперимента. Измерения проводилось без высушивания и взвешивания. Таким образом, они отражают расход наносов в рыхлом теле. Результаты измерений расхода донных наносов объемным способом приведены в табл. 3 для экспериментов № 1–3 и в табл. 4 для экспериментов № 4–9.

Таблица 3

Расход донных наносов, полученный объемным методом в экспериментах № 1–3

В, см	Номер продольника	Номер эксперимента					
		1		2		3	
		$Q = 35 \text{ л/с}, h = 10 \text{ см}$		$Q = 55 \text{ л/с}, h = 15 \text{ см}$		$Q = 45 \text{ л/с}, h = 12,5 \text{ см}$	
		$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
0	—	1,82	30,51	3,17	28,71	4,26	48,59
10	1	2,40		3,09		4,48	
20	2	2,86		3,24		4,59	
30	3	3,72		3,25		5,04	
40	4	4,02		3,35		5,15	
50	5	4,02		3,36		5,37	
60	6	3,66		3,40		5,19	
70	7	3,25		3,27		5,04	
80	8	2,72		3,22		4,85	
90	9	2,04		3,20		4,63	
100	—						

Таблица 4

Расход донных наносов, полученный объемным методом в экспериментах № 4–9

Номер эксперимента	Условия экспериментов	$Q_{\text{эталон}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
4	$Q = 2,9 \text{ л/с}, H = 4,5 \text{ см}$	3,05
5	$Q = 3,5 \text{ л/с}, H = 5,5 \text{ см}$	2,16
6	$Q = 4,5 \text{ л/с}, H = 5,7 \text{ см}$	3,64
7	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	6,92
8	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	2,06
9	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	0,75

Приведенные результаты измерения расхода донных наносов по фактическому выносу песка являются эталоном. Далее в работе для определения точности результатов измерений с использованием разработанного метода будет выполнено сравнение с результатами измерений по эталонному методу.

Измерение расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала. Вначале исходный ряд данных подвергается обработке с целью выделения подвалей гряд. Для этого выделяются и измеряются высоты всех выступов на дне. По полученным данным строится гистограмма распределения выступов по диапазонам их высот (рис. 4). На приведенной гистограмме видно, что первый максимум количества выступов находится в диапазоне высот 0–0,2 см. В диапазоне 0,2–0,4 см количество выступов меньше, чем в предыдущем, но при этом оно не соответствует среднему количеству выступов в следующих диапазонах. Начиная от 0,4 см и заканчивая 2,4 см наблюдается наиболее равномерное распределение. В диапазонах 2,4–3,6 см наблюдается еще одна характерная область высот, в которой количество выступов в половину меньше, чем в предыдущей области. Далее в диапазонах, следующих за 3,6 см, количество выступов постепенно уменьшается.



Рис. 4. Распределения выступов по диапазонам высот (эксперимент № 2)

Анализируя представленные данные, можно заметить, что выступы в диапазоне 0–0,40 см имеют нехарактерное для следующих диапазонов распределение. Такое количество выступов в соответствующих диапазонах является следствием трехмерности гряд. Во время эхолотирования на продольный профиль помимо гряд неизбежно попадает большое количество периферийных (боковых) частей гряд, расположенных в отдалении по ширине от измеряемого профиля. При этом чем меньше высота периферийной части гряды, тем на большее расстояние по ширине она может распространяться и тем самым большее количество таких периферийных частей гряд будет попадать в минимальные диапазоны высот.

Кроме того, практика измерений показывает, что чем больше точность измерений (количество отметок на единицу длины), тем большее количество выступов оказывается в наименьших

диапазонах. Учет этих выступов при расчете средней высоты гряд приводит к неоправданному занижению искомой средней высоты гряд. Исходя из этого для получения корректной величины средней высоты гряды необходимо выделять гряды с использованием фильтрации. В ходе выделения гряд на продольниках в эксперименте № 2 выполнялось повторное выделение гряд с исключением малых выступов, имеющих высоту менее 0,4 см.

В экспериментах № 1 и 3 также было выполнено исключение выступов с высотами в среднем менее 0,3–0,4 см, в экспериментах № 4–9 выполнена фильтрация выступов в среднем менее 0,2–0,3 см. Далее проводилась линия, соединяющая подвалы гряд. С полученного графика снималась площадь слоя подвижного материала, ограниченная сверху линией поверхности гряд, снизу — линией подвалов гряд (рис. 5). Средняя мощность слоя подвижного материала вычислялась для каждого продольного створа.

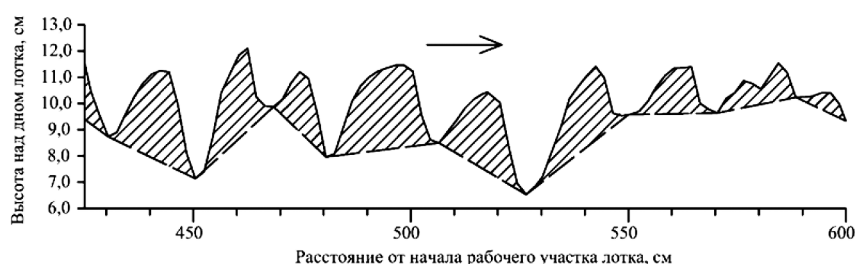


Рис. 5. Выделение границ активного слоя на эхограмме (эксперимент № 2):

/// — слой подвижного материала; - - - линия подвалов гряд; — — — линия поверхности гряд

Измерение скорости смещения гряд выполняется методом кросс-корреляции. Пример расчета коэффициентов двух последовательно измеренных продольных профилей дан в табл. 6 с равной дискретностью по продольной координате.

Таблица 6

**Расчет коэффициента корреляции для последовательных промеров
по центральному продольнику (эксперимент № 9)**

Расстояние от начала рабочего участка, см	Отметки дна по центральному продольнику, $t = 0$	Отметки дна по центральному продольнику, $t = 30$ мин	Сдвиг между ячейками при расчете коэффициента корреляции	Коэффициент корреляции
4,0	4,47	4,61	0	0,7491
4,5	4,36	4,68	1	0,8295
5,0	4,06	4,79	2	0,8897
5,5	3,62	4,78	3	0,9222
6,0	3,56	4,60	4	0,9218
6,5	3,07	4,26	5	0,8863
...	...	...	...	...

Далее выполняется расчет значений коэффициента корреляции двух промеров с различными значениями сдвига ячеек между ними. Сдвиг, имеющий наибольшее значение коэффициента корреляции, является истинным сдвигом второго измерения относительно первого за период между измерениями. Скорость перемещения продольного профиля (средняя скорость гряд) находится путем деления расстояния, соответствующего найденному сдвигу, на временной интервал между измерениями. Аналогичные расчеты выполняются для всех измеренных продольных профилей.

Расчет элементарного расхода донных наносов выполняется по формуле (5). Эталонный расход измерялся в рыхлом теле, поэтому измерение по данной формуле выполняется также в рыхлом теле:

$$q_{\text{эле}} = h_{\text{под.мат}} C_{\text{г}}. \quad (5)$$

Полный расход донных наносов определяется путем интегрирования элементарных расходов по ширине лотка. Для этого, согласно номеру продольного створа, элементарный расход для экспериментов № 1–3 заносится в графы 3, 6 и 9 табл. 7. Расчет расхода производится для каждой струи отдельно (графы 4, 7 и 10 табл. 7). Для этого находится среднее между двумя значениями элементарных расходов для струи, затем полученное значение умножается на ширину струи. Полный расход рассчитывается как сумма расходов всех десяти струй (графы 5, 8 и 11 табл. 7).

Расход донных наносов для экспериментов № 4–9 (табл. 8) рассчитывается сразу для всей ширины лотка без разбивки по струям — средняя мощность слоя подвижного материала, полученная для каждого эксперимента (графа 3), умножается на соответствующую скорость гряд (графу 4) и на ширину лотка (графа 5). Полученное значение полного расхода донных наносов заносится в графу 6.

Таблица 7

Расход донных наносов, полученный по параметру средней мощности слоя подвижного материала в экспериментах № 1–3

В, см	Номер продольника	Номер эксперимента								
		1			2			3		
		$Q = 35 \text{ л/с, } h = 10 \text{ см}$			$Q = 55 \text{ л/с, } h = 15 \text{ см}$			$Q = 45 \text{ л/с, } h = 12,5 \text{ см}$		
		$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
0		0,000	1,401	33,10	0,000	1,177	27,43	0,000	1,600	32,691
10	1	0,280	2,849		0,235	2,493		0,320	3,104	
20	2	0,290	2,987		0,263	2,882		0,301	2,908	
30	3	0,308	3,684		0,313	3,266		0,281	2,993	
40	4	0,429	4,325		0,340	3,237		0,318	3,468	
50	5	0,436	4,354		0,307	3,276		0,376	3,859	
60	6	0,435	4,213		0,348	3,703		0,396	4,242	
70	7	0,408	4,113		0,393	3,421		0,452	4,146	
80	8	0,415	3,624		0,292	2,715		0,377	4,128	
90	9	0,310	1,550		0,251	1,257		0,449	2,244	
100	—	—	—		0,000	—		0,000	—	

Таблица 8

Расход донных наносов, полученный по параметру средней мощности слоя подвижного материала в экспериментах № 4–9

Номер эксперимента	Условия эксперимента	Характеристики			$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
		$h_{\text{под.мат}}, \text{ см}$	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	$B, \text{ см}$	
4	$Q = 2,9 \text{ л/с, } H = 4,5 \text{ см}$	0,95	0,15	21,0	3,00
5	$Q = 3,5 \text{ л/с, } H = 5,5 \text{ см}$	1,09	0,11		2,52
6	$Q = 4,5 \text{ л/с, } H = 5,7 \text{ см}$	0,90	0,18		3,42
7	$Q = 6,0 \text{ л/с, } H = 6,6 \text{ см}$	0,94	0,33		6,51
8	$Q = 6,0 \text{ л/с, } H = 6,6 \text{ см}$	1,08	0,08		1,81
9	$Q = 6,0 \text{ л/с, } H = 6,6 \text{ см}$	0,80	0,05		0,84

Для анализа результатов измерений расхода донных наносов, выполненных по разработанному методу далее в процессе исследования, было выполнено сравнение с результатами измерений по эталонному методу.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты измерения полного расхода наносов заносятся в сравнительную табл. 9. Результаты измерений предлагаемым методом сравниваются с результатами эталонных измерений. В табл. 9 приняты следующие условные обозначения: $Q_{\text{полн. расч}}$ — результаты измерений расхода по разработанному методу, $Q_{\text{полн. эталон}}$ — результаты эталонных измерений. Для вычисления относительного отклонения была использована формула (6). Среднее относительное отклонение рассчитывалось как среднеарифметическое между значениями относительных отклонений:

$$\Delta = \frac{|Q_{\text{полн. расч}} - Q_{\text{полн. эталон}}|}{Q_{\text{полн. эталон}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемый метод измерения имеет точность, в среднем равную 11,12 %. В отдельных случаях, например, в экспериментах № 3 и 5, ошибка достигает 32,72 % и 16,67 %. Причиной ее может быть, например, недостаточная фильтрация малых выступов.

Таблица 9

Отклонение (ошибка) расхода наносов, полученного косвенными методами, от расхода наносов, полученного прямым объемным методом

Место эксперимента	Номер эксперимента	Условия эксперимента	$Q_{\text{полн. расч.}}$, см ³ /мин	$Q_{\text{полн. эталон.}}$, см ³ /мин	Отклонение абсолютное	Отклонение относительное, %
100-й лоток	1	$Q = 35,0$ л/с, $H = 10,0$ см	33,10	30,51	2,59	8,49
	2	$Q = 55,0$ л/с, $H = 15,0$ см	27,43	28,71	1,28	4,46
	3	$Q = 45,0$ л/с, $H = 12,5$ см	32,69	48,59	15,9	32,72
8-й лоток	4	$Q = 2,9$ л/с, $H = 4,5$ см	3,00	3,05	0,05	1,64
	5	$Q = 3,5$ л/с, $H = 5,5$ см	2,52	2,16	-0,36	16,67
	6	$Q = 4,5$ л/с, $H = 5,7$ см	3,42	3,64	0,22	6,04
	7	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	6,51	6,92	0,41	5,92
	8	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	1,81	2,06	0,25	12,14
	9	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	0,84	0,75	-0,09	12,00
—	—	—	Среднее относительное отклонение			11,12

Кроме того, к ошибкам может приводить сам способ измерения параметров донного рельефа. В работе [1], где проводилась экспериментальная проверка различных методов измерения расхода донных наносов, отмечается, что трехмерные гряды в каждой точке поперечного профиля имеют разную высоту, и из-за хаотичности их расположения продольный створ пересекает такие гряды в различных точках их поперечного профиля. Таким образом, при осреднении высоты гряд по продольному профилю получится не истинная средняя высота гряд, а ее заниженное значение. В работе [1] при проверки различных методов определения расхода донных был использован поправочный коэффициент, равный 1,35. Таким образом, при определении расхода измеренная высота гряд умножалась на коэффициент 1,35. В итоге использование этого коэффициента позволило повысить точность получаемых данных расхода.

В настоящей работе измерения выполняются по параметру слоя подвижного материала. Этот параметр, по своей сути, также является характеристикой гряд. Попытка использовать данный коэффициент 1,35 для увеличения величины средней мощности слоя подвижного материала

приведет к увеличению получаемого расхода донных наносов. В результате этого средняя относительная ошибка возрастет и достигнет 33,17 %. Таким образом, вопрос применения поправочного коэффициента в предлагаемом методе, а также его величины требуют отдельного исследования.

Сравнивая полученные результаты с результатами экспериментальной проверки других методов, выполненной в работе [1], следует отметить, что предлагаемый метод имеет среднее отклонение, соизмеримое с методом А. А. Костюченко (22,25 % без поправочного коэффициента и 5,25 % с коэффициентом). При этом результаты измерений методами ISSDOT и ГГИ отклонения составили, соответственно, 40,57 и 53,16 %, что значительно превышает отклонение, полученное в предлагаемом методе. Однако исследование, выполненное в работе [1], включало лишь два эксперимента. Для формулирования полноценных рекомендаций для применения того или иного метода необходимо выполнение более обширных исследований как в экспериментальных, так и в натурных условиях.

Заключение (Conclusion)

В данной работе выполнен анализ существующих методик измерения расхода донных наносов. Установлено, что современные методы измерения имеют ряд существенных недостатков. В частности, классический метод ГГИ, часто используемый в современной практике, имеет ряд ограничений, не позволяющих выполнить оценку расхода донных наносов с высокой точностью. Широко известный в англоязычной литературе метод ISSDOT также имеет недостатки. В ходе экспериментальной проверки было выявлено, что результаты измерений, полученные с использованием данных методов, имеют значительные ошибки [1].

Отмечается, что наиболее современный отечественный метод, разработанный А. А. Костюченко, имеет существенное преимущество по сравнению с классическим методом ГГИ. Данное преимущество заключается в использовании параметров всех гряд, выделенных на продольниках, для оценки расхода наносов. Способ выделения гряд подразумевает фильтрацию выступов дна с использованием величины среднеквадратического отклонения отметок дна. Однако эта величина по своей природе не может отражать реальных возможных размеров гряд, формирующихся на участке реки под воздействием потока. Для корректного выделения гряд необходимо использовать иной показатель минимально возможной высоты гряд. Анализ некоторых других современных методов измерений показал, что они также имеют различные недостатки. Серьезным ограничением большинства указанных методов является невозможность определения расхода донных наносов при дефицитных грядах.

В настоящей работе предложен новый метод измерения расхода донных наносов, основанный на применении параметра средней мощности слоя подвижного материала. Согласно этому подходу, для определения расхода донных наносов используются площадные характеристики гряд, благодаря чему учитываются все гряды, выделенные на продольнике после проведения фильтрации выступов дна, позволяющей отделить малые выступы дна от гряд на профиле. В ходе фильтрации исключаются все малые выступы дна. Такой подход к оценке высоты перемещающейся области руслового рельефа позволяет повысить точность оценки расхода донных наносов. Также благодаря использованию площадных характеристик гряд появляется возможность определения расхода донных наносов по параметрам грядового рельефа, состоящего из дефицитных гряд.

Для проверки предлагаемого метода была проведена серия экспериментов в гидравлических лотках. Рельеф дна состоял из трехмерных гряд, гидравлические условия потока были приближены к условиям равнинных судоходных рек. Анализ результатов экспериментов показал, что предлагаемый способ измерения расход донных наносов имеет среднюю ошибку, равную 11,12 %. При сравнительном анализе точности можно заметить, что ошибка в результатах, полученная при применении методов ГГИ и ISSDOT в работе [1], превышает ошибку, полученную при применении предлагаемого метода.

Дальнейшие исследования и усовершенствования разработанного метода должны быть основаны на большем количестве экспериментальных и натурных данных. Кроме того, необходимо проведение детальных исследований транспорта донных наносов при рельефе, состоящем из дефицитных гряд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заварзин Р. В. Измерения расхода донных наносов, перемещающихся в грядовой форме: экспериментальное исследование косвенных методов измерений / Р. В. Заварзин, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. // Междунар. науч.-практ. конф., СПб., 29–31 мая 2023 года. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 213–231. — EDN NXYCKN.
2. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
3. Engel P. Computation of bed load using bathymetric data / P. Engel, Y. Lam Lau // J. Hydraul. Div. — 1980. — Pp. 369–380.
4. 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. 38–51. — DOI: 10.7868/S0321059615010137. — EDN TCJCEN.
5. 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.
6. Костюченко А. А. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд / А. А. Костюченко, Р. В. Заварзин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. // Междунар. науч.-практ. конф., СПб., 29–31 мая 2023 года. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 151–164. — EDN DTKWVK.
7. Петровская О. А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.27 / Ольга Андреевна Петровская. — М., 2019. — 252 с. — EDN ZLANZR.
8. Gaeuman D. Field assessment of alternative bed-load transport estimators / D. Gaeuman, R. B. Jacobson // Journal of Hydraulic Engineering. — 2007. — Vol. 133. — Pp. 1319–1328. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1319).
9. Abraham D. Bed-load measurements on large, sand-bed rivers in the United States. / D. Abraham, T. McAlpin, K. Jones // E3S Web Conf. — Vol. 40. — 2018 — Pp. 8. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184006021.
10. Pat. 11067475B2 United States IPC G01M 10/00 Bedload transport methodology and method of use / Tate O. McAlpin, D. Abraham, J. Shelley, Thad C. Pratt, inventor // Individual assignee; заявл. 01.04.2013; опубл. 20.07.2021.
11. Wilbers A. The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. / Wilbers, A. // Netherlands Geographical Studies 323, The Royal Dutch Geographical Society, Utrecht, Netherlands. — 2004. — 227 p.
12. Nittrouer J. A. Bedform transport rates for the lowermost Mississippi River / J. A. Nittrouer, M. A. Allison, R. Campanella // Journal of Geophysical Research. — 2008. — Vol. 113. — Pp. 1–16. DOI: 10.1029/2007JF000795.
13. Месерлянс Г. Г. Деформации русла Р. Невы / Г. Г. Месерлянс, Н. М. Башкова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — Т. 2. — С. 117–128. — EDN MQGEIX.
14. Заявка на пат. Российская Федерация, МПК G01F 22/00 Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков; заяв. и патентообл. Государственный гидрологический институт. — № 2024117807/20; заявл. 26.06.2024.
15. Гладков Г. Л. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская, Р. В. Заварзин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196. — EDN BBVGXO.
16. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани — СПб.: ООО «Нестор-История», 2011. — 504 с. — EDN QKKGJD.
17. Liu D. The assessment of an Acoustic Doppler Velocimetry profiler from a user's perspective / D. Liu, K. Alobaidi, M. Valyrakis // Acta Geophysica. — 2022. — Т. 70. — № 5. — С. 2297–2310.

REFERENCES

1. Zavarzin, R. V., and O. A. Petrovskaya. "Measurements of bed load transport taking place in the form of dunes: an experimental study of indirect measurement methods." *Vodnye puti i ruslovye protsessy*.

Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 213–231.

2. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
3. Engel, P. and Y. Lam Lau “Computation of bed load using bathymetric data.” *J. Hydraul. Div.* (1980): 369–380.
4. Sidorchuk, A. Y. “Evaluating bedload transport rate in a river bed taking into account data on the active and passive bed-forms dynamics”. *Water Resour* 42 (2015): 38–51. DOI: 10.1134/S009780781501011X.
5. Alekseevskii, N. I., Sidorchuk, A. Y. “Morphology and dynamics of active bed forms in the Terek R. Channel.” *Water Resour* 44 (2017): 226–236. DOI: 10.1134/S0097807817010031.
6. Kostyuchenko, A. A. and R. V. Zavarzin “Metod vypolneniya i obrabotki izmerenij dlya opredeleniya parametrov donnykh gryad.” *Vodnye puti i ruslovyye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023.
7. Petrovskaya Olga Andreevna Optimizatsiya metodov rascheta raskhoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskiy parametrov rek. PhD diss. M.: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vodnykh problem Rossiyskoy akademii nauk, 2019.
8. Gaeuman, D. and R. B. Jacobson “Field assessment of alternative bed-load transport estimators”. *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (2007): 1319–1328. DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9429(2007)133:12(1319).
9. Abraham, D., T. McAlpin and K. Jones “Bed-load measurements on large, sand-bed rivers in the United States” *E3S Web Conf. Volume* 40 (2018): 8 p. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184006021.
10. Tate O. McAlpin, D. Abraham, J. Shelley and Thad C. US 11 067 475 B2, IPC G 01 M 10/00. Bedload transport methodology and method of use. United States, Publ. 01 Apr 2013.
11. Wilbers, A. *The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes*. Netherlands Geographical Studies 323, The Royal Dutch Geographical Society, Utrecht, Netherlands (2004): 227.
12. Nittrouer, J. A., Allison M. A. and Campanella R. Bedform transport rates for the lowermost Mississippi River *Journal of Geophysical Research* 113 (2008):1–16 p. DOI: 10.1029/2007JF000795.
13. Meserlyans, G. G., and Bashkova N. M. “Deformatsii rusla R. Nevy” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(6) (2010): 117–128.
14. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov Patent application, 2024 117 807/20 IPC G 01 F 22/00 Sposob opredeleniya raskhoda donnykh nanosov po parametru sredney moshchnosti sloya podvizhnogo materiala. Russian Federation. Declared 26 July 2024.
15. Gladkov, Gennadii L., Polina S. Rzhakovskaya, and Ruslan V. Zavarzin. “Experimental studies of flow hydraulics and bedload transport parameters in unsteady flow.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.
16. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Ekspperimental’nye issledovaniya i gidravlicheskie modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.
17. Liu, D., Alobaidi, K. & Valyrakis, M. “The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user’s perspective.” *Acta Geophys* 70 (2022): 2297–2310. DOI: 10.1007/s11600-022-00896-3.

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

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
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 16 октября 2024 г.

Received: Oct. 16, 2024

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF LINEAR MATHEMATICAL MODELS OF MARINE VESSELS BY TABLES OF MANEUVERING ELEMENTS

D. A. Oskin¹, E. B. Osokina¹, V. V. Bocharova^{1,2}

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

² Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The paper considers the practical implementation of the algorithm for identifying the parameters of linear mathematical models of Nomoto 1st and 2nd order of the marine vessels based on experimental data. Information from the maneuvering element tables containing information on the vessel's circulation is used as experimental data. The initial data are presented in the form of discrete sampling, which allows obtaining the model parameters in a discrete form and then making the transition to a continuous form. The initial data are formed for each type of motion: a loaded vessel, a vessel in ballast, half-board and aboard, starboard and port aboard. The paper uses a method for determining the parameters of the transfer functions of the obtained models using the least squares method for transient characteristics. To improve the quality of the assessment of the parameters of the identified model, it is proposed to interpolate the initial data. The following methods are used in the paper: linear interpolation, interpolation by adjacent points, cubic and spline interpolation. To implement the proposed method, a program has been developed and implemented in the MatLab environment, which allows interpolation of the transient response by a method selected from the proposed ones, and then, based on the interpolated values, to determine the parameters of the transfer function. A block diagram and description of the algorithm for the operation of this program are provided. The result of its operation is a model with its own parameters for each case of vessel motion. The program displays graphs of transient processes for the initial data and calculated ones for each selected type of interpolation, and also displays the parameters of the transfer functions of the models. A description of the source data file used is provided. To assess the quality of software-implemented identification models, a model circulation trajectory is calculated and its graphic construction occurs. As a result of the program, the obtained linear mathematical models are proposed to be grouped and presented in interval form.

Keywords: marine vessel, model Nomoto, parametric identification, interval model, interpolation.

For citation:

Oskin, Dmitry. A., E. B. Osokina and V. V. Bocharova "Practical implementation of parametric identification of linear mathematical models of marine vessels by tables of maneuvering elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 863–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873.

УДК 681.51

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ ПО ТАБЛИЦАМ МАНЕВРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. А. Оськин¹, Е. Б. Осокина¹, В. В. Бочарова^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»,
Владивосток, Россия

² ФГБОУ ВО «Владивостокский Государственный Университет»,
г. Владивосток, Россия

В работе рассмотрена практическая реализация алгоритма идентификации параметров линейных математических моделей морских судов Номото 1-го и 2-го порядка по экспериментальным данным. В качестве данных эксперимента используется информация из таблиц маневренных элементов, содержащих сведения о циркуляции судна. Исходные данные представлены в виде дискретных отчетов, что позволяет

получить параметры модели в дискретной форме, и затем осуществить переход к непрерывной форме. Исходные данные формируются для каждого вида движения: судно в грузу, судно в балласте, полборта, на борт, право и лево на борт. В работе использован способ определения параметров передаточных функций получаемых моделей с помощью метода наименьших квадратов по переходным характеристикам. Для улучшения качества оценки параметров идентифицируемой модели предлагается интерполировать исходные данные. В работе использованы следующие методы: линейная интерполяция, интерполяция по соседним точкам, кубическая и сплайн-интерполяции. Для реализации предложенного метода разработана и реализована программа в среде MatLab, позволяющая проводить интерполяцию переходной характеристики выбранным из предложенных методов, затем по интерполированным значениям определять параметры передаточной функции. Приведена блок-схема и описание алгоритма работы данной программы. Результатом ее работы является модель со своими параметрами для каждого случая движения судна. Программа отображает графики переходных процессов для исходных и расчетных данных для каждого выбранного вида интерполяции, а также отображает параметры передаточных функций моделей. Приведено описание используемого файла исходных данных. Для того чтобы оценить качество программно-реализованных идентификационных моделей, выполняются расчет модельной траектории циркуляции и ее графическое построение. В результате работы программы полученные линейные математические модели предлагается сгруппировать и представить в интервальном виде.

Ключевые слова: морское судно, модель Номото, параметрическая идентификация, интервальная модель, интерполяция.

Для цитирования:

Оськин Д. А. Практическая реализация параметрической идентификации линейных математических моделей морских судов по таблицам маневренных элементов / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, В. В. Бочарова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 863–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-863-873.

Введение (Introduction)

Управление морскими подвижными объектами (МПО) осуществляется в условиях существенной структурно-параметрической неопределенности, которая связана с нелинейностью, нестационарностью, а также сложной динамикой взаимодействия с внешней средой и приводит к тому, что использование классических линейных методов для синтеза автоматических систем затруднено. При этом в современной теории управления наряду с классическими методами активно развиваются нелинейные и адаптивные методы синтеза, позволяющие преодолевать данного рода трудности.

Для проектирования и эксплуатации систем автоматического управления так называемых *авторулевых* необходимо решить задачу по определению параметров математических моделей морских судов. Для повышения точности расчетов и настройки регуляторов, а также учета характерных особенностей объекта управления необходимо определить структуру математической модели и ее параметры. В [1] и [2] представлены известные математические модели морских судов: линейные модели Номото 1-го и 2-го порядка и нелинейные модели Беа и Норрбина. Данные модели представлены в виде линейных и нелинейных дифференциальных уравнений.

При идентификации необходимо учесть, что исходная задача разделяется на две подзадачи: определение структуры и определение параметров. Первая подзадача, как правило, выполняется на основе эмпирически полученного знания о структуре модели. В данном случае ограничимся известными линейными моделями Номото 1-го и 2-го порядка, структура которых хорошо изучена. Вторая подзадача состоит в определении параметров используемых моделей, для обеспечения близости их динамических свойств к реальным объектам.

В работах [3–5] рассмотрены общие сведения теории идентификации, приведена постановка задачи и обобщенные методы решения. В [6] исследуется подход, связанный с использованием метода наименьших квадратов для решения задачи параметрической идентификации математической модели морского судна, заданной классическим уравнением Номото. В качестве экспериментальных данных, на основании которых проводилась идентификация, использовались данные, полученные с имитатора сигналов ИС-2000¹. В данной версии имитатора обеспечивается снятие

¹ Инженерный центр информационных и управляющих систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ec-ics.ru>. (Дата обращения: 30.09.2024).

данных с виртуальных датчиков (GPS, компас, лаг, рулевая машина) моделей нескольких типов судов, движущихся прямолинейно под воздействием внешних сил (ветро-волновые воздействия, течение). На основе результатов исследований разработано программное обеспечение², позволяющее проводить идентификацию параметров линейных моделей динамических объектов, имеющих один вход и один выход, функционирующих в условиях внешних воздействий. Исходные данные: временные ряды, представляющие собой зависимость вход / выход, хранящиеся во внешнем файле. Результатом являются интервальные оценки параметров передаточной функции объекта управления. В [7] задача параметрической идентификации решается для модели, описывающей плоскопараллельное движение судна (с учетом дрейфа). Также для идентификации активно используется подход, связанный с применением рекуррентных нейронных сетей, позволяющий восстанавливать нелинейные зависимости типа «вход-выход», что является актуальным для описания динамики нелинейных объектов [8]. По результатам исследований опубликовано программное обеспечение³ предназначенное для нейросетевой идентификации параметров линейных моделей одномерных динамических объектов. Отличительная особенность разработанного программного обеспечения состоит в том, что входной сигнал представляет собой комбинацию воздействий разной формы, позволяющих формировать расширенную обучающую выборку.

В [10], [11] авторами разработан метод адаптивной идентификации параметров модели морского судна, в основе которого находится алгоритм скоростного градиента. Метод заключается в составлении функционала, минимизирующего разность выхода математической модели объекта и выхода исследуемого объекта (морского судна), а также определение производной по времени искомого функционала, вычисленного в силу уравнений системы.

Используемые адаптивные системы строятся по схеме с эталонной моделью (ЭМ) или используют настраиваемую модель (НМ) в контуре управления. Недостатками данных систем является то, что для обеспечения их эффективного функционирования необходимо наличие достаточно точной (или приближительной) математической модели управляемого объекта, что требует дополнительного времени на подстройку параметров модели. Также необходимо отметить, что существует класс авторулевых устройств, предназначенных для управления МС, построенных по принципу адаптивной системы с НМ.

Одним из новых классов систем автоматического управления являются системы с интервальными моделями. Использование таких моделей в системах управления обусловлено предопределенной нестационарностью параметров приведенных математических моделей на практике. Практический смысл параметров моделей связан с физическими параметрами судов: массой, моментами инерции, коэффициентами вязкого сопротивления и др. Значения этих параметров варьируются в широких пределах и зависят от загрузки судна, скорости его движения и других факторов. Использование интервальных объектов в системах управления наделяет систему управления качествами робастности, что является актуальным при проектировании авторулевых устройств [11].

В настоящей работе рассматривается практическая реализация подхода к параметрической идентификации, основанного на использовании известных алгоритмов оценки параметров и позволяющего повысить вычислительную эффективность ранее предложенных алгоритмов.

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015663311 Российская Федерация. Программа для интервальной оценки параметров линейных моделей динамических объектов / Д. А. Оськин, А. А. Дыда; заяв. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ). № 2015619976; заявл. 21.10.2015; опубл. 15.12.2015. EDN VVMQVF.

³ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663246 Российская Федерация. Программа для нейросетевой идентификации моделей динамических объектов на базе расширенной обучающей выборки / Д. А. Оськин, А. А. Дыда; заяв. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ). № 2015660067; заявл. 21.10.2015; опубл. 14.12.2015. EDN LMQNYM.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С помощью модели Номото 2-го порядка описывается зависимость изменения значения скорости рыскания ω судна при продольном движении в зависимости от углового положения пера руля δ [1], [6], [9], [10].

Модель Номото 2-го порядка может быть представлена в виде передаточной функции:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\delta(s)} = \frac{k(T_0s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{k(T_0s + 1)}{T_{11}s^2 + T_{12}s + 1} \quad (1)$$

или

$$T_1T_2\ddot{\omega} + (T_1 + T_2)\dot{\omega} + \omega = k(\delta + T_0\dot{\delta}). \quad (2)$$

Понижение порядка модели (1) или (2) и приведение ее к модели Номото 1-го порядка возможно с введением допущения $T \approx T_1 + T_2 - T_0$:

$$W(s) = \frac{\omega_y(s)}{\delta(s)} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (3)$$

или

$$T_c\dot{\omega}_y + \omega_y = k\delta. \quad (4)$$

В моделях (1)–(4) приняты следующие обозначения: параметр k — коэффициент поворотливости; T , T_0 , T_1 , T_2 — постоянные времени; $T_{11} = T_1T_2$; $T_{12} = T_1 + T_2$.

Аналитическая оценка параметров может быть выполнена на основе результатов экспериментальных данных, полученных при исследовании физической модели в опытовом бассейне или путем проведения натурных испытаний с помощью маневров «зигзаг» и «циркуляция».

Одним из основных документов, содержащих информацию о маневренных характеристиках судна, в соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15) «Требования к отображению маневренной информации на судах», является таблица маневренных характеристик или элементов, которая должна содержать основные особенности и подробную информацию о маневренных характеристиках судна. Таблица маневренных характеристик судна содержит данные, которые могут быть использованы для оценки (идентификации) параметров управляемости судна: коэффициенты поворотливости и постоянные времени. На рис. 1 приведен фрагмент таблицы маневренных характеристик, согласно рекомендации Резолюции ИМО А.601(15), содержащий сведения о циркуляции судна в балласте / грузу при совершении разворота лево / право с положением руля «на борт» (35°) и «на полборта» (15°).

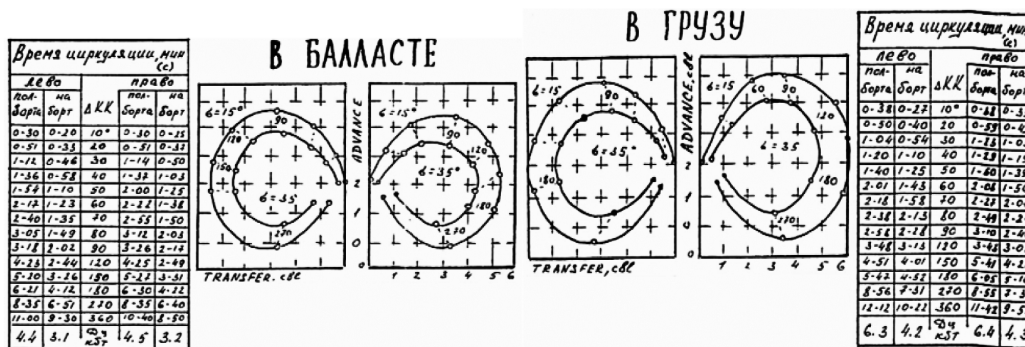


Рис. 1. Элементы таблицы маневренных характеристик, составленной на основе экспериментальных данных

На рис. 2 приведены характеристики циркуляции, применяемые для ее количественной оценки:

- диаметр установившейся циркуляции по ЦТ судна $D_{ц}$;
- тактический диаметр циркуляции D_T (расстояние между ДП судна на прямом курсе и после поворота его на 180°);
- выдвиг судна по линии первоначального курса L_1 и смещение по нормали к нему L_2 ;
- угол дрейфа β судна на циркуляции (угол между ДП судна и вектором скорости V на циркуляции).

Информация, приведенная в таблице маневренных характеристик, содержит промежутки времени:

- на каждый шаг изменения курса $\Delta KK = 10^\circ$ — в диапазоне изменения 0° – 90° (между позициями I–II);
- на каждые $\Delta KK = 30^\circ$ — в диапазоне 90° – 180° (между позициями II–III);
- на каждые $\Delta KK = 90^\circ$ — в диапазоне 180° – 360° .

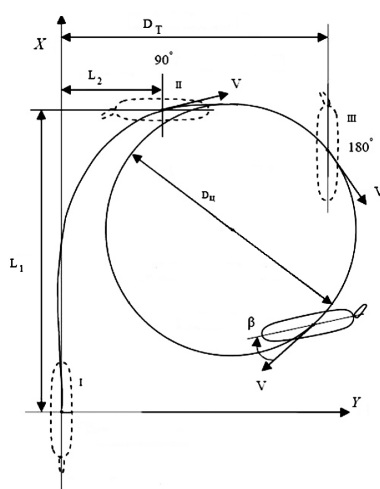


Рис. 2. Элементы поворотливости

Таким образом, для каждого режима и нагрузки можно определить параметры передаточной функции и по серии значений перейти к интервальной модели судна.

Результаты (Results)

Для реализации алгоритма параметрической идентификации разработано программное обеспечение в среде Matlab⁴. Программа позволяет выполнять расчет параметров (идентификацию) линейных моделей морских судов (моделей Номото 1-го и 2-го порядка) по интерполированным данным маневренных буклетов, представленным в виде временных характеристик сведений о циркуляции судна на каждый борт при полной и половинной перекладке руля. При работе с программой необходимо выбрать метод интерполяции исходных данных и запустить расчет.

При расчете используются следующие методы:

1. *Линейная интерполяция* ('linear'). Этот метод предполагает приближение значений функции между двумя ближайшими известными значениями с использованием линейной функции. Таким образом, для заданной точки интерполяции вычисляется значение, основанное на линейном соединении двух ближайших дискретных данных.

2. *Интерполяция по соседним точкам*. Данный подход предполагает присвоение значения функции в интерполируемой точке на основе значений, полученных в ближайших точках данных. В зависимости от выбранного алгоритма это может быть:

- 'nearest' — наименьшая по расстоянию точка;

⁴ Документация MATLAB на русском языке [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.exponenta.ru/documentation-center.html> (дата обращения: 08.10.2024).

– 'next' — следующая по порядку точка;

– 'previous' — предыдущая точка.

3. *Кубическая интерполяция*. В данном случае выделяются два метода:

– 'pchip' (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) — метод, обеспечивающий сохранение формы и монотонности исходных данных с использованием кусочных кубических функций;

– 'v5cubic' ('cubic') — метод, основанный на использовании кубических полиномов, предлагающий гладкое и непрерывное приближение значений, позволяя более точно интерполировать данные с учетом их особенностей.

4. *Сплайн-интерполяция* ('spline'). Этот метод использует кубические сплайны для создания плавных кривых между дискретными точками. Сплайны позволяют соединить соседние точки с помощью непрерывных функций, обеспечивая высокую степень гладкости интерполяционной функции и ее производных.

В зависимости от выбранного метода формируется текстовый отчет в виде набора передаточных функций для каждой характеристики о циркуляции судна⁵. Форма главного окна представлена на рис. 3. Пользователь выбирает метод интерполяции и файл с исходными данными.

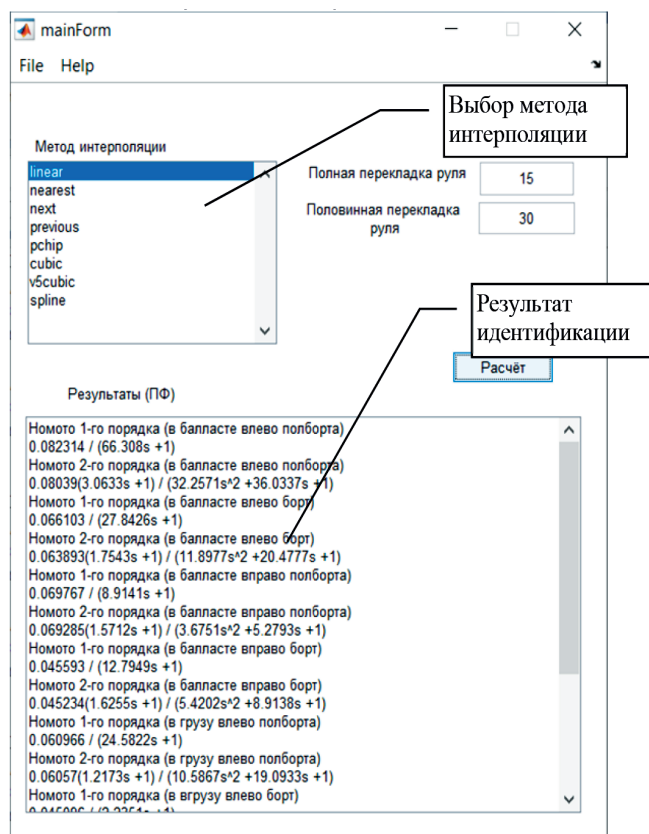


Рис. 3. Форма главного окна программы расчета параметров

Файл с исходными данными задается пользователем и представляет собой обычный текстовый файл с расширением *.txt, *.dat с расположенными построчно данными. Заголовок строки и данные разделены табуляторами. В первой строке размещены значения угла разворота в градусах (заголовок строки обозначен fi), в остальных — время в секундах. Названия строк соответствуют элементу циркуляции (табл. 1).

⁵ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022665815 Российская Федерация. Программа для идентификации параметров модели судна по маневренным характеристикам / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, В. В. Бочарова; заяв. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского». — № 2022665815; заявл. 29.08.2022; опублик. 06.09.2022. EDN SFJUPT.

Таблица 1

Названия строк файла с исходными данными, заданными в фрагменте файла данных

Заголовок строки	Вид движения	Заголовок строки	Вид движения
blhb	В балласте, лево, полборта	llhb	В грузу, лево, полборта
blfb	В балласте, лево, на борт	llfb	В грузу, лево, на борт
brhb	В балласте, право, полборта	lrhb	В грузу, право, полборта
brfb	В балласте, право, на борт	lrfb	В грузу, право, на борт

Пример фрагмента файла с исходными данными дан на рис. 4.

```

fi → 0 → 10 → 20 → 30 → 40 → 50 → 60 → 70 → 80 → 90 → 120 → 150¶
blhb→0 → 15 → 26 → 35 → 43 → 52 → 62 → 70 → 78 → 86 → 112 → 137¶
blfb→0 → 13 → 20 → 27 → 34 → 39 → 45 → 51 → 58 → 65 → 82 → 99¶
brhb→0 → 17 → 27 → 36 → 46 → 56 → 65 → 75 → 82 → 93 → 123 → 153¶
brfb→0 → 15 → 23 → 29 → 35 → 42 → 49 → 56 → 61 → 68 → 90 → 111¶
llhb→0 → 20 → 34 → 45 → 56 → 67 → 80 → 91 → 102 → 112 → 146 → 178¶
llfb→0 → 16 → 24 → 32 → 41 → 47 → 54 → 67 → 69 → 77 → 98 → 118¶
lrhb→0 → 22 → 35 → 47 → 60 → 73 → 85 → 98 → 108 → 122 → 161 → 200¶
lrfb→0 → 18 → 27 → 34 → 42 → 50 → 58 → 66 → 73 → 81 → 107 → 132¶

```

Рис. 4. Пример файла с исходными данными (формат *.txt, *.dat)

На рис. 5 приведена блок-схема программы. В процессе выполнения программы расчета пользователь задается типом интерполяции и считывает данные из файла. В зависимости от типа интерполяции вычисления выполняются по разным ветвям: в случае выбора линейной, кубической, сплайн-интерполяции сначала выполняется интерполяция зависимости курса судна от времени циркуляции, затем по интерполированной характеристике вычисляются скорости рыскания судна. В случае выбора типа интерполяции по соседним точкам выполняется вычисление и интерполяция скорости рыскания.

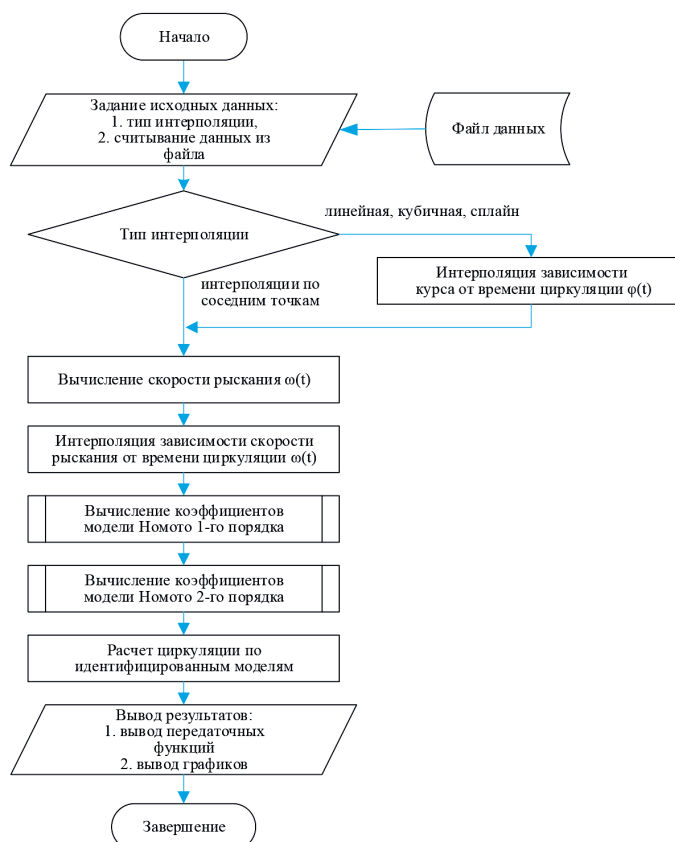


Рис 5. Алгоритм программы

По интерполированной зависимости $\omega(t)$ вычисляются коэффициенты моделей Номото 1-го и 2-го порядка [3]–[6]. Для оценки качества идентификационных моделей выполняется

расчет модельной траектории циркуляции и ее графическое отображение. При проверке выполняется сравнение исходных, приведенных в буклете, и расчетных характеристик: $L_1, L_2, D_T, D_{\text{ц}}$.

Обсуждение (Discussion)

Программа отображает графики переходных процессов для исходных и расчетных данных для выбранного вида интерполяции, а также отображает параметры передаточных функций моделей. В табл. 2 приведены результаты идентификации параметров передаточных функций моделей Номото 1-го и 2-го порядка. На рис. 6 приведены графики переходных процессов и процессов циркуляции в моделях Номото 1-го и 2-го порядка идентифицированных для следующих случаев: судно в балласте, лево, полборта (см. рис. 6, а), судно в грузу, право, на борт (см. рис. 6, б).

Таблица 2

Передаточные функции моделей Номото 1-го и 2-го порядка

Вид движения	Метод 'nearest' — интерполяция по ближайшему соседу	Метод 'next' — следующая соседняя интерполяция
В балласте, лево полборта	$0,086486 / (21,0907s + 1),$ $(-0,0620s + 0,0865) / (5,6866s^2 + 20,378s + 1)$	$0,084534 / (13,9239s + 1)$ $(-0,0624s + 0,084966) / (8,0937s^2 + 30,69s + 1)$
В балласте, лево на борт	$0,052105 / (8,3203s + 1)$ $(-0,040181s + 0,0521) / (1,92s^2 + 7,541s + 1)$	$0,051181 / (5,4139s + 1)$ $(-0,039495s + 0,050739) / (2,5s^2 + 10,34s + 1)$
В балласте, право полборта	$0,085413 / (16,1061s + 1)$ $(-0,064614s + 0,0854) / (3,7588s^2 + 15,35s + 1)$	$0,084425 / (10,5231s + 1)$ $(-0,066165s + 0,0846) / (5,63s^2 + 25,67s + 1)$
В балласте, право на борт	$0,053334 / (7,7695s + 1)$ $(-0,039309s + 0,0534) / (2,1674s^2 + 7,018s + 1)$	$0,051603 / (5,6539s + 1)$ $(-0,037819s + 0,050856) / (2,5667s^2 + 8,70s + 1)$
В грузу, лево полборта	$0,070674 / (31,8077s + 1)$ $(-0,054345s + 0,0702) / (7,4066s^2 + 30,321s + 1)$	$0,077462 / (43,2606s + 1)$ $(-0,061346s + 0,07646) / (12,4s^2 + 60,068s + 1)$
В грузу, лево на борт	$0,062815 / (32,384s + 1)$ $(-0,049278s + 0,0626) / (7,11s^2 + 31,398s + 1)$	$0,065258 / (35,8258s + 1)$ $(-0,049968s + 0,0622) / (10,344s^2 + 50,4146s + 1)$
В грузу, право полборта	$0,062055 / (18,4881s + 1)$ $(-0,047851s + 0,06203) / (4,412s^2 + 17,702s + 1)$	$0,061922 / (15,1711s + 1)$ $(-0,047497s + 0,0608) / (5,4172s^2 + 22,988s + 1)$
В грузу, право на борт	$0,051568 / (11,6061s + 1)$ $(-0,03817s + 0,0515) / (3,2146s^2 + 10,81s + 1)$	$0,051618 / (9,6996s + 1)$ $(-0,037732s + 0,0501) / (3,9253s^2 + 14,121s + 1)$

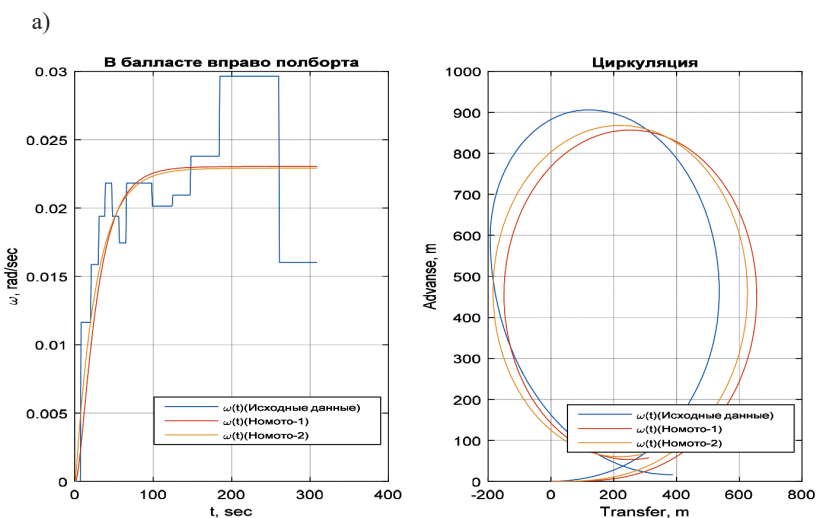


Рис. 6 (начало). Результаты идентификации:
а — судно в балласте, лево, полборта

б)

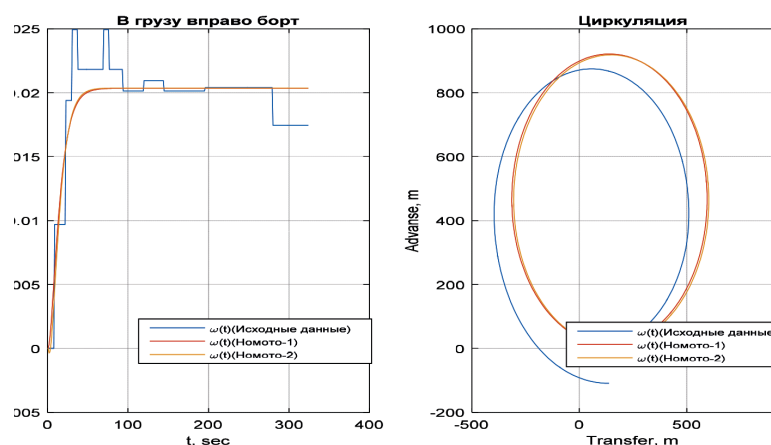


Рис. 6 (окончание). Результаты идентификации:
б — судно в грузу, право, на борт

Как видно из полученных результатов, для нескольких рядов исходных данных были получены коэффициенты моделей со следующими интервалами изменения значений (табл. 3).

Таблица 3

Параметры интервальных передаточных функций

Вид модели	Для моделей Номото 1-го порядка	Для моделей Номото 2-го порядка
Общая модель	$W_1(s) = \frac{[0,051568...0,086486]}{[7,769...32,384]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0515...0,0865]}{[1,92...7,4066]s^2 + [7,018...31,398]s + 1}$
Модель в балласте на борт	$W_1(s) = \frac{[0,052105...0,053334]}{[7,7695...8,3203]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0521...0,0534]}{[1,92...2,1674]s^2 + [7,018...7,541]s + 1}$
Модель в балласте полборта	$W_1(s) = \frac{[0,085413...0,086486]}{[16,1061...21,0907]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0854...0,0865]}{[3,7588...5,68664]s^2 + [15,35...20,378]s + 1}$
Модель в грузу на борт	$W_1(s) = \frac{[0,051568...0,062815]}{[11,6061...32,384]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,0515...0,0626]}{[3,2146...7,11]s^2 + [10,81...31,398]s + 1}$
Модель в грузу полборта	$W_1(s) = \frac{[0,062055...0,070674]}{[18,4881...31,8077]s + 1}$	$W_2(s) = \frac{[0,06203...0,0702]}{[4,412...7,4066]s^2 + [17,702...30,321]s + 1}$

Полученные модели сгруппированы по типу загрузки и поворотливости. Параметры моделей принимают значения, распределенные в ограниченных интервалах, откуда следует, что модель морского судна может быть представлена как модель с интервальными параметрами. Можно сделать вывод о том, что при идентификации необходимо рассматривать модель с интервальными матрицами, вариации значений которых обусловлены нелинейностями идентифицируемой системы и влиянием внешних случайных возмущений.

Заключение (Conclusion)

Задача параметрической идентификации, связанная с получением математических моделей, является актуальной, она позволяет развивать новые направления теории управления, в частности разработку систем управления с интервальными моделями. В процессе исследования рассмотрен практический подход, связанный с разработкой программного обеспечения, предназначенного для получения линейных моделей морских судов. Разработан алгоритм получения математической

модели на основе сведений о циркуляции судна, приведенных в таблице маневренных характеристик. Оценка параметров модели выполняется по интерполированным данным методом наименьших квадратов.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании авторулевых устройств, обладающих новыми качествами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна: учебник. — 3-е изд., перераб. и доп. / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — М.: ТрансЛит, 2007. — 376 с.
2. Pomorski J. Trajectory tracking control system for ship / J. Pomorski, L. Morawski, A. Rak // IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems — CAMS'2004. Ankona, Italy, July 7–9, 2004. — IFAC Proceedings Volumes, 2004. — Pp. 251–255 DOI: 10.1016/S1474-6670(17)31740-8.
3. Семенов А. Д. Идентификация объектов управления: учеб. пособие. / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. — 211 с.
4. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. — М.: Наука, 1991. — 432 с.
6. Оськин Д. А. Идентификация параметров математической модели морского судна / Д. А. Оськин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2011. — № 2. — С. 141–145. — EDN OWNFEV.
7. Оськин Д. А. Идентификация параметров модели морского судна с учетом дрейфа / Д. А. Оськин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 250–253. — EDN PBMVNH.
8. Oskin D. A. Neural network identification of marine ship dynamics / D. A. Oskin, A. A. Dyda, V. E. Markin // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Osaka, 17–20 september 2013. — Osaka, 2013. — Pp. 191–196. DOI 10.3182/20130918-4-JP-3022.00018. — EDN SLNQBF.
9. Осокина Е. Б. Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей / Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин, А. А. Дыда // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2(30). — С. 24–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31. — EDN TPSWYL.
10. Дыда А. А. Адаптивная идентификация параметров моделей судов на основе алгоритма скоростного градиента / А. А. Дыда, П. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3–1(33). — С. 263–268. — EDN YLOGMH.
11. Дыда А. А. Робастный подход к построению систем управления курсом судна / А. А. Дыда, П. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 3–2(37). — С. 141–145. — EDN YPPLWZ.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L. and N. N. Tsymbal *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna: Uchebnik. — 3-e izd., pererab. i dop.* M: TransLit, 2007.
2. Pomirski, Janusz, Leszek Morawski, and Andrzej Rak. “Trajectory tracking control system for ship.” *IFAC Proceedings Volumes* 37.10 (2004): 251–255.
3. Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya: ucheb. posobie.* — Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003. — 211 s.
4. Dejch, A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh obektov.* M: Energiya, 1979.
5. Lyung, L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya polzovatelya.* M: Nauka, 1991.
6. Oskin, D. A. “Identifikatsiya parametrov matematicheskoy modeli morskogo sudna” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2011): 141–145.
7. Oskin, D. A. “Identifikatsiya parametrov modeli morskogo sudna s uchedom drejfa” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2012): 250–253.
8. Oskin, D. A., A. A. Dyda and V. E. Markin “Neural network identification of marine ship dynamics” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Osaka, 17–20 sentyabrya 2013 goda.* — Osaka, 2013: Pp. 191–196. DOI 10.3182/20130918-4-JP-3022.00018.

9. Osokina, E. B., D. A. Oskin and A. A. Dyda “Adaptivnaya identifikatsiya parametrov sudna na osnove prostykh modelej” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 2(30) (2015): 24–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31.

10. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina and D. A. Oskin “Adaptivnaya identifikatsiya parametrov modelej sudov na osnove algoritma skorostnogo gradienta” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 3–1(33) (2016): 263–268.

11. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina and D. A. Oskin “Robastnyj podkhod k postroeniyu sistem upravleniya kursom sudna” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 3–2(37) (2017): 141–145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оськин Дмитрий Александрович —

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электронной
и микропроцессорной техники,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: osykinda@msun.ru

Осокина Елена Борисовна —

кандидат технических наук,
доцент кафедры электронной
и микропроцессорной техники,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: olena1961@yandex.ru

Бочарова Виктория Валерьевна —

кандидат технических наук,
доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи,
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского,
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а,
e-mail: my_viktor@mail.ru
доцент кафедры информационных технологий
и систем,
Владивостокский государственный университет,
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Oskin —

Ph.D. (Eng),
assistant professor, head of department
of electronic and microprocessor engineering
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoy
Verkhneportovaya str. 50a, Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: osykinda@msun.ru

Elena B. Osokina —

Ph.D. (Eng),
assistant professor of department
of electronic and microprocessor engineering,
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoy,
Verkhneportovaya str. 50a,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: olena1961@yandex.ru

Viktoriya V. Bocharova —

Ph.D. (Eng),
assistant professor of department of radioelectronics
and radiocommunication, Maritime State
University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Verkhneportovaya str. 50a,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: my_viktor@mail.ru
assistant professor of the department of information
technology and systems,
Vladivostok State University,
41 Gogolya st., Vladivostok 690014 Russia

Статья поступила в редакцию 06 ноября 2024 г.

Received: Nov. 06, 2024.

TEST RESULTS OF THE SHORE SYSTEM FOR OPTIMIZING MARINE VESSEL TRAFFIC

D. A. Akmaykin

Maritime state University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

The article presents the results of research a prototype of a coastal software and hardware complex, which calculate optimal routes. The purpose of the article is to analyze the quality of the calculated routes depending on the effect of meteorological conditions in the navigation area. The routes plotted using the created prototype of the coastal software complex, which use information from ships and satellites allows creating and adjusting the optimal route of the vessel in the process of seaway. The analysis carried out on base of actual voyages of ships from the port of Vladivostok to the port of Magadan and Petropavlovsk-Kamchatsky. Geographic, real and meteorological (proposed by the complex) routes were compared in article. An analysis was carried out of the effect of the speed and direction of the surface wind, the speed and direction of surface sea currents and the parameters of sea waves (wave height, direction of propagation and period) on the ship's motion. In the article, was estimated the calculated and actual speed of the vessel. The presented coastal hardware and software complex calculated meteorological models of the selected in article ships, which point to the change in their speed and course depending on the surrounding hydrometeorological conditions and ship's parameters. The analysis result showed the inverse dependence of the effect of surface wind and sea waves on the ships speed and the direct dependence on its draft. It is give information that the change in course significantly affects the speed, slowing down it. The complex offers route options with the required track angle, compensating for the ships drift, thereby providing more favorable traffic conditions. The proposed mathematical models allow us to estimate the approximate time of the ship's routes along alternative routes. The article shows that the complex offers route options that allow saving about 2–3 % of the total route time, which for the routes research in the article, is 2–4 hours.

Keywords: meteorological route, geographical route, optimal route, hardware and software complex, surface wind, sea waves, current

For citation:

Akmaykin, Denis A. "Test results of the shore system for optimizing marine vessel traffic" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 874–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-874-884.

УДК: 656.61.052

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ БЕРЕГОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ МОРСКИХ СУДОВ

Д. А. Акмайкин

Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

В статье представлены результаты испытаний опытного образца береговой программно-аппаратного комплекса, который позволяет строить оптимальные маршруты. Целью исследования является анализ построенных маршрутов в зависимости от влияния метеорологических условий в районе плавания. Маршруты строились с помощью созданного прототипа берегового программного комплекса, предназначенного для обработки гидрометеорологической информации с судов и метеоспутников и позволяющего создавать и корректировать оптимальный маршрут судна в процессе движения. Анализ проводился на основе фактических рейсов судов из порта Владивосток в порт Магадан, Петропавловск-Камчатский. Было выполнено сравнение кратчайших (географических) фактических маршрутов судов в рассматриваемых в исследовании рейсах и метеорологических (предложенных комплексом). В процессе анализа было определено влияние скорости и направления приповерхностного ветра, скорости и направления поверхностных морских течений и параметров морского волнения (высота волн, направление распространения и период) на движение судов. Береговым программно-аппаратным комплексом были построены метеомодели рас-

сма триваемых судов, показывающие изменение их скорости и курса в зависимости от окружающих гидрометеорологических условий и собственных параметров судна. Результат анализа показал, что береговой программно-аппаратный комплекс строит модели, подтверждающие известные зависимости влияния приповерхностного ветра и морских волн на скорость судна, при этом определяя конкретное значение изменения курса и скорости судна в зависимости от значений гидрометеорологических параметров. Показано, что построенная метеомодель судна рассчитывает изменение скорости движения при изменении курса. Также комплекс предлагает варианты маршрутов с путевым углом, компенсирующим дрейф судна. Предлагаемые математические модели позволяют оценить примерное время прохождения судна по альтернативным маршрутам. В статье показано, что комплекс предлагает варианты маршрутов, позволяющие сэкономить около 2–3 % от общего времени прохождения, что для изучаемых в статье маршрутов составляет 2–4 ч.

Ключевые слова: метеорологический маршрут, географический маршрут, оптимальный маршрут, программно-аппаратный комплекс, приповерхностный ветер, морское волнение, течение.

Для цитирования:

Акмайкин Д. А. Результаты испытаний береговой системы для оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 874–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-874-884.

Введение (Introduction)

В настоящее время при планировании судовых маршрутов существуют различные методики, реализованные производителями судового навигационного оборудования в виде судовых и береговых систем планирования маршрутов, информация в которых обрабатывается на основе современных информационных технологий, использующих большие возможности компьютерной техники [1]–[4]. Системы планирования маршрутов разных производителей имеют некоторые преимущества одних по сравнению с другими для различных типов маршрутов [5]. Однако при прокладке сложных маршрутов практически все рассмотренные системы требуют участия оператора для выбора опорных точек планируемого маршрута. Спланированный маршрут включает в себя с точки зрения длительности прогнозов: стратегическое (долгосрочное) планирование; краткосрочное планирование, основанное на текущей и прогнозной информации; тактическое планирование, направленное на оперативное управление движением судна по маршруту [6].

На базе Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского в рамках выполнения НИОКР № Госрегистрации АААА–А17–117020210014–9 «Разработка системы автоматической навигации морских подвижных объектов на основе оперативного анализа судовых, спутниковых и береговых данных» был создан прототип берегового программного комплекса для обработки информации, поступающий с судна и со спутников, позволяющий создавать и корректировать в режиме on-line оптимальный маршрут морского судна.

Целью исследования является построение маршрутов морских судов в зависимости от влияния метеорологических условий в районе плавания и анализ их эффективности по сравнению с маршрутами, построенными классическими методами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Построение маршрутов с помощью программно-аппаратного комплекса (Route calculation using a hardware and software complex). Были проведены испытания берегового программно-аппаратного комплекса (ПАК) для автоматического построения кратчайших географических, а также оптимальных метеорологических маршрутов.

Географический маршрут — такой маршрут, для которого расстояние между точками старта и финиша будет минимальным с учетом огибания запрещенных для плавания зон и удовлетворения минимальным требованиям безопасности.

Метеорологический маршрут — наиболее оптимальный маршрут с точки зрения времени его прохождения или общего расхода топлива, построенный с учетом прогнозного гидрометеорологического воздействия на судно и ограничений по безопасности мореплавания: критических параметров морского волнения и приповерхностного ветра, допустимой глубины под килем, допустимого расстояния до критической глубины.

Для проведения испытаний по договоренности с судоходной компанией FESCO [7] была предоставлена информация о маршрутах с трех рейсов на трех разных судах, выполненных в июле–августе 2016 г.:

1. Маршрут Владивосток — Петропавловск-Камчатский на судне «ФЕСКО Наварин», выполненный с 24 по 29 июля 2016 г. (рис. 1).
2. Маршрут Владивосток — Петропавловск-Камчатский на судне «ФЕСКО Новик», выполненный с 1 по 5 августа 2016 г. (рис. 2).
3. Маршрут Магадан — Владивосток на судне «ФЕСКО Посыет», выполненный с 12 по 18 августа 2016 г. (рис. 3).

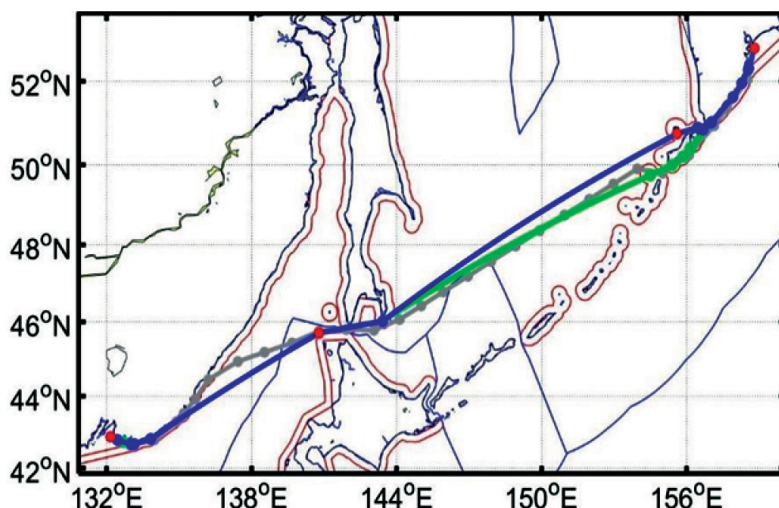


Рис. 1. Маршрут № 1 судна «ФЕСКО Наварин», Владивосток — Петропавловск-Камчатский с 24 по 29 июля 2016 г.: зеленый цвет — географический маршрут, рассчитанный с помощью берегового ПАК и проложенный через Четвертый Курильский пролив; синий цвет — географический маршрут, рассчитанный с помощью берегового ПАК и проложенный через Первый Курильский пролив; серый цвет — фактический маршрут судна

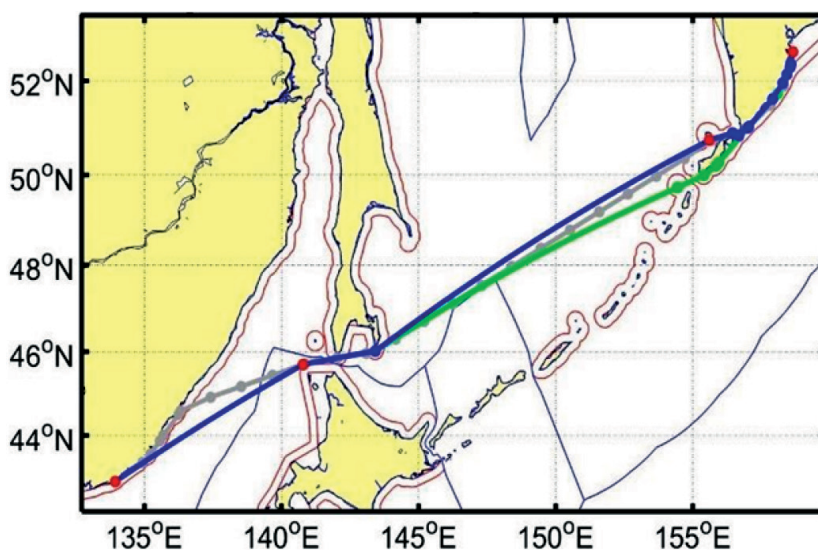


Рис. 2. Маршрут № 2 судна «ФЕСКО Новик», Владивосток — Петропавловск-Камчатский с 1 по 5 августа 2016 г.: серый цвет — фактический маршрут судна; зеленый цвет — географический маршрут, рассчитанный с помощью берегового ПАК и проложенный через Четвертый Курильский пролив; синий цвет — географический маршрут, рассчитанный с помощью берегового ПАК и проложенный через Первый Курильский пролив

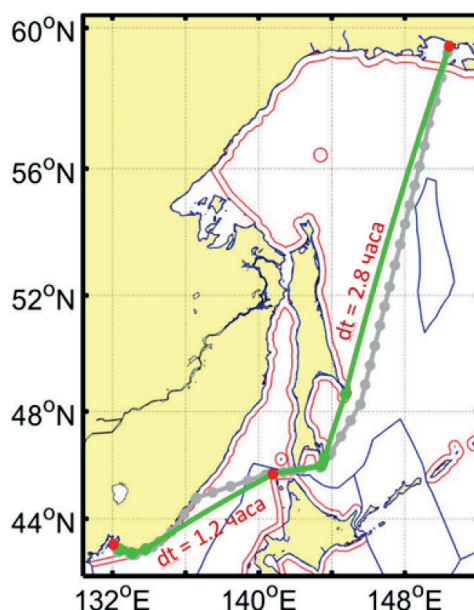


Рис. 3. Маршрут № 3 судна «ФЕСКО Посьет», Владивосток — Магадан с 12 по 18 августа 2016 г.: серый цвет — фактический маршрут судна; зеленый цвет — географический маршрут, рассчитанный с помощью берегового ПАК

Для каждого из представленных маршрутов с помощью берегового ПАК были рассчитаны альтернативные маршруты по алгоритму «географический маршрут» (отмечены зеленым или синим цветом на рис. 1–3), где в качестве входных параметров были использованы значения максимальной осадки судна, регистрируемые в ходе каждого из рейсов.

Географический маршрут является кратчайшим маршрутом, но это не гарантирует того, что он будет оптимален по времени прохождения за счет разного влияния гидрометеорологических условий [8]–[11]. Для того чтобы оценить время прохождения по альтернативным маршрутам, была дана оценка степени гидрометеорологического воздействия на скорость судна. С этой целью для каждого из представленных рейсов была разработана индивидуальная метеомодель, в которой коэффициенты подбирались таким образом, чтобы совпадали фактическая и расчетная скорость судна.

Значения скорости и направления приповерхностного ветра, скорости и направления поверхностных морских течений и параметры морского волнения (высота волн, направление распространения и период) были получены из базы реанализа данных NOMADS [12]. Пространственное разрешение данных составило 1/4 град для параметров ветра, 1/12 град для параметров течений и 1/2 град для параметров волнения. Пользуясь данной информацией, можно выполнить анализ предлагаемых комплексом маршрутов.

Анализ влияния метеорологических условий на построенные маршруты (Analysis of the influence of meteorological conditions on the plotted routes). Одним из недостатков предоставленных судовых данных является их сильная разреженность по времени измерений. Данные представляют собой оцифровку стандартного судового журнала, в котором информация записывается каждые 4 ч или при совершении маневров.

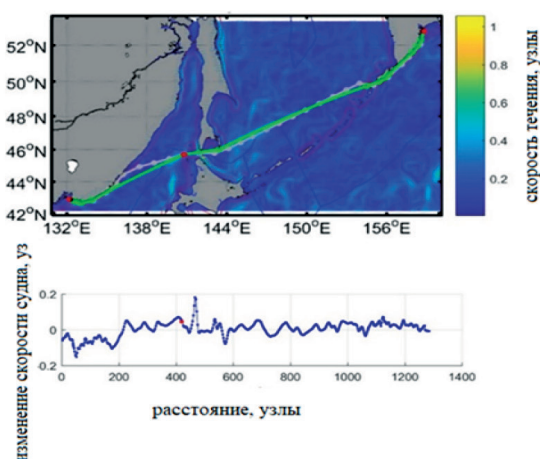
На рис. 4–6 показаны:

- поле морского волнения и соответствующие расчетные изменения скорости судна (рис. 4, а, 5, а, 6, а);
- поле поверхностных течений и соответствующие расчетные изменения скорости судна (рис. 4, б, 5, б, 6, б);

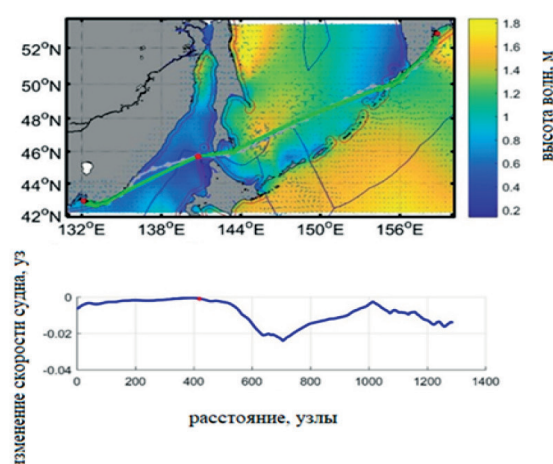
- поле приповерхностного ветра и соответствующие расчетные изменения скорости судна (рис. 4, в, 5, в, 6, в);
- сравнительный анализ фактических и расчетных скоростей судна при подобранной метеомодели соответствующего судна (рис. 4, з, 5, з, 6, з).

Отдельные выбросы на графике 4, з для судна «ФЕСКО Наварин» могут быть вызваны изменениями фактической скорости судна, не связанными с гидрометеорологическими причинами. В остальном совпадения между фактической и расчетной скоростью для судна «ФЕСКО Наварин» являются наилучшими.

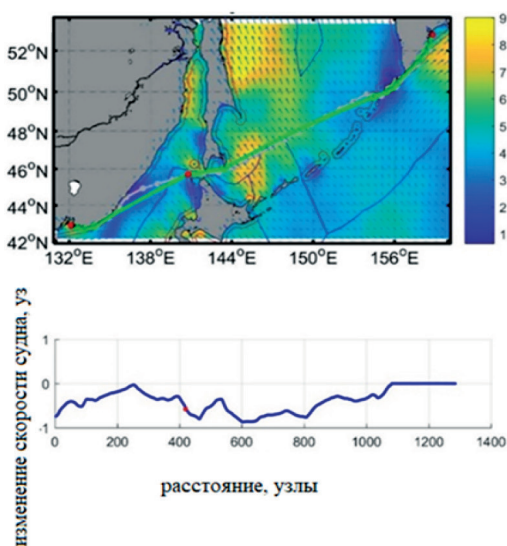
а)



б)



в)



г)

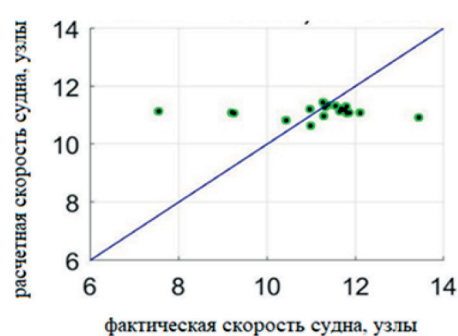


Рис. 4. Анализ гидрометеорологического воздействия на судно «ФЕСКО Наварин» вдоль маршрута № 1

Для судна «ФЕСКО Новик» предоставленных данных оказалось недостаточно для того, чтобы построить корректную метеорологическую модель (см. рис. 5, з). Этот недостаток можно устранить, используя либо автоматически записываемые судовые данные с интервалом не более 5 мин, либо информацию, полученную с большего количества рейсов, для накопления статистики поведения судна при различных комбинациях гидрометеорологического воздействия. Приемлемые результаты также получены для судна «ФЕСКО Посьет» (рис. 6, з).

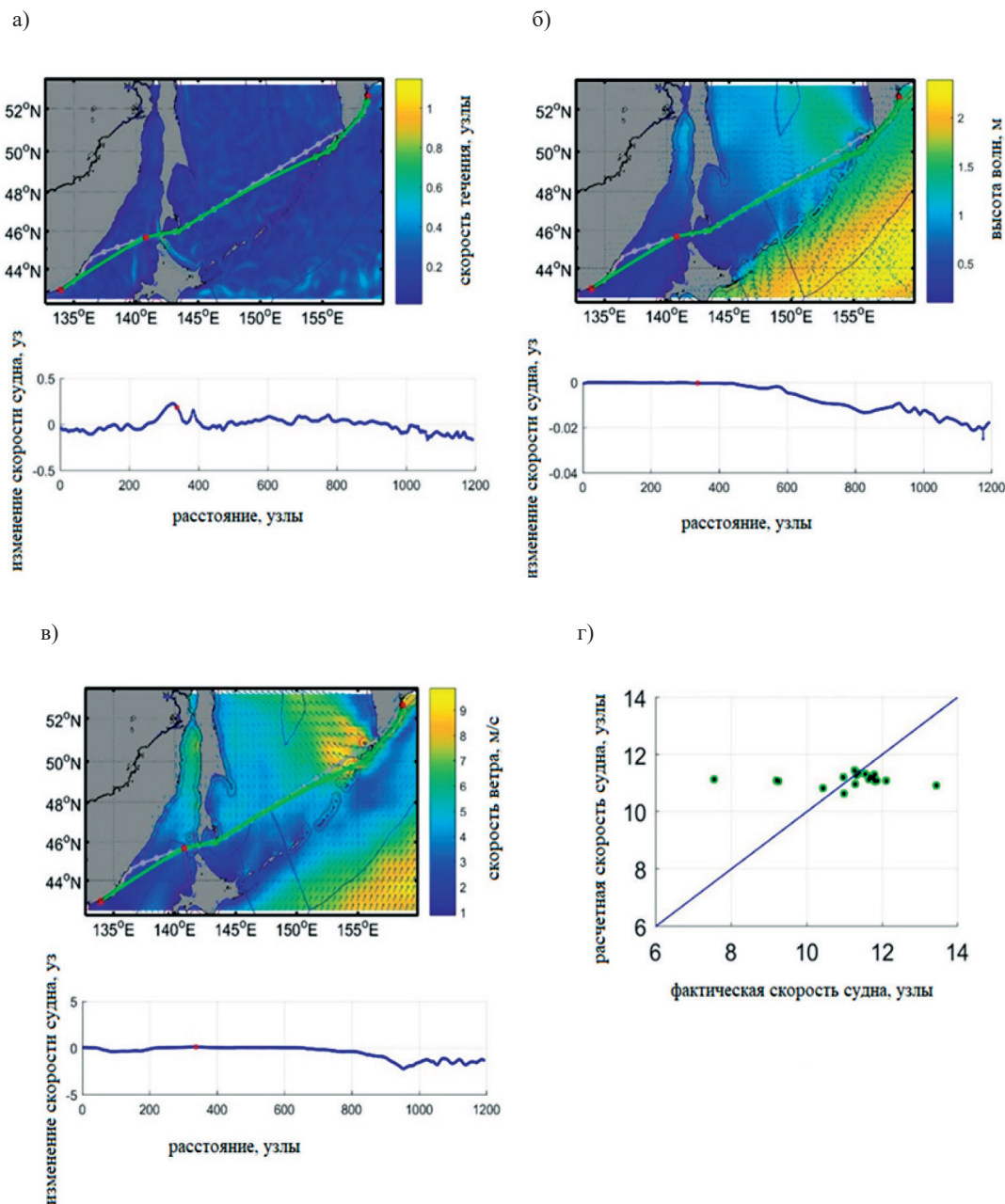


Рис. 5. Анализ гидрометеорологического воздействия на судно «ФЕСКО Новик» вдоль маршрута № 2

На рис. 7–9 показан пример работы метеомодели для судна «ФЕСКО Посьет» с заданной скоростью 10 уз и курсом 30 град:

- изменение скорости судна в % и путевого угла в градусах в зависимости от изначального курса судна и при прочих равных условиях (рис. 7, а, 9, а);
- изменение скорости судна в зависимости от изначальной скорости судна при различных значениях осадки судна и при прочих равных условиях (рис. 7, б, 9, б);
- изменение скорости судна в зависимости от скорости ветра при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 7, в);
- изменение скорости судна в зависимости от высоты волны при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 8, в);
- изменение скорости судна в зависимости от скорости течения при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 9, в);

- изменение путевого угла судна в зависимости от скорости ветра при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 7, з);
- изменение скорости судна в зависимости от периода волнения при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 8, з);
- изменение путевого угла судна в зависимости от скорости течения при различных значениях изначальной скорости судна и при прочих равных условиях (рис. 9, з).

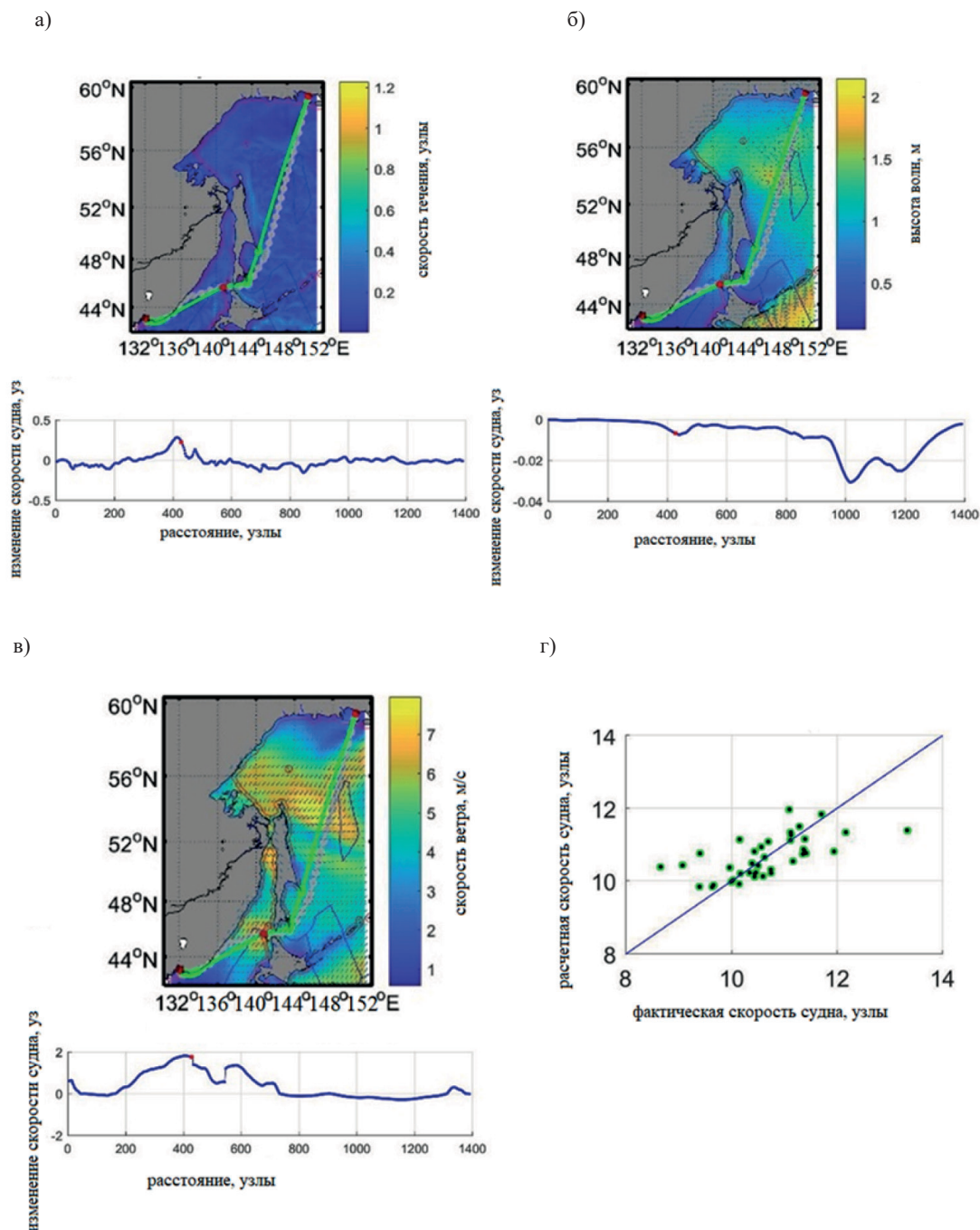


Рис. 6. Анализ гидрометеорологического воздействия на судно «ФЕСКО Посьет» вдоль маршрута № 3

В каждом из представленных случаев влияние других факторов сводится к нулю. Моделируется поведение судна при изменении его скорости и осадки, а также параметров гидрометеорологических воздействий. Аналогичные метеомодели были построены для всех трех судов.

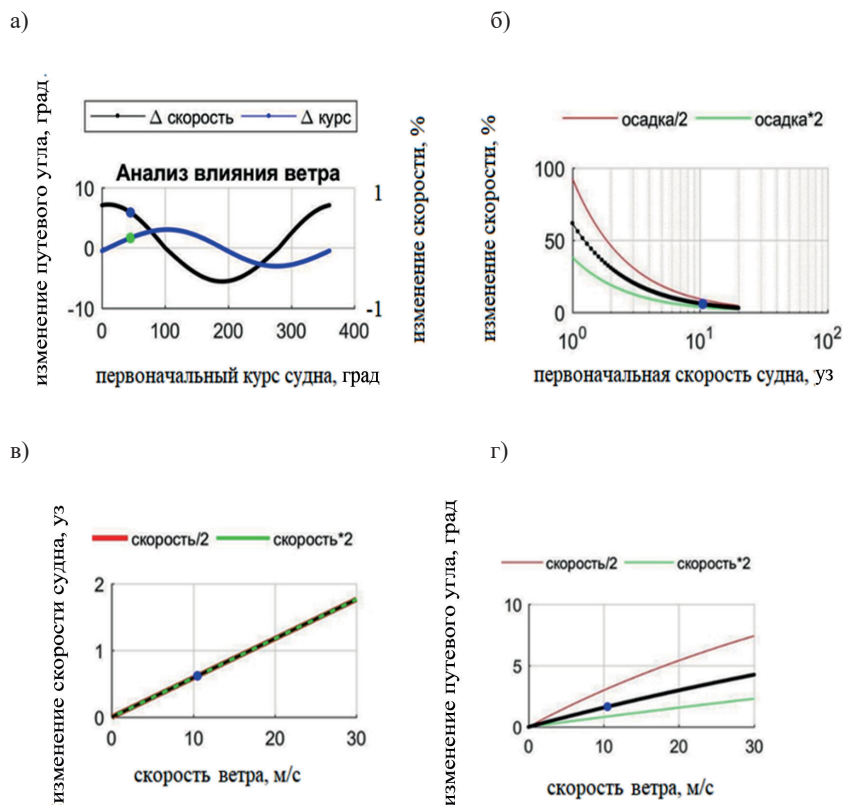


Рис. 7. Численный анализ влияния ветра на судно «ФЕСКО Посыет» при начальном направлении ветра 10 град и скорости ветра 11 уз

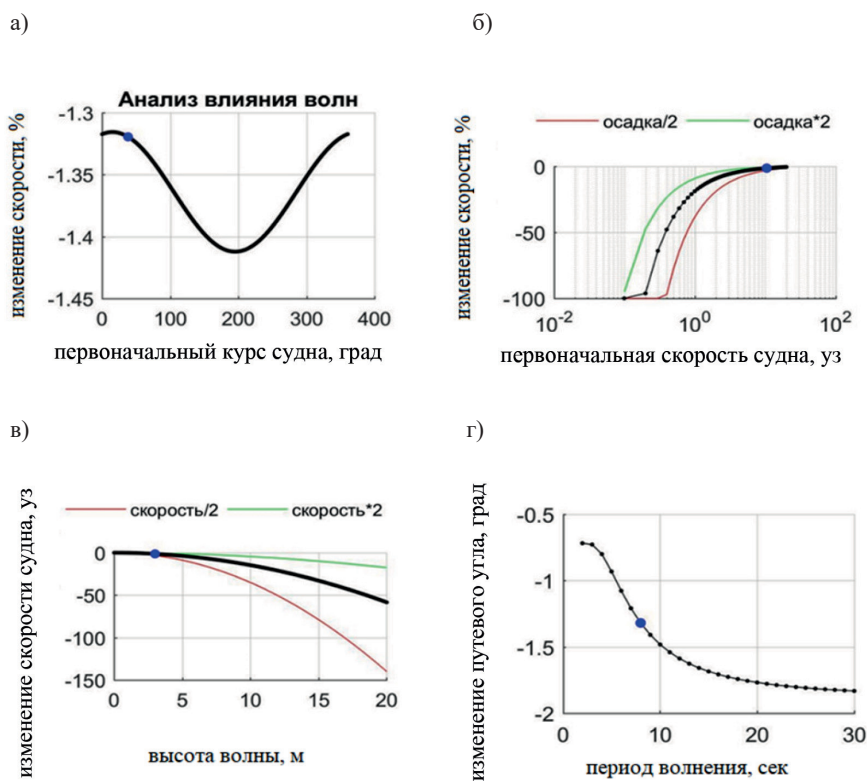


Рис. 8. Численный анализ влияния волн на судно «ФЕСКО Посыет» при начальной высоте волны 3 м, периоде волнения 8 с и направлении волнения 10 град

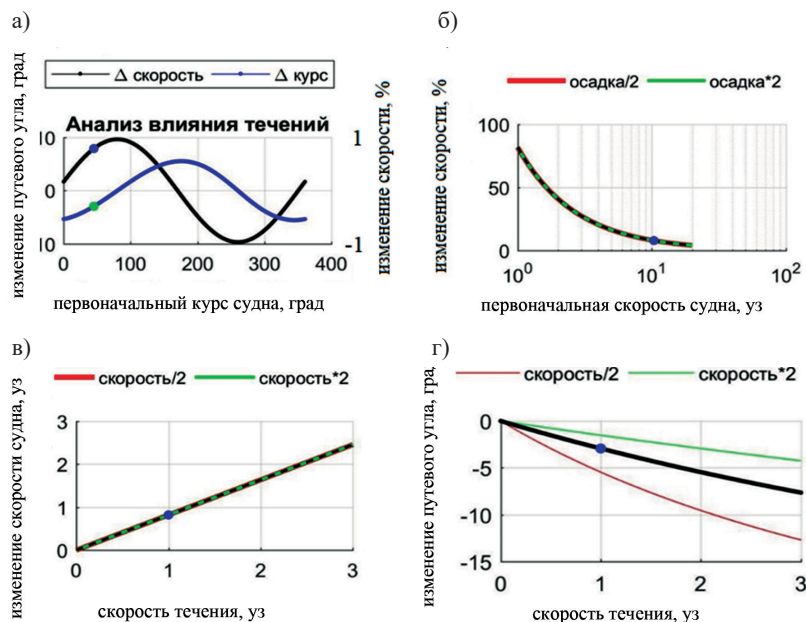


Рис. 9. Численный анализ влияния поверхностных морских течений на судно «ФЕСКО Посыет» при начальной скорости течения 1 уз и направлении течения 90 град

При анализе рис. 7–9 видно, что чем больше скорость судна и чем меньшую осадку оно имеет, тем меньшим будет воздействие приповерхностного ветра и морских волн, что согласуется с базовыми теоретическими представлениями. Отсутствие разности между быстро и медленно идущим судном на рис. 7, в и 9, в связано с тем, что скорость судна рассчитывается без учета смены курса. В случае, если необходимо точно держать заданный курс, компенсируя дрейф судна положением рулей, то у быстро идущего судна будет преимущество. Однако еще большую выгоду можно получить, если заранее выбрать курс, позволяющий при суммарном дрейфе перемещаться с требуемым путевым углом, однако это зависит от каждого конкретного случая в отдельности.

Обсуждение (Discussion)

Построенные комплексом метеомодели судов дают возможность определить время прохождения по предлагаемым программно-аппаратным комплексом (ПАК) маршрутам. Результаты вычислений представлены в таблице. Из приведенных данных видно, что разницу между временем t_0 и t_1 можно считать как оценку ошибки моделей, а также на рис. 4, 2, 5, 2, 6, 2, видно, что метеомодель судна для маршрута № 2 считалась с наибольшей ошибкой.

Сравнение фактического времени прохождения маршрутов с расчетным временем по разным маршрутам

Маршрут	Фактическое время вдоль фактического маршрута ¹	Расчетное время вдоль фактического маршрута с учетом метеомодели, предлагаемой ПАК	Расчетное время вдоль географического маршрута без учета метеомодели, предлагаемой ПАК	Расчетное время вдоль метеомаршрута, предложенного ПАК
	t_0 , ч	t_1 , ч	t_2 , ч	t_3 , ч
Маршрут № 1	112	111,45 (–0,49 %)	108,79 (–3,21 %)	109,07 (–2,62 %)
Маршрут № 2	100	99,3 (–0,7 %)	98,26 (–1,74 %)	98,83 (–1,17 %)
Маршрут № 3	137,63	136,84 (–0,58 %)	133,66 (–2,93 %)	135,27 (–1,74 %)

¹ Время приведено между контрольными точками старта и финиша с корректными данными, положение точек может не совпадать с местонахождением портов отправления и прибытия.

Согласно табл. 1, во всех трех случаях использование алгоритма построения географического маршрута позволяет сэкономить около 2–3 % от общего времени прохождения, или 2–4 ч в абсолютном эквиваленте. В пересчете на количество топлива это составляет 1–3 т (или 400–1200 долл. США) за 5–6-дневный рейс с одного судна.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, береговое ПАК в текущем состоянии с имеющимся алгоритмическим аппаратом, заданными параметрами полей гидрометеорологических характеристик и с текущими характеристиками судовых метеомоделей, может быть полезно использовано путем следующих действий:

- построение кратчайших географических маршрутов, прогноз времени прохождения вдоль заданных маршрутов;
- построение индивидуальной метеомодели судна;
- прогноз опасных для судна метеоявлений вдоль заданных маршрутов;
- определение наиболее выгодного времени старта для совершения перехода в течение ближайших трех дней или периода плавания в течении сезона.

Использование берегового ПАК в этом случае позволяет сократить время прохождения маршрутов до 3 %, тем самым давая оптимальный маршрут короче по времени либо экономичнее по расходу топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерябин В. В.* Планирование перехода в электронных картографических навигационных информационных системах (ЭКНИС): учеб. пособие. — Электронное издание локального распространения / В. В. Дерябин. — СПб.: Научные технологии, 2022. — EDN AJQXFZ.
2. *Сухина М. И.* Гидрометеорологическое обеспечение судовождения: учеб.-метод. пособие / М. И. Сухина, Г. В. Белокур, А. В. Головкин. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 283 с. DOI: 10.12737/textbook_5c7cd08e298529.81917710. — EDN ZBNRIL.
3. *Гриняк В. М.* Планирование маршрутов судов на основе кластеризации ретроспективных данных трафика акватории / В. М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078. — EDN UVXZYX.
4. *Yuan J.* A second-order dynamic and static ship path planning model based on reinforcement learning and heuristic search algorithms / J. Yuan, J. Wan, X. Zhang *et al.* // J Wireless Com Network, 128 (2022). DOI: 0.1186/s13638-022-02205-4.
5. *Акмайкин Д. А.* Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С. Ф. Ключева // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251. — EDN YLFWHZ.
6. *Акмайкин Д. А.* Основные принципы и этапы планирования маршрутов судов / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, А. В. Гамс // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 1(106). — С. 50–54. DOI: 10.34046/aumsuomt106/8. — EDN FQEEBR.
7. FESCO. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.fesco.ru/ru/> (дата обращения: 23.09.2024).
8. *Нуриев Р. А.* Процедура выбора оптимального пути океанского перехода при штормовом плавании / Р. А. Нуриев, А. А. Ершов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 625–635. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-625-635. — EDN HQEUME.
9. *Гриняк В. М.* Планирование маршрутов судов с учётом интенсивности движения на морской акватории / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. А. Петров // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2023. — № 4. — С. 3–10. DOI: 10.36535/0236-1914-2023-04-1. — EDN CCSKNN.
10. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model / Minjoo Choi, Hyun Chung, Hajime Yamaguchi, Keisuke Nagakawa // Cold Regions Science and Technology. — 2015. V. 109. — PP. 61–69. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.10.001.

11. Акмайкин Д. А. Поиск оптимального пути судна на основе различных критериев / Д. А. Акмайкин, В. В. Бочарова, С. Ф. Ключева, А. В. Гамс // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 3(108). — С. 72–78. DOI: 10.34046/aumsuomt108/11. — EDN KNLQGG.

12. Rutledge G. K. NOMADS: A climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration / G. K. Rutledge, J. Alpert, W. Ebisuzaki // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2006. — Vol. 87. — Is. 3. — Pp. 327–342. DOI: 10.1175/BAMS-87-3-327.

REFERENCES

1. Deryabin, V. V. *Planirovanie perekhoda v elektronnykh kartograficheskikh navigatsionnykh informatsionnykh sistemakh (EKNIS): Uchebnoe posobie. Elektronnoe izdanie lokalnogo rasprostraneniya*. Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022.

2. Sukhina, M. I., G. V. Belokur and A. V. Golovko. *Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya: Uchebno-metodicheskoe posobie*. Moskva: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu «Nauchno-izdatelskij tsentr INFRA-M», 2019. DOI: 10.12737/textbook_5c7cd08e298529.81917710.

3. Grinyak, V. M. “Planirovanie marshrutov sudov na osnove klasterizatsii retrospektivnykh dannykh trafika akvatorii” *Territoriya novykh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa* 13.2 (2021): 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078.

4. Yuan, J., Wan, J., Zhang, X. et al. A second-order dynamic and static ship path planning model based on reinforcement learning and heuristic search algorithms. *J Wireless Com Network* 128 (2022). DOI: 10.1186/s13638-022-02205-4.

5. Akmajkin, D. A., D. B. Khomenko and S. F. Klyueva “Obzor funktsionalnykh vozmozhnostej i perspektivy sovremennykh avtomatizirovannykh sistem planirovaniya marshruta sudna” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.

6. Akmajkin, D. A., V. V. Bocharova and A. V. Gams “Osnovnye printsipy i etapy planirovaniya marshrutov sudov” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(106) (2023): 50–54. DOI: 10.34046/aumsuomt106/8.

7. FESCO. Web. 23 Sept. 2024 <<https://www.fesco.ru/ru/>>.

8. Nuriev, R. A. and A. A. Ershov “Protседura vybora optimalnogo puti okeanskogo perekhoda pri shtormovom plavanii” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 625–635. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-625-635.

9. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisilnyj and V. A. Petrov “Planirovanie marshrutov sudov s uchytom intensivnosti dvizheniya na morskoj akvatorii” *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informatsionnyj sbornik* 4 (2023): 3–10. DOI: 10.36535/0236-1914-2023-04-1.

10. Minjoo Choi, Hyun Chung, Hajime Yamaguchi, Keisuke Nagakawa «Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model» *Cold Regions Science and Technology* 109 (2015): 61–69.

11. Akmajkin, D. A., V. V. Bocharova, S. F. Klyueva and A. V. Gams “Poisk optimalnogo puti sudna na osnove razlichnykh kriteriev” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(108) (2023): 72–78. DOI: 10.34046/aumsuomt108/11.

12. Rutledge, Glenn K., Jordan Alpert, and Wesley Ebisuzaki. “NOMADS: A climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 87.3 (2006): 327–342. DOI: 10.1175/BAMS-87-3-327.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690003, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а, e-mail: akmaykin@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin Denis A. — Ph.D., Associate Professor; Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Maritime state University named after admiral G. I. Nevelskoy, 50A, Verkhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russia e-mail: akmaykin@msun.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2024 г.

Received: Nov. 7, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897

IMPACT OF YAKUTIA WILDFIRES ON ICE CONDITIONS OF PARTS OF THE LAPTEV SEA SHIPPING LANES

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

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

² — Siberian Fire Rescue Academy, Zheleznogorsk, Russian Federation

The article aims to verify the hypothesis about the impact of largescale Yakutia wildfires on the ice concentration in certain parts of the Laptev Sea shipping lanes. The verification was performed using data on ice concentration monthly and daily means obtained from GLORYS12v1 reanalysis and the catalogue of Aqua and Shizuku space missions. Information on the scale and consequences of Yakutia wildfires was obtained from the remote monitoring information system of the Federal Forestry Agency. The research methodology involved the use of statistical methods, including correlation analysis. The study comprised 2001–2023 period. A significant correlation between forest burning indicators and the ice conditions in certain areas of the sea has been confirmed. The most likely cause of the identified relationship was named to be the effect of an ice cover albedo decrease due to depositing of the soot brought by southern winds from burnt forest areas, as well as earlier and warmer floods from large Siberian rivers. It has been established that in the years following periods of large-scale fires, a downward trend in ice concentration manifests itself in a number of sea areas. In the spring–summer period (May — June) they are found in the northwestern and southern parts of the sea (in the areas of formation of fast ice polynyas), which favors an earlier navigation opening. In the autumn months, due to the sea waters having consumed more heat during the summer, active ice formation begins later (October — November), contributing to its later closure. The extent to which wildfires impact changes in the ice concentration of the Laptev Sea against the backdrop of other significant factors (variations in temperature, solar insolation, wind conditions, sea level, etc.) is not straightforward and needs further research. Provided that current trends in climate change persist, it is safe to predict that in the years following periods of intense wildfires, the period of safe autonomous navigation for high ice class vessels (Arc6 and Arc7) in the Laptev Sea will be longer than normal and will comprise all months from May to December.

Key words: Laptev Sea, Northern Sea Route, ice concentration, wildfire, shipping, trend, correlation, navigation period, polynya.

For citation:

Podporin, Sergey A. and A. V. Kholoptsev. “Impact of Yakutia wildfires on ice conditions of parts of the Laptev sea shipping lanes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.6 (2024): 885–897. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897.

УДК 656.61.052: 614.841.42

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ЯКУТИИ НА ЛЕДОВУЮ ОБСТАНОВКУ НА УЧАСТКАХ СУДОХОДНЫХ ТРАСС МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

С. А. Подпорин¹, А. В. Холопцев^{1,2},

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»,
г. Железногорск, Российская Федерация

Целью статьи является проверка гипотезы о влиянии масштабных лесных пожаров в Якутии на ледовитость определенных участков судоходных трасс моря Лаптевых. Проверка выполнена на основе данных о среднемесячной и среднесуточной ледовитости, полученных из базы реанализа GLORYS12v1 и каталога спутниковых миссий Aqua и Shizuku. Информация о масштабах и последствиях лесных пожаров получена из информационной системы Федерального агентства лесного хозяйства. Методика исследования включала использование статистических методов, в том числе корреляционного анализа временных

рядов оцениваемых показателей, составленных за период 2001–2023 гг. Подтверждено наличие значимой корреляции между показателями горимости лесов Якутии и ледовой обстановкой в некоторых районах моря Лаптевых. Наиболее вероятной причиной выявленной взаимосвязи по-видимому является эффект снижения альбедо ледяного покрова за счет оседания на нем сажки, приносимой ветрами южных румбов с горельников, и более ранние и теплые половодья на крупных сибирских реках. Установлено, что в годы, следующие за периодами крупных лесных пожаров, имеет место тенденция к снижению ледовитости на ряде участков акватории моря. В весенне-летний период (май–июнь) такие участки обнаружены в северо-западной и южной частях моря (в районах образования заприпайных полыней), что благоприятствует более раннему открытию навигации. Отмечается, что в осенние месяцы, очевидно, за счет сильнее прогретых в летний период морских вод активное ледообразование начинается позже (октябрь–ноябрь), способствуя более позднему ее закрытию. Обращается внимание на то, что степень влияния лесных пожаров на изменения ледовитости в море Лаптевых на фоне действия других значимых факторов (вариации температурного режима, солнечной инсоляции, ветрового режима, уровня моря и др.) требует дополнительного изучения. Однако при условии, что современные тенденции климатических изменений сохранятся, можно прогнозировать, что в годы, следующие за периодами интенсивных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия), суда с соответствующим ледовым классом смогут осуществлять самостоятельное плавание в море Лаптевых в течение более длительного периода.

Ключевые слова: море Лаптевых, Северный морской путь, ледовитость, лесные пожары, судоходство, тенденция, корреляция, навигационный период, полынья.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Влияние лесных пожаров в Якутии на ледовую обстановку на участках судоходных трасс моря Лаптевых / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 885–897. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-885-897.

Введение (Introduction)

Развитие судоходства в Арктике является одним из главных приоритетов транспортной стратегии Российской Федерации. Арктические моря отличаются сложными условиями плавания на протяжении большей части года, вызванными прежде всего ледовой обстановкой. В этой связи совершенствование методик ее долгосрочного прогнозирования является актуальной проблемой для океанографии и безопасности судоходства. Наибольший интерес ее решение представляет для морских и океанических регионов, через которые проходят трассы Северного морского пути (далее — СМП). Одни из наиболее сложных участков СМП расположены в море Лаптевых. В настоящее время устойчивая навигация в этом регионе возможна с июля по октябрь. Запланированное расширение флота арктических судов ледового класса Arc6 и Arc7 и продолжающееся потепление глобального климата позволяют в ближайшие десятилетия допустить смещение сроков начала навигации на май–июнь и ее окончания на ноябрь–декабрь [1], [2]. Важность моря Лаптевых, помимо транзитного судоходства и Северного завоза, обусловлена также наличием на его шельфе многочисленных участков, признанных перспективными для освоения месторождений углеводородов (лицензии принадлежат ПАО «Роснефть») [3]–[5].

Среди прогнозов развития ледовой обстановки в замерзающих морях важное место занимают долгосрочные прогнозы, заблаговременность которых, согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации, составляет от нескольких месяцев до нескольких лет. Долгосрочные прогнозы представляют практический интерес для судоходных компаний и ведомств, планирующих развитие и подготовку флота для будущих периодов навигации. Основой существующих представлений о принципах разработки таких прогнозов являются работы [6]–[9]. Установлено, что ледовая обстановка формируется под воздействием многих факторов, часть из которых являются ненаблюдаемыми. Влияние других при этом может быть вполне очевидным, а тенденции их развития можно достаточно надежно оценивать.

При разработке прогноза важно понимать, в каких именно районах моря действие того или иного фактора (на фоне других) является статистически значимым и, как следствие, требующим учета при оценке развития ледовой обстановки в будущем. Заблаговременный учет как можно большего количества статистически значимых факторов позволит улучшить качество долго-

срочных прогнозов условий плавания, снизить риски для судоходства и повысить эффективность планирования морских переходов.

В настоящей работе оценивается влияние на состояние судоходных трасс моря Лаптевых двух факторов:

- вариаций альбедо ледяного покрова моря;
- изменений средней температуры речного стока, поступающего в море в результате половодий на реках Сибири.

Высказывается гипотеза о том, что оба фактора могут находиться в статистически значимой связи с опасным и являющимся все более распространенным явлением: лесными пожарами на территории республики Саха (Якутия). В первом случае перенос сажи ветрами южных румбов может приводить к ее осаждению на ледяном покрове и последующему более быстрому таянию льда в период полярного дня. Во втором случае более теплый и ранний речной сток во время половодий может вызывать ускоренное развитие полыней (или изменение их конфигурации), и, как следствие, повышение навигационной доступности определенных участков морских акваторий.

Статистическая значимость, а также локализация подобного влияния неочевидны и требуют проверки. В случае, если указанная гипотеза подтвердится, данные о количестве и распространенности лесных пожаров в конкретном году могут использоваться для улучшения качества прогнозов развития ледовой обстановки на участках судоходных трасс на следующий год.

Целью настоящей работы является проверка гипотезы о влиянии масштабных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия) на состояние некоторых участков судоходных трасс моря Лаптевых. Для ее достижения были решены следующие задачи:

1. Выявлены районы моря Лаптевых, в которых в период с мая по декабрь среднемесячная ледовитость значимо коррелирована с количеством лесных пожаров на территории Якутии, имевших место в предыдущем году.
2. Выявлены аналогичные районы, в которых в тот же период года прослеживается значимая корреляция среднемесячной ледовитости с распространенностью (площадью) пожаров, имевших место годом ранее.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В период ледовой обстановки навигация в море Лаптевых возможна, если маршруты плавания составлены с учетом расположения основных ледовых массивов и конфигурации полыней. Образование и распространенность последних зависят в том числе от характеристик стока крупных сибирских рек (Лена, Яна, Анабар, Оленек) в период половодий, а также от интенсивности таяния морского льда в период полярного дня. Оба процесса могут иметь непосредственную связь с происходящими на территории Якутии лесными пожарами. Рассмотрим возможные причины такой связи.

Сроки и масштабы половодий в устьевых областях рек можно достаточно надежно прогнозировать. В зависимости от площади водосборного бассейна, длины реки и ее притоков, воды, собранные в период половодья, достигают ее устья за период от нескольких недель до нескольких месяцев. В этой связи вариации поверхностных температур вод моря Лаптевых на приустьевом взморье, определяющие интенсивность разрушения в этом районе ледяного покрова, запаздывают по отношению к изменениям температур поступающего в реку поверхностного стока приблизительно на такое же время [10]. Следовательно, можно считать, что одним из факторов межгодовых изменений среднемесячных значений ледовитости (далее — СМЛ) отдельных участков акватории моря Лаптевых являются вариации средней температуры поверхностного стока, поступающего во впадающие в море крупные реки [10], [11].

Существование участков территории водосборного бассейна р. Лены, где межгодовые вариации их термического режима для весенних месяцев значимо связаны с изменениями поверхностных температур участков ее приустьевых взморья в море Лаптевых, запаздывающих на несколько месяцев, установлено в [12], [13]. Обнаружены такие участки и на территории бассейна р. Яны [12]. Известно, что причинами изменений термического режима некоторого участка водосборного бассейна реки

могут служить не только вариации существующих в нем метеоусловий, но и перемены состояния соответствующего фитоценоза [14]. В лесу, пострадавшем в предыдущем году от пожара, весной снежный покров сходит раньше, а соответствующая лесная подстилка прогревается быстрее, что приводит к повышению средней температуры образующегося поверхностного стока.

Масштаб лесных пожаров и степень их влияния на температуру речного стока можно объективно оценивать по двум показателям: количеству лесных пожаров (далее — КЛП), имевших место на территории бассейна реки в предыдущем году, и суммарной площади, пройденной огнем (далее — ППО). Таким образом, можно предположить, что межгодовые изменения средних значений КЛП и ППО на территории Якутии являются значимыми факторами вариаций СМЛ на некоторых участках акватории моря Лаптевых. Еще одним изучаемым фактором изменчивости СМЛ, обусловленным влиянием масштабных лесных пожаров, могут служить вариации альbedo ледяного покрова моря [15], вызванные изменениями потоков сажи и других частиц пирогенных аэрозолей, которые в осенне — зимние месяцы приносит на акваторию моря ветер. Как известно, в эти месяцы над внутренними регионами Евразии господствует Сибирский антициклон [16], вследствие чего над территорией Якутии и акваторией моря Лаптевых преобладают ветры южных румбов. Следовательно, допустимым является следующее предположение: чем больше значения показателей горимости лесов Якутии (КЛП и ППО) в отдельно взятом году, тем больше сажи будет вынесено на морской ледяной покров в следующем году.

Связь межгодовых изменений КЛП и ППО в Якутии с запаздывающими по отношению к ним вариациями СМЛ в ряде районов моря Лаптевых можно считать причинной. Однако статистическая значимость подобной связи на фоне воздействия других влияющих на СМЛ факторов [6], [9] далеко не очевидна и требует подтверждения. Если значимость указанной связи для каких-либо районов подтвердится, то данный факт можно будет учитывать при разработке (или корректировке) долгосрочных прогнозов межгодовых вариаций СМЛ, соответствующих консервативному сценарию развития будущего. Последний предполагает, что связи изучаемого процесса с факторами, которые были значимы в прошлом, останутся таковыми и в будущем. Поскольку климат изменяется, очевидно, что такой сценарий может соответствовать фактическим изменениям ледовой обстановки в будущем лишь приближенно. Тем не менее, чем меньше заблаговременность разрабатываемого прогноза, тем, как правило, ближе фактический сценарий дальнейших изменений к консервативному.

В качестве источника данных об СМЛ в настоящем исследовании использованы данные реанализа GLORYS12v1, поддерживаемого европейской службой Copernicus¹, а также данные фактических измерений на полярных станциях Росгидромета². Охват последних крайне ограничен в силу немногочисленности мониторинговой сети. Вместе с тем данные физических измерений позволили провести выборочное тестирование результатов реанализа и в целом подтвердить их валидность. В частности, было установлено, что для месяцев май — декабрь относительные погрешности оценок СМЛ, основанных на информации реанализа для периода 2000–2023 гг., составляют не более 7 %, а их смещения не превышают 5 %. Данные GLORYS12v1 доступны за каждый час с 1.01.1993 г. по настоящее время с дискретностью по координатам 0,0833°.

Данные о КЛП и ППО на территории Якутии, соответствующие периоду 2000–2023 гг., получены из информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства³. По данным реанализа для всех пунктов его координатной сетки, относящихся к морю Лаптевых, и каждых суток, соответствующих месяцам май — декабрь периода 2000–2023 гг., были сформированы временные ряды СМЛ. Аналогично сформированы ряды КЛП и ППО. Далее с использованием стандартных методов математической статистики выполнен их корреляционный анализ.

¹ База данных реанализа GLORYS12v1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFORMATION.

² ЕСИМО — «Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portal.esimo.ru/portal/>.

³ Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml.

В качестве показателя тесной связи между изучаемыми процессами рассматривалось значение коэффициента корреляции (далее — КК) соответствующих временных рядов. В последних предварительно были скомпенсированы линейные тренды [17]. Решение о статистической значимости связи принималось, если значение КК, полученное для периода 2000–2023 гг., по модулю превышало пороговый уровень, определенный по критерию Стьюдента с учетом количества степеней свободы изучаемых временных рядов, оцениваемого по автокорреляционным функциям. Порог значимости корреляции выбран 0,95. Установлено, что рядам СМЛ, КЛП и ППО соответствует количество степеней свободы не менее 18. Порог значимости модуля КК в этом случае равен 0,46. Отдельно рассмотрен также порог 0,55, соответствующий достоверности вывода о значимости корреляции 0,99.

Из теории статистики известно [17], что выбранная характеристика тесной статистической связи корректна при условии, что изучаемые процессы стационарны. Исследуемые в настоящей работе вариации СМЛ, КЛП и ППО можно считать таковыми только приближенно, в связи с чем полученные результаты также следует интерпретировать только на качественном уровне.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

В рамках решения первой задачи в соответствии с изложенной методикой выявлялись районы моря Лаптевых, в которых имела место статистически значимая корреляция межгодовых изменений СМЛ с опережающими их изменениями КЛП на территории Якутии для месяцев с мая по декабрь. Оценка выполнялась в период 2001–2023 гг. Результаты представлены на рис. 1, где красными линиями схематично показаны трассы СМП: 0 — пролив Вилькицкого и подходы к нему; 1 — транзитный высокоширотный маршрут к северу от Новосибирских островов; 2 — транзитный путь через пролив Санникова; 3 — прибрежные трассы с заходом в порты и реки.

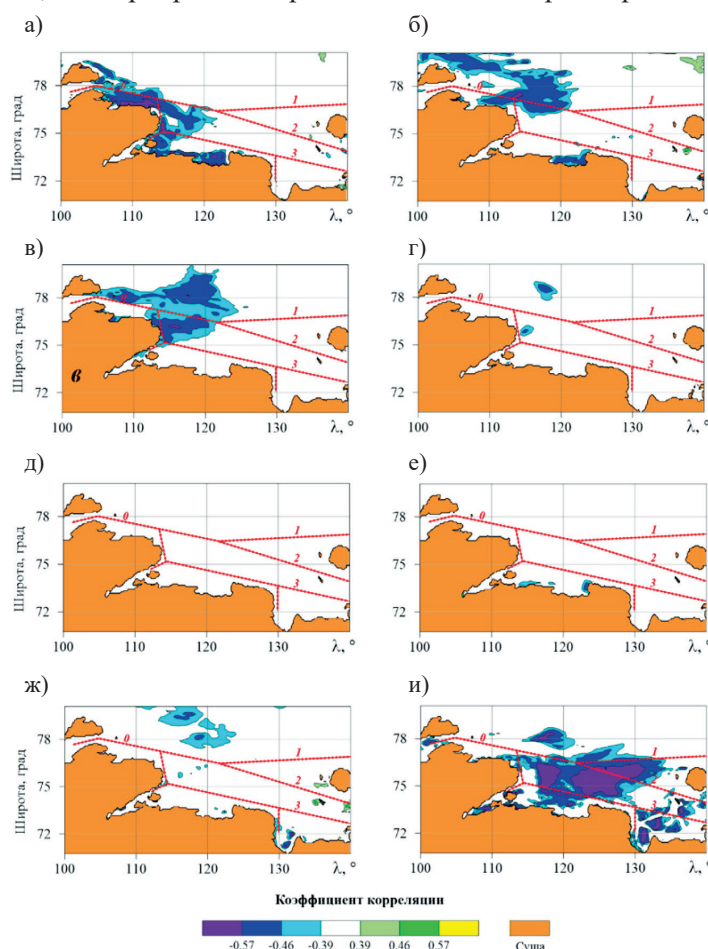


Рис. 1. Районы значимой корреляции межгодовых изменений среднемесячной ледовитости с опережающими их на один год изменениями количества лесных пожаров на территории Якутии для месяцев: а — май; б — июнь; в — июль; г — август; д — сентябрь; е — октябрь; ж — ноябрь; и — декабрь

Как следует из рис. 1, а, районы, в которых в мае обнаружена значимая отрицательная корреляция межгодовых изменений СМЛ в 2001–2023 гг. с вариациями КЛП в Якутии в 2000–2022 гг., находятся вдоль восточных побережий архипелага Северная Земля, восточного побережья п-ва Таймыр, у южного побережья моря Лаптевых, от о-ва Большой Бегичев до западного края дельты р. Лены. Такие районы примерно соответствуют местам формирования заприпайных полыней в ледяном покрове западной части моря Лаптевых. Расположение последних, в соответствии с [18], показано на рис. 2.



Рис. 2. Схема расположения заприпайных полыней моря Лаптевых:
ВСЗП — Восточная Североземельская; СВТП — Северо-Восточная Таймырская;
ВТП — Восточная Таймырская; АНЛП — Анабарско-Ленская;
ЗНЛП — Западная Новосибирская; СНЛП — Северная Новосибирская

Соответствие выявленных районов местам формирования заприпайных полыней можно объяснить переносом частиц сажи в осенне-зимние месяцы и их последующим осаждением на ледяной покров, в том числе на молодой лед, образующийся в полынях. В условиях начала полярного дня и активной инсоляции ледяного покрова таяние последнего ускорится.

На рис. 1, б показано, что в июне районы значимой корреляции сохраняются на северо-западе моря к востоку от архипелага Северная Земля и п-ва Таймыр. В южной части моря их площадь значительно меньше, вероятно, ввиду того, что в июне над регионом продолжается полярный день, а в устьевых областях впадающих крупных рек происходят половодья. В результате влияние осевших на ледяной покров частиц сажи на процесс таяния ледяного покрова ослабевает на фоне совокупности других факторов, влияние которых становится преобладающим.

Из рис. 1, в следует, что в июле районы корреляции сохраняются в северо-западной части моря, в то время как в его южной части площади образовавшихся полыней и разводий уже столь велики, что влияние изучаемого фактора не ощущается. На рис. 1, г–е показано, что в августе – октябре районы значимой корреляции практически отсутствуют. Море в значительной степени свободно от ледяного покрова. Рис. 1, ж свидетельствует о том, что в ноябре искомые районы присутствуют в северной части моря, а также на некоторых участках прибрежных акваторий, где начинает формироваться припай. Данные рис. 1, и указывают на то, что в декабре изменения КЛП предыдущего года продолжают влиять на образование ледяного покрова на значительной части акватории моря. Интерпретировать подобный результат можно следующим образом: чем больше в предшествующем году было лесных пожаров, тем интенсивнее таял ледяной покров моря в мае –

июле и тем больших размеров достигали полыньи к августу. По этой причине в августе и сентябре количество суммарной солнечной радиации, поглощенной водами моря, было больше, поверхностная температура выше, а ледообразование начиналось позднее. Последнее, по-видимому, и является причиной уменьшения СМЛ в декабре на многих участках моря.

Как видно из рис. 1, *а–в, и*, в мае – июле и декабре районы корреляции находятся на пути сухоходных трасс: в мае – июле они расположены по маршрутам 0 (подходы к проливу Вилькицкого и трасса вдоль побережья п-ва Таймыр) и частично 3 (подходы к Хатангскому заливу), в декабре – в южной и центральной частях моря на маршрутах 1–3. Данный факт целесообразно учитывать при прогнозировании условий судоходства в указанных районах.

В рамках решения второй задачи для тех же месяцев выявлялись районы значимой корреляции СМЛ и ППО. Результаты представлены на рис. 3.

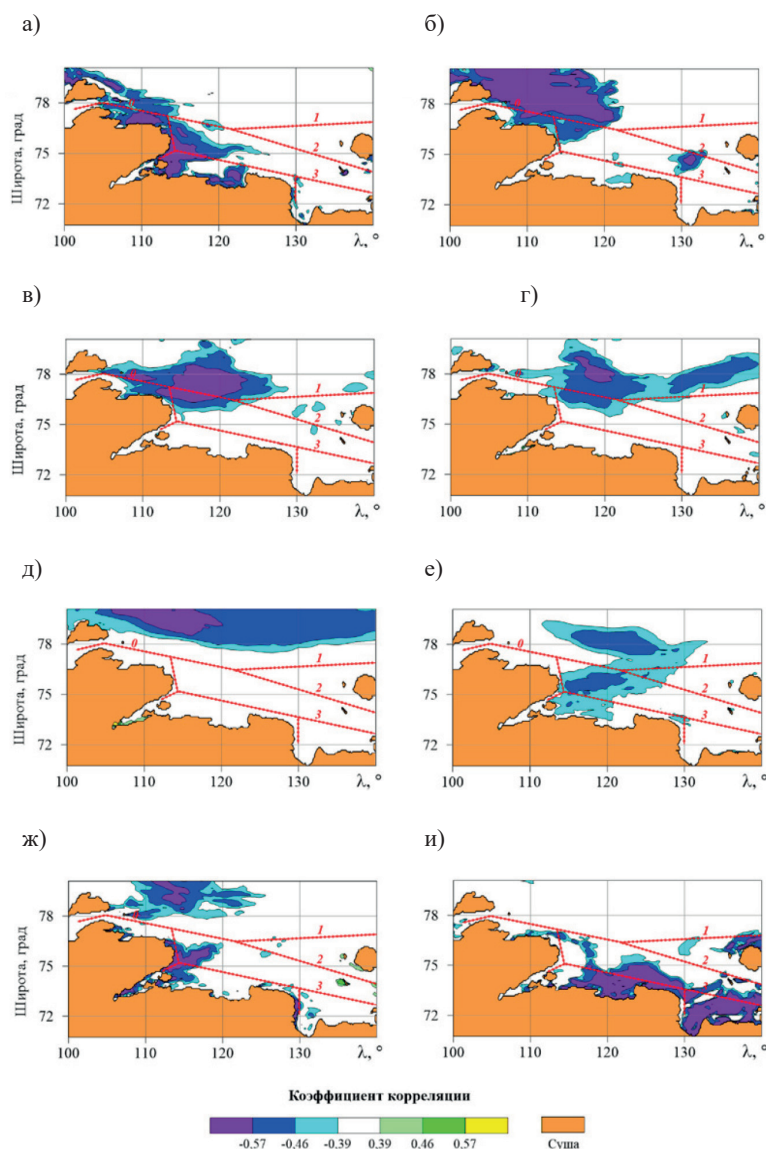


Рис. 3. Районы значимой корреляции межгодовых изменений среднемесячной ледовитости с опережающими их на один год изменениями площади, пройденной огнем лесных пожаров на территории Якутии, для месяцев:

а — май; *б* — июнь; *в* — июль; *г* — август; *д* — сентябрь;
е — октябрь; *ж* — ноябрь; *и* — декабрь

Как следует из рис. 3, *а–в*, расположения районов значимой отрицательной корреляции в мае – июле были в целом подобны расположениям, приведенным на рис. 1, однако суммарные

площади таких районов и степень корреляции были больше. В июне район значимой корреляции обнаружен также на приустьевом взморье р. Лены. В августе (см. рис. 3, *з*), сентябре (см. рис. 3, *д*) и октябре (см. рис. 3, *е*) в северной и центральной части моря выявлена сильная корреляция, которой не было при оценке влияния КЛП. В ноябре (см. рис. 3, *ж*) искомые районы обнаружены к востоку от архипелага Северная Земля, к востоку от п-ва Таймыр, включая приустьевое взморье р. Хатанги, а также на приустьевом взморье р. Лены. В декабре (см. рис. 3, *и*) такие районы выявлены во всей южной части моря, включающей приустьевые взморья р. Анабар, Оленёк, Лена и Яна, а также к северу от о-ва Котельный (район образования Северной Новосибирской заприпайной полыньи).

Анализ рис. 3 показывает, что многие районы значимой корреляции в мае – июле, а также октябре – декабре расположены непосредственно на трассах СМП. В мае они находятся на маршрутах 0 и 3; в июне, июле — на маршруте 3; в августе — на маршрутах 0 и 1; в октябре — на маршрутах 1–3; в ноябре — на маршруте 1; в декабре — на маршрутах 1 и 3. Наибольшее количество таких районов выявлено в западной части моря на подходах к проливу Вилькицкого, а также в прибрежных районах и местах формирования заприпайных полыней.

Актуальность проблемы лесных пожаров на территории Якутии подтверждается данными рис. 4, на котором представлена динамика изменений показателей КЛП и ППО по годам. Как следует из данного рисунка, наибольшие значения КЛП и ППО соответствуют периоду 2020–2021 гг. В 2022–2023 гг. имел место их резкий спад. Временные зависимости КЛП и ППО коррелированы между собой (коэффициент корреляции равен 0,81), но не являются линейно зависимыми.

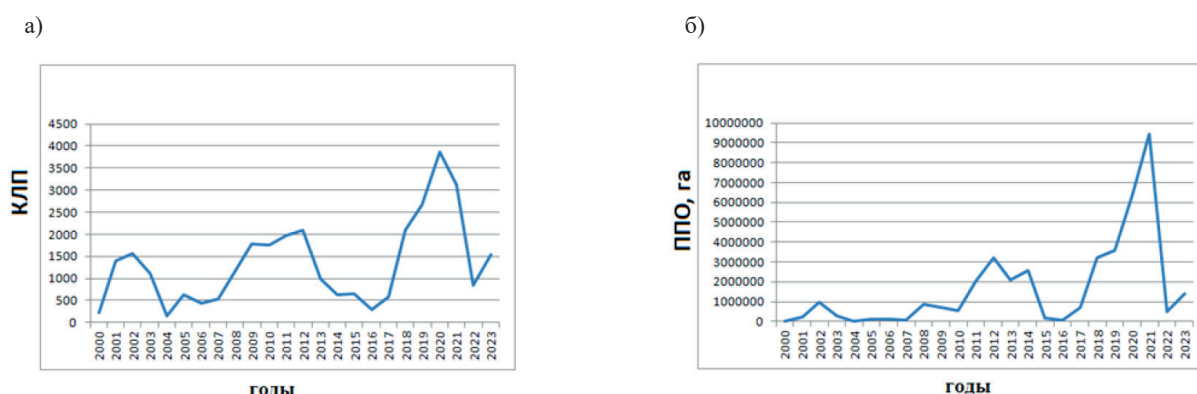


Рис. 4. Изменения показателей горимости лесов Якутии с 2000 по 2022 гг.: а — КЛП; б — ППО

В соответствии с проверяемой гипотезой, после периода с высокими значениями КЛП и ППО в районах моря, где была выявлена значимая корреляция, должна наблюдаться пониженная ледовитость. Этот факт был проверен на примере всплеска КЛП и ППО в 2020–2021 гг. и их спада в 2022–2023 гг. Сравнивались карты ледовитости моря Лаптевых для одних и тех же дат 2022 и 2024 гг.

Данные о фактической среднесуточной ледовитости получены из каталога спутниковых миссий Aqua (NASA) и Shizuku (JAXA), доступного на сайте Бременского университета⁴. Для сравнения взяты даты, относящиеся к периодам активного таяния и образования ледяного покрова: 30 мая и 20 октября соответственно. Результаты представлены на рис. 5. Как видно из рис. 5, 30 мая 2022 г. (см. рис. 5, *а*), в период начала половодий и активного таяния ледяного покрова, ледовитость в районе п-ва Таймыр на участках, где выявлена значимая корреляция между КЛП/ППО и СМЛ, была значительно меньше, а размер полыней больше, чем в ту же дату в 2024 г. (см. рис. 5, *б*).

⁴ Sea Ice Remote Sensing at the University of Bremen. Ice concentration [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/amsre-amsr2/>.

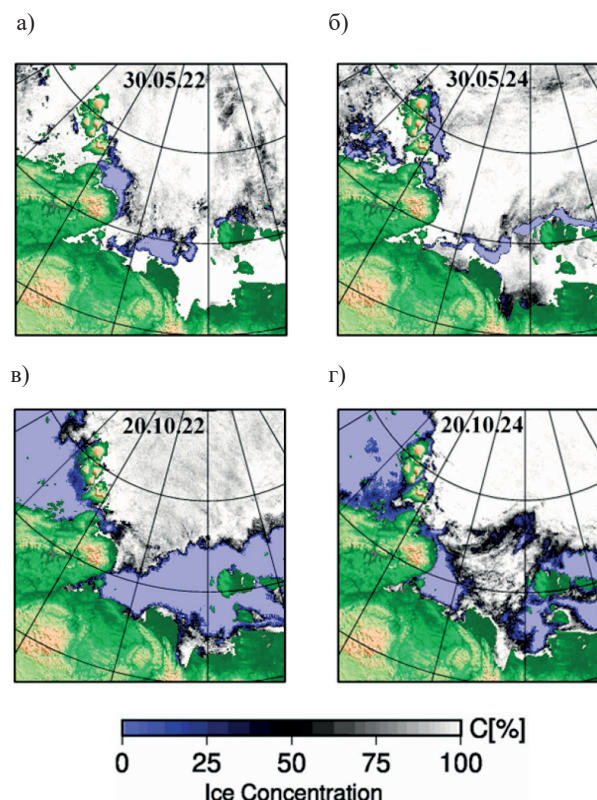


Рис. 5. Карты ледовитости моря Лаптевых, соответствующие датам:
а — 30.05.2022 г.; б — 30.05.2024 г.; в — 20.10.2022 г.; г — 20.10.2024 г.

Таким образом, таяние ледяного покрова в 2022 г. происходило быстрее, а количество поглощенного водами моря в летний сезон тепла было больше, чем в 2024 г. Очевидно, по этой причине активное ледообразование в 2022 г. началось позже, чем в 2024 г., что подтверждено на рис. 5, в. Из рис. 5, г наглядно видно, что 20 октября 2024 г. ледовитость акватории моря Лаптевых была существенно больше, чем в ту же дату в 2022 г.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Проведенные исследования подтверждают значимость влияния показателей горимости лесов Якутии на ледовую обстановку определенных участков трасс Северного морского пути. Среди этих показателей наиболее значимым является ППО, пропорциональный среднему потоку сажи, образовавшейся в регионе за год при лесных пожарах и поступившей в атмосферу. Его корреляция с изменениями ледовитости определенных районов моря Лаптевых прослеживается во все месяцы периода, потенциально доступного для автономной навигации судов класса Arc6 и Arc7 (с мая по декабрь). Наиболее сильная корреляция выявлена с мая по июль и в декабре на подходах к проливу Вилькицкого, в северо-западной и в южной частях моря в местах формирования заприпайных полыней.

Корреляция, выявленная в мае, может быть объяснена эффектом снижения альбедо ледяного покрова за счет осевшей на него в предыдущие месяцы сажи. Последняя выносится с горельников ветрами южных румбов, преобладающих в осенне-зимний сезон. Более темный лед в условиях полярного дня быстрее, образуя полыньи и разводья. Корреляцию в июне и июле, когда ледяной покров быстро разрушается, можно объяснить эффектом более ранних половодий, приносящих более теплый сток с бассейнов крупных сибирских рек (Лена, Яна, Анабар, Оленёк). Последний образуется за счет более раннего таяния снежного покрова на участках, пройденных огнем лесных пожаров в предшествующем году.

Вполне логично, что в период отсутствия ледяного покрова (август, сентябрь, частично октябрь) корреляция менее выражена или отсутствует. Когда ледяной покров вновь сформировался (ноябрь, декабрь), она снова становится значимой. Наличие корреляции, очевидно, вызвано уже не эффектом альбедо и ранним стоком рек, а более поздним ледообразованием ввиду того, что воды моря, освободившиеся в текущем сезоне ото льда раньше (в июне–июле), сильнее прогрелись в период полярного дня.

Полученные результаты исследования в целом соответствуют существующим представлениям о влиянии ландшафтных пожаров на загрязнение атмосферы частицами пироаэрозоля и способность лесных фитоценозов снижать интенсивность таяния снежного покрова на соответствующих территориях [14], а также подтверждают справедливость выводов [10], [12], [13], [20]–[21] о значимости влияния характеристик стока сибирских рек на изменения средних температур подстилающей поверхности на их приустьевых взморьях. Они представляют практический интерес для судоходства при планировании ранней и поздней навигации. Факт наличия больших площадей выгоревших лесов Якутии в текущем году, несмотря на негативные последствия для природы и экономики региона, может свидетельствовать о более благоприятных условиях плавания на некоторых участках судоходных трасс моря Лаптевых в следующем году.

Несмотря на то, что факторы, рассмотренные в настоящей работе, признаны статистически значимыми, они не являются единственными, способными влиять на ледовую обстановку в регионе. Их вклад на фоне других (например, изменение потоков солнечной радиации, общее повышение температуры воздуха в регионе, изменение ветрового режима, водообмен с соседними морями, изменения уровня моря и др.) требует дополнительного изучения.

Комплексный учет всех известных и наблюдаемых факторов может существенно улучшить качество долгосрочного прогнозирования ледовой обстановки на арктических судоходных трассах. В случае консервативного сценария развития будущего такой учет возможен, в частности, с использованием метода линейной множественной регрессии, в которой известные факторы выполняют роль предикторов регрессионных моделей.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Гипотеза о наличии значимой корреляции между показателями горимости лесов Якутии и ледовой обстановкой на некоторых участках судоходных трасс моря Лаптевых находит свое подтверждение. Наиболее вероятной причиной этого является эффект снижения альбедо ледяного покрова за счет оседания на нем сажи, приносимой ветрами южных румбов с горельников, и более ранние и теплые половодья на крупных сибирских реках.

2. Установлено, что в годы, следующие за периодами крупных лесных пожаров, наблюдается тенденция к снижению ледовитости некоторых районов моря. В весенне-летний период (май–июнь) они расположены в основном в северо-западной и южной частях моря (в районах образования заприпайных полыней), что способствует более раннему открытию навигации. В осенние месяцы за счет сильнее прогретых в течение летнего сезона морских вод активное ледообразование начинается позже (октябрь–ноябрь), способствуя более позднему ее закрытию.

3. Степень влияния лесных пожаров на изменения ледовитости в море Лаптевых на фоне действия других значимых факторов (вариации температурного режима, солнечной инсоляции, ветрового режима, уровня моря и др.) требует дополнительного изучения. Однако при условии, что современные тенденции климатических изменений сохраняются, можно прогнозировать, что в годы, следующие за периодами интенсивных лесных пожаров на территории республики Саха (Якутия), для судов с высоким ледовым классом (Arc6 и Arc7) самостоятельное плавание в море Лаптевых будет возможно в течение более длительного периода (с мая по декабрь).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Алексеев Г. В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26. — EDN ULVSOP.
3. *Плисецкий Е. Е.* Приоритеты развития Северного морского пути в стратегическом управлении и планировании / Е. Е. Плисецкий // Арктика и Север. — 2016. — № 22. — С. 101–111. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.22.101 — EDN VLFJBR.
4. *Прищепа О. М.* Перспективы дальнейшего изучения и освоения углеводородного потенциала арктического шельфа Печоро-Баренцевоморского региона / О. М. Прищепа, Ю. В. Нефедов, Г. А. Григорьев // Научный журнал Российского газового общества. — 2019. — № 3–4(22–23). — С. 5–20. — EDN CFCUTD.
5. *Григорьев Г. А.* Перспективы освоения углеводородных ресурсов российского арктического шельфа — стратегическая пауза неизбежна / Г. А. Григорьев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 2 (165). — С. 37–45. — EDN ZCDIRN.
6. *Гудкович З. М.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей / З. М. Гудкович, А. А. Кириллов, Е. Г. Ковалев [и др.]. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 347 с.
7. *Киктев Д. Б.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов / Д. Б. Киктев, А. В. Муравьев, А. Ю. Бундель. — М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. — 94 с.
8. *Горбунов С. В.* Анализ технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера / С. В. Горбунов, Ю. Д. Макиев, В. П. Малышев // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. — 2011. — С. 43–53. — EDN OJWKOF.
9. *Моря Российской Арктики в современных климатических условиях* / Под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ, 2021. — 360 с.
10. *Холопцев А. В.* Влияние половодий в дельте Колымы на условия судоходства в Восточно-Сибирском море / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 563–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570. — EDN JFMEGZ.
11. Gelfan A. Climate change impact on water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues / A. Gelfan, D. Gustafsson, Yu. Motovilov [et al.] // Climatic change. — 2017. — Vol. 141(3). — Pp. 499–515. DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
12. *Kholoptsev A. V.* Ice Coverage near the New Siberian Islands and Winter Precipitation in the Lena and Yana River Basins / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, R. G. Shubkin // Russian Meteorology and Hidrology. — 2023. — Vol. 48. — Is. 1. — Pp. 45–52. DOI: 10.3103/S1068373923010065.
13. *Kholoptsev A. V.* Climatic Changes in the Arctic Zone of Russia and Climate Warming in Siberia / A. V. Kholoptsev, R. G. Shubkin, S. V. Babenyshev, A. N. Baturo // Springer Geology. Processes in GeoMedia. — 2022. — Vol. VI. — P. 217–228. DOI: 10.1007/978-3-031-16575-7_20.
14. *Валендик Э. Н.* Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири / Э. Н. Валендик, Е. К. Кириляхов, В. А. Рыжкова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2014. — № 3. — С. 73–86.
15. *Agarwal S.* Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo / S. Agarwal, W. Moon, J. S. Wettlaufer // Geophys. Res. Lett. — 2011. — Vol. 38. — L20504. DOI: 10.1029/2011GL049109.
16. *Salby M. L.* Fundamentals of Atmospheric Physics / M. L. Salby. — New York: Academic Press, 1996. — 560 p.
17. *Айвазян С. А.* Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 1022 с.
18. *Беликов С. Е.* Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики / С. Е. Беликов, М. В. Гаврило, С. Л. Горин [и др.]. — М.: изд-во WWF России, 2011. — 64 с.
19. *Исаулова К. Я.* Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полынй восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402. — EDN WITCQM.

20. Холопцев А. В. Современные тенденции изменений пожароопасности в Восточной Сибири, а также ледовитости и поверхностной солености ее морей в летние месяцы / А. В. Холопцев, Р. Г. Шубкин, А. Н. Батуро, И. Ю. Сергеев // Процессы в геосредах. — 2022. — № 1(31). — С. 1511–1527. — EDN NPAWDI.

21. Холопцев А. В. Связи изменений ледовой обстановки на Северном морском пути с движением планет Солнечной системы / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин, Е. О. Ольховик // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13. — № 2. — С. 310–321. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321. — EDN XUEWKE.

REFERENCES

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

2. Alekseev, G. V. “Development and amplification of global warming in the Arctic.” *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.

3. Plisetsky, Evgeniy E. “Priorities of the strategic management and planning of the Northern Sea route.” *Arktika i sever* 22 (2016): 101–111. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2016.22.101.

4. Prishchepa, O. M., Yu. V. Nefedov and G. A. Grigorev “Pechoro-Barentsevomorskogo regiona.” *Nauchnyy zhurnal Rossijskogo gazovogo obshchestva* 3–4(22–23) (2019): 5–20.

5. Grigoriev, Gennady A. “Prospects for the development of hydrocarbon resources on the Russian arctic shelf — a strategic pause is inevitable.” *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* 2(165) (2019): 37–45.

6. Gudkovich, Zalman M., A. A. Kirillov, E. G. Kovalev, A. V. Smetannikova, and V. A. Spichkin *Osnovy metodiki dolgosrochnnykh ledovykh prognozov dlia arkticheskikh morei*. L.: Gidrometeoizdat, 1972.

7. Kikteev, Dmitry B., Anatoliy V. Muravyov, and Anastasiya Yu. Bundel *Metodicheskiye rekomendatsii po verifikatsii meteorologicheskikh prognozov*. M.: Tipografiya AMA PRESS, 2021.

8. Gorbunov, Sergey V., Yury D. Makiev, and Vladlen P. Malyshev “Analysis of technologies for forecasting of man-made and natural emergencies.” *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya* (2011): 43–53.

9. Ashik Igor M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: AANII, 2021.

10. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Impact of floods in the Kolyma river delta on navigation conditions in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.4 (2022): 563–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-563-570.

11. Gelfan, Alexander, David Gustafsson, Yury Motovilov, Berit Arheimer, Andrey Kalugin, Inna Krylenko, and Alexander Lavrenov “Climate change impact on water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues.” *Climatic change* 141.3 (2017): 499–515. DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.

12. Kholoptsev, Aleksandr V., Sergey A. Podporin, and Roman G. Shubkin “Ice coverage near the New Siberian islands and winter precipitation in the Lena and Yana river basins.” *Russian Meteorology and Hydrology*. 48.1 (2023): 45–52. DOI: 10.3103/S1068373923010065.

13. Kholoptsev, Aleksandr V., Roman G. Shubkin, Sergey V. Babenyshev, and Aleksey N. Baturo “Climatic Changes in the Arctic Zone of Russia and Climate Warming in Siberia.” *Springer Geology. Processes in GeoMedia* 4 (2022): 217–228. DOI:10.1007/978-3-031-16575-7_20.

14. Valendik, Erik N., Yegor K. Kisilyakhov, Vera A. Ryzhkova, Yevgeny I. Ponomarev, and Irina V. Danilova “Landscape fires in the taiga of Central Siberia.” *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* 3(2014): 73–86.

15. Agarwal, Sahil, W. Moon, J. S. Wettlaufer “Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo.” *Geophys. Res. Lett.* 38 (2011): L20504. DOI: 10.1029/2011GL049109.

16. Salby, Murry L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. New York: Academic Press, 1996.

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

18. Belikov S. Ye., M. V. Gavrilov, S. L. Gorin, et al. *Atlas biologicheskogo raznoobraziya morei i poberezhii rossiyskoy Arktiki*. M.: izd-vo WWF Rossii, 2011.

19. Isaulova, Kristina Ya. “Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

20. Kholoptsev, Aleksandr V., Roman G. Shubkin, Aleksey N. Baturo, and Ivan Yu. Sergeev “Current trends in fire hazard changes in Eastern Siberia, as well as ice cover and surface salinity of its seas in the summer months.” *Protsessy v geosredakh* 1.31 (2022): 1511–1527.

21. Kholoptsev A, S. A. Podporin and E. O. Ol'khovik "Svyazi izmeneniy ledovoy obstanovki na Severnom morskoy puti s dvizheniem planet Solnechnoy sistemy". *Arktika: ekologiya i ekonomika* 13.2 (2023): 310–321. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-310-321.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России»
662972, Российская Федерация, Красноярский
край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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
Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor,
leading researcher
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State
Oceanographic Institute”
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Siberian Fire Rescue Academy
1 Severnaya Str., Krasnoyarsk Krai,
Zheleznogorsk, 662972,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 Октября 2024
Received: Oct. 31, 2024

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909

**RESEARCH OF DATA GENERATION OPTIONS BASED ON MULTI-SCENARIO
MODELLING FOR DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY
IN THE DEVELOPMENT OF MARITIME PASSENGER TERMINAL****N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the paper is the study of decision-making options under uncertainty, as well as in practical situations of working with limited data in conditions of stochastic, variable influence of the external environment in the sphere of maritime passenger transportation. Attention is drawn to the fact that in this case, making a decision on modernization only on the basis of the experience of the port manager or some industry experience, on the one hand, is quite limited in the choice of alternatives, and on the other hand, may lead to incorrect decisions in the field of development forecasting, formation of measures to change the position of the marine passenger port in the sea region in relation to other terminals and evaluation of the target function of the port. It is noted that one of the tools for data collection is continuous monitoring of changes in route ferry and cruise networks and analyzing changes in the infrastructure of other passenger ports in the region. For completeness of data it is proposed to use multi-scenario modeling in the digital twin of the sea passenger port developed in AnyLogic environment, as well as to perform optimization experiments to obtain a set of values for the number of cruise and ferry vessels for the upcoming navigation. It is noted that the use of a simulation model makes it possible to include such an influence of the external environment as the trend of increasing size of cruise and ferry ships, which forms new infrastructure requirements for the creation of new or modernization of existing berths. In this case, the introduction of prioritization in the model of the incoming flow of ships is reasonably proposed. The object of the study is the incoming flow of cruise and ferry ships with prioritization in the queue. A comparative analysis of applicability of different mathematical distributions of mass service systems for incoming ship flows into the sea passenger port system with prioritization is presented. The developed simulation model is based on the available real data on the passenger port infrastructure of marine "Passenger Port of St. Petersburg 'Sea Facade' and ship calls for the past years. A multi-scenario random input flow of cruise and ferry ships with several priority characteristics is considered. As a result of modeling a set of data is formed, which for the port manager is a necessary field of utility and a basis for the use of decision-making models under uncertainty. As a result of multi-scenario simulation, the obtained throughput simulation data under different flow distributions were analyzed. Based on the performed experiments, the efficiency of using the beta distribution was determined. Based on the simulation results, the applicability boundaries for each distribution were determined and a confidence interval of maximum intensity was obtained, which can be used as a reference for making decisions on port infrastructure modernization. The methodology of data formation on the basis of multiscenario modeling allows to form the necessary set of data taking into account the influence of the external environment for decision-making on the model of marine passenger terminal development. The presented methodology can be extended to the study of systems: "sea ferry / cruise lines — sea passenger port — land infrastructure".

Keywords: discrete event modeling, priority queue, multi-priority queue, throughput, seaports, queuing system.

For citation:

Maiorov, Nikolai N. and M. R. Yazvenko "Research of data generation options based on multi-scenario modelling for decision-making under uncertainty in the development of maritime passenger terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

УДК 65.012.1, 656.072**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПО РАЗВИТИЮ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТЕРМИНАЛА
ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ****Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование вариантов принятия решений при неопределенности, а также в практических ситуациях работы с ограниченными данными в условиях стохастического, изменчивого влияния внешней среды в сфере морских пассажирских перевозок. Обращается внимание на то, что в данном случае принятие решения по модернизации только на основе опыта руководителя порта или некоторого опыта отрасли, с одной стороны, достаточно ограничено в выборе альтернатив, а с другой — может привести к неправильным решениям в области прогнозирования развития, формированию мер, направленных на изменение положения морского пассажирского порта в регионе моря по отношению к другим терминалам и оценке целевой функции порта. Отмечается, что одним из инструментов сбора данных является непрерывный мониторинг изменений в маршрутных паромных и круизных сетях и анализ изменений инфраструктуры других пассажирских портов в регионе. Для полноты данных предлагается использование многосценарного моделирования в цифровом двойнике морского пассажирского порта, разработанного в среде AnyLogic, а также выполнение оптимизационных экспериментов, позволяющих получить набор значений по количеству круизных и паромных судов на предстоящую навигацию. Отмечается, что использование имитационной модели дает возможность включить такое влияние внешней среды, как тенденция к увеличению размеров круизных и паромных судов, тем самым формируя современные инфраструктурные требования к созданию новых или модернизации существующих причалов. В данной случае обоснованно предлагается введение приоритетности в модели входящего потока судов. Объектом исследования выступает входящий поток круизных и паромных судов с выделением приоритетности в очереди. Представлен сравнительный анализ применимости различных математических распределений систем массового обслуживания для входных потоков судов в систему морского пассажирского порта с приоритетами. Разработанная имитационная модель выполнена на основе имеющихся реальных данных по инфраструктуре пассажирского порта АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» и судозаходам за прошедшие годы. Рассмотрен многосценарный случайный входной поток круизных и паромных судов, имеющий несколько приоритетных характеристик. В результате моделирования формируется набор данных, который для руководителя порта является необходимым полем полезности и основой для использования моделей принятия решений при неопределенности. В результате многосценарного моделирования проведен анализ полученных данных моделирования пропускной способности при различных распределениях потока. На основе выполненных экспериментов определена эффективность использования бета-распределения. По результатам моделирования определены границы применимости по каждому распределению и получен доверительный интервал максимальной интенсивности, на который можно ориентироваться при принятии решений по модернизации инфраструктуры порта. Методика формирования данных на основе многосценарного моделирования позволяет сформировать необходимый набор данных с учетом влияния внешней среды для принятия решений в отношении модели развития морского пассажирского терминала. Представленная методика может быть распространена на исследование систем: «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура».

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, очередь с приоритетами, многоприоритетная очередь, пропускная способность, морские порты, система массового обслуживания.

Для цитирования:

Майоров Н. Н. Исследование вариантов формирования данных на основе многосценарного моделирования по развитию морского пассажирского терминала для принятия решений при неопределенности / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

Введение (Introduction)

Современный морской пассажирский порт находится под постоянным воздействием многих факторов и условий, формирующих новые требования по его операционной работе и прогнозированию развития. С позиций системного анализа морской пассажирский терминал можно рассматривать как сложную техническую систему, выполнять аналитические исследования, но результатом будет определенное состояние или конечный набор состояний, которые могут измениться под воздействием внешней среды или возникновения конкуренции между терминалами в регионе моря. Перед руководителем морского пассажирского порта появляется новая задача сбора данных по входящему потоку, выполнения непрерывного мониторинга с фиксацией изменений в маршрутных сетях, а также исследования влияния трендов отрасли и конкурентной среды за пассажиропотоки между терминала в регионе моря. Таким образом, задачей руководителя морского пассажирского порта является не просто сбор данных, которые в свою очередь могут быть разнород-

ными, но и поиск программных средств и путей исследования взаимодействия систем «морская паромная / круизная линии — морской пассажирский порт» [1]–[3]. При этом необходимо обратить внимание на то, что часть собранных данных может быть необходима для анализа текущего положения морского пассажирского порта, что сокращает выборку прогнозных сценариев. Однако для решения задачи прогнозирования развития необходимо иметь набор данных многосценарного моделирования, который позволит представить различные сценарии работы морского пассажирского порта и применять аппарат принятия решений при неопределенности [4].

Для формирования набора данных предлагается использовать многосценарное моделирование, основанное на аппарате систем массового обслуживания. Классическое описание систем массового обслуживания базируется на процессах обслуживания, в которых заявки, поступающие на обслуживание, принадлежат одному классу [5]. В реальных транспортных системах массового обслуживания существует особенность, которая значительно увеличивает требуемые объемы вычислений и усложняет прогнозирование их работы. В данных системах наблюдается как неоднородность входного потока судов, так и неоднородность каналов обслуживания системы. Не все поступающие заявки могут быть обслужены во всех частях системы из-за несовместимости характеристик каналов и заявок. Если строго разделять типы заявок и типы каналов, то может возникнуть две ситуации:

- каналы будут простаивать при отсутствии достаточной интенсивности;
- очередь каналов будет перегружена при высокой интенсивности, поскольку строгое разделение не позволит заявкам отправиться в другую часть системы.

В связи с этим необходимо создать алгоритм, способный распределить поступающие заявки в системе наиболее выгодным способом с учетом их характеристик. Примером такой системы может служить морской пассажирский порт, принимающий круизные лайнеры различных размеров и классов, а также имеющий специализированные причалы для обслуживания судов типа *ро-ро*. Поступающие суда различаются своими характеристиками и необходимым обслуживанием. Они имеют различную осадку, длину и ширину, ограничивающие список возможных причалов, к которым можно направить данное судно. В силу топографических и экономических особенностей причалы могут иметь определенную длину печального фронта, ограничивающую максимальную длину судна, которое можно принять на данном причале. Также пассажирские суда могут быть различных подвидов и иметь особенности, как, например, судно *ро-ро*, для которого необходим отдельный причал для выгрузки автомобилей. Усложнение системы с неоднородностью и многоприоритетностью, по сравнению с простыми системами, значительно увеличивает количество возможных состояний, что существенно усложняет аналитическое прогнозирование изменений инфраструктуры системы или входного потока.

АО «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» — специализированный пассажирский порт, расположенный в Санкт-Петербурге на намывных территориях Васильевского острова. Комплекс порта [6] включает семь причалов для приема океанских лайнеров, три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал¹. Порт принимает суда на основании расписания, которое составляется на год, а также может принять суда, прибывающие вне расписания, если это не противоречит расписанию, расположенному в общем доступе на его официальном сайте. Анализ расписания движения судов порта за 2019 г. показал, что в нем было обслужено в среднем не более 265 судов за год, а прибытия судов имели сезонность с пиковой интенсивностью в июле, когда порт принял 68 судов.

С позиций систем массового обслуживания морской пассажирский порт может быть представлен как система массового обслуживания с семью каналами. С теоретической точки зрения на заходы круизных и паромных судов могут оказывать влияние различные факторы. В ряде случаев может быть рассмотрена ситуация появления в потоке нового (внепланового) судна, которое требует отдельного причала. Таким образом, возможны ситуации, когда может появиться как отказ

¹ Правила приема и обслуживания судов Открытым акционерным обществом «Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». СПб., 2009. 13 с.

в обслуживании, так и появление нового судна вне расписания. Для прогнозирования работы порта необходимо точно понимать максимально возможное количество круизных или паромных судов, которое может принять порт. Данные ситуации определяют необходимость выполнения многосценарного моделирования и чем лучше будут описаны различные варианты интенсивности потоков и распределения по причалам, тем точнее можно будет определить допустимые интервалы в поле полезности. Дополнительно появляется возможность определить наилучшие и наихудшие ситуации (утопические и антиутопические точки), которые могут определять граничные значения областей выбора принятия решений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Полнота наличия сценарных данных дает возможность оценить возможные критические точки (экстремума), где под воздействием внешней среды будет формироваться некоторое отклонение, что не позволит достигнуть целевых показателей. На рис. 1 приведена сборочная модель развития морского пассажирского порта и определения его системы управления с учетом внешних и внутренних процессов, влияния внешней среды и трендов, а также уровней, которые будут отражать его положение в регионе моря.

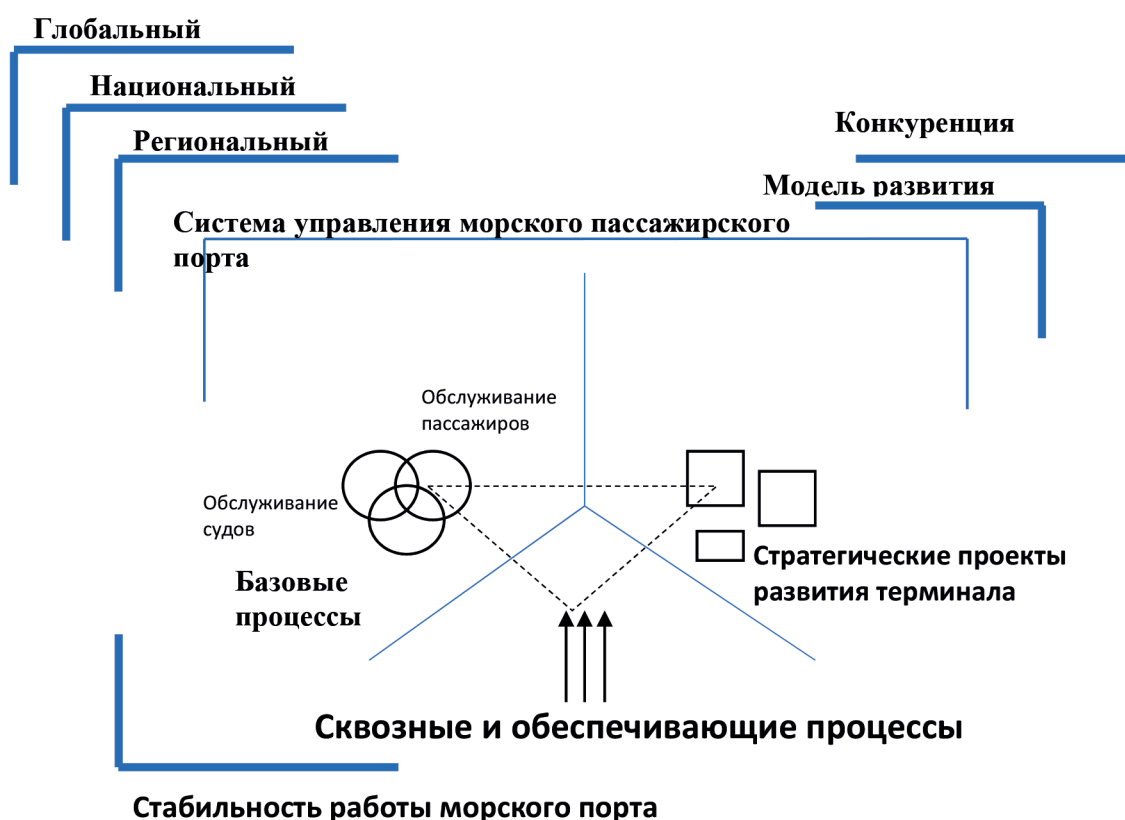


Рис. 1. Комплексная модель развития морского пассажирского порта с учетом внешних и внутренних процессов

Согласно модели, приведенной на рис. 1, принятие решения по изменению положения морского пассажирского порта в регионе моря требует улучшения базовых процессов по обслуживанию как пассажиров, так и круизных и паромных судов, а также запуска стратегических новых инфраструктурных изменений, позволяющих выйти на новый уровень работы и обеспечивающих лидерские позиции, например, в регионе моря в сфере пассажирских перевозок. Выбор одного варианта развития порта не может означать 100 %-е достижение поставленных целей, так как невозможно достигнуть идеальных условий. Поэтому необходим переход к моделям принятия решений при неопределенности.

Для выполнения многосценарного моделирования был выбран аппарат систем массового обслуживания и различные виды распределений. На основе анализа работ [7]–[10] и представленных результатов работы цифровой модели морского пассажирского порта определяется набор состояний по интенсивностям, формирующим поля полезности. Объектом выступает входной поток, интенсивности круизных и паромных судов. На практике для описания входных потоков, как правило, используют пуассоновское распределение, как показано в работах [8], [11]. Однако для выполнения многосценарного моделирования необходимо включать рассмотрение также и других распределений. Рассмотрим применимость еще четырех дополнительных математических распределений, используемых для описания случайных процессов: гамма, нормального, треугольного и бета-распределений [12], [13].

Выбранные математические модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Выбранные модели распределения для моделирования
и получения экспериментальных данных по интенсивностям**

Пуассоновское распределение	$F(t) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\lfloor t \rfloor} \frac{\lambda^i}{i!}, \quad t \geq 0,$ λ — среднее число заявок простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени; $P_k(t) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad k \in \{0, 1, \dots\}$
Нормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$ где μ — математическое ожидание; σ — дисперсия
Гамма-распределение	$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(r)},$ где $t \geq 0$ — интервал между судозаходами; λ — интенсивность входящего потока; r — порядок распределения ($r > 0$); $\Gamma(r)$ — гамма-функция
Треугольное распределение	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & x \in [a, c]; \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & x \in [c, b]; \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}$
Бета-распределение	$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$ где $\alpha, \beta > 0$ — произвольные параметры; $B(\alpha, \beta)$ — бета-функция.

Разработанная имитационная модель морского пассажирского порта (цифровой двойник)² выполнена в среде AnyLogic [14] и выделение задачи приоритетности представлено в работе [3]. Поступающие на обслуживание заявки (суда) можно сортировать по приоритету. Приоритет — число, которое является показателем важности этой заявки. Выбор этого показателя остается за лицом, принимающим решения (далее — ЛПР). На усмотрение ЛПР можно задавать любой другой параметр: время обслуживания или штрафы за простой.

В классических описаниях очередей с приоритетами рассматриваются системы, в которых только заявки являются неоднородными. В рассматриваемой системе морского пассажирского

² AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> // (дата обращения: 01.11.2024).

порта имеется неоднородность потока и каналов обслуживания. В модели используется алгоритм организации многоприоритетной очереди, представленный в работах [15], [16].

Для выполнения исследования рассмотрим максимальную пропускную способность системы морского пассажирского порта при применении схемы обслуживания с приоритетами. Это будет проводиться с помощью оптимизационных экспериментов в AnyLogic, созданные в разработанной цифровой модели морского пассажирского порта. Максимизируем количество успешно прошедших через систему судов. В качестве ограничений установим следующие теоретические условия. Допустим, что системе порта для недопущения крупных экономических издержек необходимо поддерживать следующие характеристики очереди: не должно возникать ситуаций, когда судно ожидает очереди дольше 24 ч; среднее время ожидания для судов не должно превышать двух часов (0,09 сут).

В результате работы и выбора различных законов распределения будет в каждом случае определяться наилучший набор значений интенсивностей судозаходов и данных по загруженности причалов за месяц навигации. Объединением полученных значений на едином графике функций формируется построение «поля полезности», к которому можно применять анализ на основе моделей принятия решений при неопределенности. На основе выполненного анализа по критериям Гурвица, Лапласа и др., а также определения линий уровня, утопических и антиутопических точек формируются целевые значения, которые руководитель морского пассажирского порта должен выбрать как стратегическую цель, которую необходимо достигнуть по изменению положения порта в регионе моря.

Результаты (Results)

На основе выполнения многосценарного моделирования различных интенсивностей круизных и паромных судов представим выборку наиболее характерных двадцати результатов экспериментов. Основными параметрами исследования будет количество прошедших через порт круизных и паромных судов и интенсивность потока, которая была задана перед началом моделирования. Полученные результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты опытных многосценарных экспериментов
в среде Anylogic для морского пассажирского порта**

№ п/п.	Пуассоновское распределение		Гамма-распреде- ление		Нормальное распределение		Треугольное распределение		Бета-распреде- ление	
	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал	Обслу- живание	Интервал
1	92	86	95	87	89	86	91	83	95	100
2	94	91	95	113	90	82	93	94	95	115
3	94	102	96	115	92	89	94	103	95	114
4	98	96	97	110	93	95	94	128	96	103
5	98	90	97	89	94	86	94	107	98	97
6	99	133	98	97	94	92	95	95	99	101
7	99	109	98	96	96	86	97	103	100	97
8	99	121	100	125	98	102	98	98	100	110
9	101	88	101	106	101	87	98	91	100	96
10	102	94	101	85	102	123	98	122	101	94
11	102	103	101	123	102	100	99	122	101	93
12	103	107	101	124	104	107	99	125	102	91
13	103	92	102	124	104	112	100	112	102	96
14	104	105	102	109	104	127	101	118	103	93
15	105	123	103	109	105	92	103	96	104	114
16	106	106	103	148	106	119	105	100	107	136
17	107	116	104	86	109	120	107	106	108	127
18	107	111	105	106	111	121	107	124	108	125
19	109	113	105	108	111	112	108	98	109	106
20	110	122	113	128	115	114	112	106	116	103

Результаты оценки доверительного интервала приведены в табл. 3. Использование имитационной модели морского порта позволяет динамично менять параметры модели и вносить дополнения на основе влияния внешней среды, а также оперативно вносить изменения во входной поток.

Таблица 3

Оценка экспериментального доверительного интервала

Интервал	Пуассоновское распределение		Гамма-распределение		Нормальное распределение		Треугольное распределение		Бета-распределение	
	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал	Обслуживание	Интервал
Среднее значение	101,60	105,40	100,85	109,40	101,00	102,60	99,65	106,55	101,95	105,55
Стандартное отклонение	5,02	13,27	4,25	16,47	7,51	14,90	5,73	12,89	5,47	12,71
Доверительный интервал	2,20	5,82	1,86	7,22	3,29	6,53	2,51	5,65	2,40	5,57
От	99,40	99,58	98,99	102,18	97,71	96,07	97,14	100,90	99,55	99,98
До	103,80	111,22	102,71	116,62	104,29	109,13	102,16	112,20	104,35	111,12

Определить границы применимости можно при помощи доверительного интервала, позволяющего выявить наиболее вероятный результат применения каждого из типов распределений входного потока и избавиться от существенно выделяющихся результатов, которые содержат значительные отклонения. Для определения доверительного интервала рассчитывается среднее значение и стандартное отклонение результатов экспериментов. Уровень доверия интервала выбирается равным 95 %. Результаты расчетов приведены в табл. 2. На рис. 2 и 3 приведены результаты экспериментов в виде графиков с выделением полученных доверительных интервалов (полей полезности) при различных распределениях.

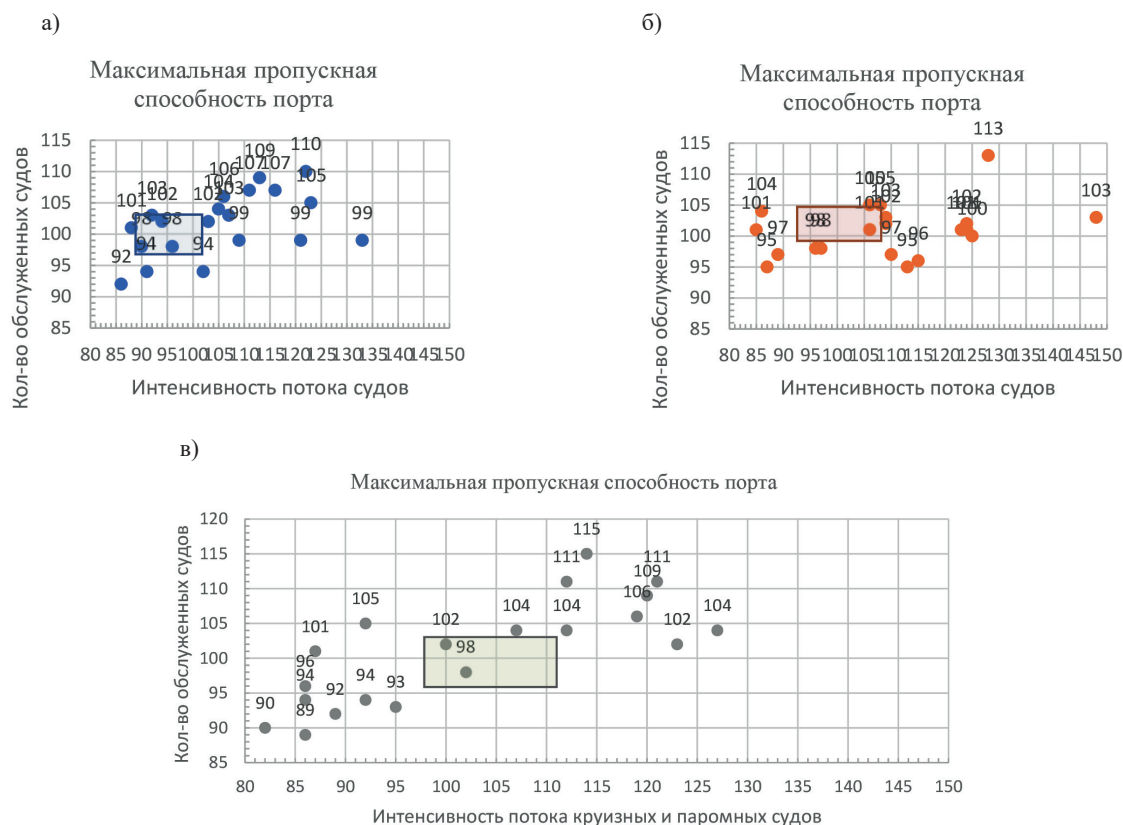


Рис. 2. Максимальная пропускная способность морского пассажирского порта по каждому из распределений: а — Пуассоновское распределение; б — гамма распределение; в — нормальное распределение

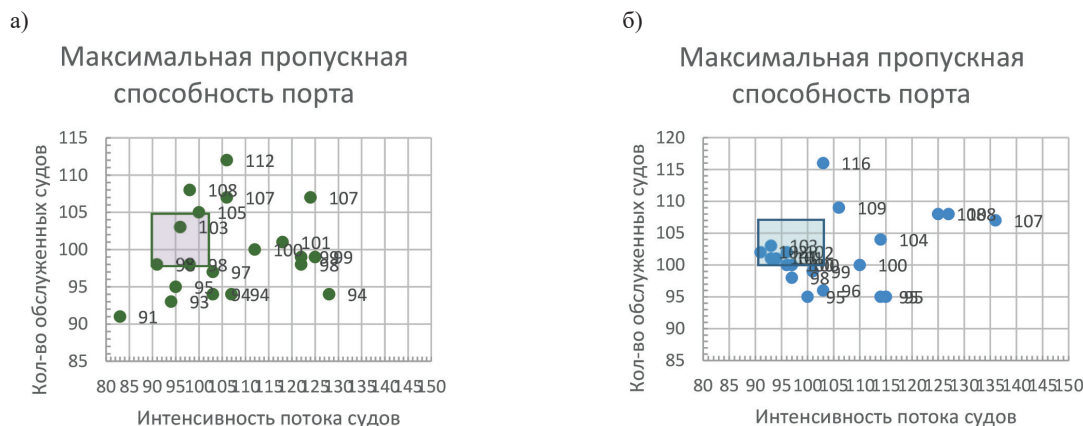


Рис. 3. Максимальная пропускная способность порта по каждому из распределений:
а — треугольное распределение; б — бета- распределение

На основе выполненного анализа доверительных интервалов лицом, принимающим решение, формируется набор полей полезности, выполняется объединение результатов на едином сборочном графике для получения пересечения, определяющее интенсивности, при которых морской пассажирский порт будет работать стабильно. Однако при выборе стратегии развития порта лицо, принимающее решение, выбирает набор наилучших значений и выполняет последующий анализ набора показателей достижимости входной интенсивности, для ситуации раскрывает типы судов, которые определяли входной поток и определяет параметры характеристики загруженности причалов. Следящим этапом выполняется анализ возможностей и соответствия инфраструктуры порта по приему данного количества круизных и паромных судов, определения задачи по модернизации существующих или строительства новых.

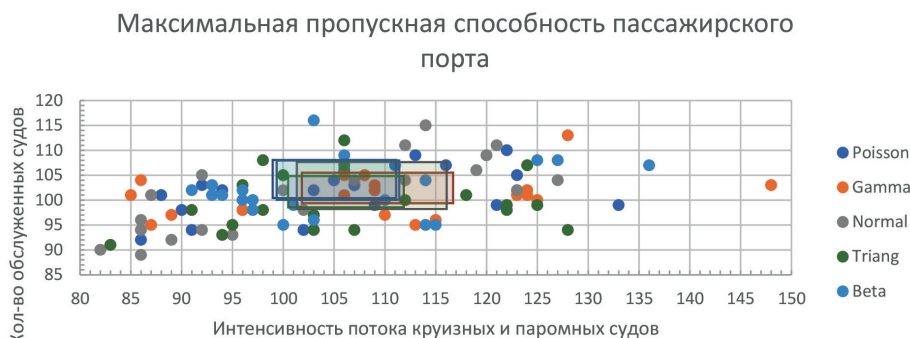
Обсуждение (Discussion)

Наименьшее отклонение количества фактически прошедших через порт круизных и паромных судов показало применение гамма-распределения, за ним Пуассоновское, достаточно близки треугольное и бета-распределения, а отклонение результатов при применении нормального почти в 1,5 раза выше, чем при применении гамма-распределения. При рассмотрении отклонения интенсивности потока формируется совершенно другая картина. Гамма-распределение показывает наибольшее отклонение, в то время как наименьшее — бета-распределение.

Средние значения при применении выбранных распределений достаточно близки и в среднем составляют 101,01 судов в месяц. Как показывают дополнительные вычисления, средняя разница между прошедшим количеством судов и предварительно ожидаемой интенсивностью — 4,57 %. Разница вызвана отсутствием учета уже пришедших, но необслуженных судов, а также некоторым фактором случайности потока.

При рассмотрении области, ограниченной как интенсивностью, так и количеством обслуженных судов, можно заметить, что число попавших результатов в эти области по каждому виду распределений невелико. Больше всего у нормального — 3, что также вызвано случайностью прибытий и учетом только обслуженных. Однако, если рассмотреть зоны рис. 1 только по количеству обслуженных судов, то картина изменится. Попаданий результатов в данный интервал Пуассоновского — 6; гамма-нормального — 7; треугольного — 8 и бета-распределения — 10. Бета-распределение показало наибольшее количество результатов несмотря на третье из наименьших отклонений результатов. Важно отметить, что бета-распределение показало наибольшее среднее число обслуженных судов из всех распределений, что может свидетельствовать о достаточно равномерном прибытии судов в порт, наиболее приближенным к заранее просчитанному расписанию. Все распределения показали хорошую точность, а наиболее удачными показали себя классическое Пуассоновское распределение и бета-распределение.

Для оценки необходимости принятия решений в условиях неопределенности необходимо с достаточной точностью знать возможные колебания входного потока. Наибольшую точность даст объединение доверительных интервалов всех распределений. Таким образом, на выходе получается доверительный интервал, удовлетворяющий всем распределениям. Данный интервал и будет являться наиболее вероятным прогнозом возможного количества поступающих в порт судов. По полученным данным составим совмещенный график, на котором будет выделен доверительный интервал интенсивности входного потока по всем распределениям (рис. 3).



На рис. 3 представлены различные поля полезности. Итоговый интервал выделен на рис. 3 пересечением интервалов всех распределений и лежит в пределах от 99 до 102 судов в месяц при интенсивности от 102 до 109 судов в месяц. Это позволяет сделать для лица, принимающего решение, вывод о том, что входной поток судов может колебаться в пределах 102–109 судов в месяц за навигацию, которые рассматриваемый порт может принимать без серьезных сбоев в работе. Значения интенсивностей, находящиеся за пределами выбранных интервалов, вызывают необходимость использования оптимизационных моделей в расписании судозаходов или при еще большем количестве определяет необходимость специализации причалов.

Согласно моделям принятия решений при неопределенности, каждое состояние на рис. 3 при выборе необходимых целевых установок может преобразовываться в стратегическую цель, которая требует модернизации инфраструктуры. Для лица, принимающего решение, открывается возможность рассматривать как итоговое объединение полей полезности, так и работать с результатами по отдельности. На основе своих целевых установок и моделей развития порта интервалы могут быть как расширены, так и изменены. На основе полученных результатов руководитель морского пассажирского порта может определить дополнительно возможную «утопическую» и «антиутопические точки» (наилучшие и наихудшие сценарии, необходимые для определения значения работы порта).

Заключение (Conclusion)

Представленная в статье модель формирования данных на основе многоценарного моделирования как на основе реальных данных, так и прогнозных, в цифровом двойнике морского пассажирского порта в среде Anylogic позволяет обеспечить достаточность данных для комплексного принятия решений при неопределенности по прогнозированию развития и определению положения порта в регионе. На основе анализа результатов рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1. Сформирована комплексная модель развития морского пассажирского порта с учетом внешних и внутренних процессов, граничных и рамочных условий позиционирования в регионе моря, позволяющая определить основные стратегические цели морского пассажирского порта в регионе;
2. Доказана ограниченность использования аналитических моделей для исследования различных сценариев интенсивностей судозаходов и распределения по причалам морского пассажирского порта и необходимость получения данных на основе многоценарного моделирования;

3. На основе анализа результатов установлено, что бета-распределение может быть успешно использовано для моделирования случайного входного потока в системе массового обслуживания;
4. На основе полученных в ходе моделирования результатов был спрогнозирован новый интервал максимально возможного количества прибывающих судов в порт в течение месяца, при котором будут выполняться поставленные условия обслуживания.
5. Сформированные новые поля полезностей (см. рис. 3) позволяют оценивать различные варианты работы морского пассажирского порта и определять положение порта в регионе моря;
6. На основе полученных результатов подтверждено, что прогнозирование возможных колебаний судопотока, особенно в условиях современной обстановки в сфере морских пассажирских перевозок, позволяет снизить неопределенность и заранее подготовиться к принятию соответствующих управленческих решений по модернизации инфраструктуры;
7. Сформированные поля полезности позволяют определить наилучшие и наихудшие значения по пропускным способностям и количеству судов и выбрать возможные сценарии развития, а также сформировать области для оценки путей увеличения интенсивностей входящего потока судов.
8. Выполненное многосценарное моделирование и анализ полей полезности могут быть распространены при исследовании взаимодействия систем «морская паромная / круизная линии – морской пассажирский порт – наземная инфраструктура» с оценкой околотерминальной городской инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ćorluka G.* Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
2. *London, W. R.* Power in the context of cruise destination stakeholder's interrelationships / W. R. London, G. Lohmann // Res. Transp. Bus. Manag. — 2014. — Vol. 13. — Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
3. *Майоров Н. Н.* Моделирование работы морского пассажирского порта на основе цифровой транспортной модели с учетом различных приоритетов круизных и паромных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, А. А. Силина // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211. — EDN ANFAKG.
4. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. / Г. Л. Бродецкий — М.: Academia, 2010. — 336 с.
5. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / Пер. с англ. канд. техн. наук И. И. Грушко / Л. Клейнрок. — М.: Машиностроение, 1979. — 432 с.
6. Общая информация — Пассажирский порт Санкт-Петербург Морской фасад. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.portspb.ru/O_porte/about (дата обращения 10.11.2024).
7. *Язвенко М. Р.* Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 2(28). — С. 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113. — EDN EJHUOQ.
8. *Майоров Н. Н.* Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6(40). — С. 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80. — EDN XHLRJH.
9. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
10. *Fernández-Gómez M. A.* A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call / M. A. Fernández-Gómez, L. Valcarce-Ruiz, R. Becerra-Vicario, J. Diéguez-Soto // Research in Transportation Business & Management. — 2022. — Vol. 43. — Pp. 100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.
11. *Майоров Н. Н.* Планирование работы морского пассажирского терминала на основе исследования интенсивностей заходов круизных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128. — EDN LMZQEO.

12. Tsamboulas D. How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination / D. Tsamboulas, P. Moraiti, G. Koulopoulou // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2013. — Is. 2330. — Pp. 24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
13. Krile S. Efficient Heuristic for Non-linear Transportation Problem on the Route with Multiple Ports. / S. Krile // *Polish Maritime Research*. Gdansk. Poland. — 2013. — Vol. 20, No. 4. — Pp. 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.
14. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении / Д. Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело»: РАНХиГС, 2015. — 496 с.
15. Язвенко М. Р. Моделирование морского грузового порта как системы массового обслуживания в среде AnyLogic / М. Р. Язвенко, А. Г. Морозков // *Системный анализ и логистика*. — 2020. — № 4(26). — С. 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66. — EDN PCABYR.
16. Maiorov N. N. Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems / N. N. Maiorov, M. R. Yazvenko // *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation. — 2024. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.

REFERENCES

1. Ćorluka, Goran, Ivan Peronja, and Dejan Tubić. “Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective.” *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
2. London, Wendy R., and Gui Lohmann. “Power in the context of cruise destination stakeholders’ interrelationships.” *Research in Transportation Business & Management* 13 (2014): 24–35. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
3. Majorov, N. N., V. A. Fetisov and A. A. Silina “Modelirovanie raboty morskogo passazhirskogo porta na osnove tsifrovoj transportnoj modeli s uchetom razlichnykh prioritetov kruiznykh i paromnykh sudov.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 197–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-197-211.
4. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
5. Kleinrock, L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. M.: Mashinostroenie, 1979.
6. Obshchaya informatsiya — Passazhirskij port Sankt-Peterburg Morskoj fasad. Web. 10 Nov. 2024 <https://www.portspb.ru/O_porte/about>.
7. Yazvenko, M. R. “Issledovanie zagruzhennosti prichalov morskogo passazhirskogo porta na osnove modelirovaniya.” *Sistemnyj analiz i logistika* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.
8. Majorov, N. N. and V. A. Fetisov “Issledovanie operatsionnykh protsessov obsluzhivaniya passazhirov v morskoy m passazhirskom terminale s ispolzovaniem modelirovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.
9. Krile, S., N. Maiorov, and V. Fetisov “Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development” *Sustainability* 13.7 (2021): 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
10. Fernández-Gámez, M. A., Valcarce-Ruiz L., Becerra-Vicario R. and Diéguez-Soto J. “A dynamic modelling approach to manage the cruise port of call”. *Research in Transportation Business & Management* 43 (2022):100818. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100818.
11. Majorov, N. N. and V. A. Fetisov “Planirovanie raboty morskogo passazhirskogo terminala na osnove issledovaniya intensivnostej zakhodov kruiznykh sudov.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 3 (2019): 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.
12. Tsamboulas, D., P. Moraiti, Koulopoulou G. “How to forecast cruise ship arrivals for a new port-of-call destination” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2330 (2013):24–30. DOI: 10.3141/2330-04.
13. Krile S. “Efficient Heuristic for Non-linear Transportation Problem on the Route with Multiple Ports”. *Polish Maritime Research*. Gdansk. Poland 20.4. (2013): 80–86. DOI: 10.2478/pomr-2013-0044.
14. Katalevsky, D. Yu. *Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* M.: Izdatel'skij dom «Delo»: RANEPa, 2015.

15. Yazvenko, M. R. and A. G. Morozkov “Modelirovanie morskogo gruzovogo porta kak sistemy massovogo obsluzhivaniya v srede AnyLogic.” *Sistemnyy analiz i logistika* 4(26) (2020): 59–66. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-59-66.

16. Maiorov, Nikolai N., and Yazvenko Maksim R., “Research and Development of an Algorithm for Multi-Priority Flows in Transportation Systems”, *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2024:1–4. DOI: 10.1109/WECONF61770.2024.10564652.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Язвенко Максим Романович — аспирант
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения» 190000, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maiorov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Yazvenko, Maksim R. — Postgraduate student
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
e-mail: YazvenkoM@guap.ru

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Received: Nov. 12, 2024.

GENERALIZATION OF THE UNDERWATER RELIEF IMAGE USING THE SPLINE APPROXIMATION METHOD ON A VECTOR ELECTRONIC CHART

I. V. Yuyukin

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

Special attention is paid to the need for reasonable generalization aimed at adequately displaying the characteristic features of the seabed relief profile in accordance with the principle of navigational isosurface in electronic visualization of underwater relief. It is assumed that as a result of generalization of the bottom relief, safety contours can be extracted directly, since they represent traces of a cross-section of the profile of the underwater relief with horizontal planes. A hypothesis has been put forward on the applicability of the B-spline approximation for modeling a safety contour in order to effectively implement a practical guarantee against grounding a ship. A modification of the safety contour based on the control of the smoothness of the constructed curve in the form of bending of a serpentine B-spline structure has been tested. An analysis of the optimality of configuring B-splines on a variable type of supports is carried out with the determination of preference for the cubic case. The straightening of the safety contour focuses on local deformation while maintaining strategic descriptive characteristics. The use of the smoothing procedure on the deep side of the safety contour is justified, provided that the basis points of the synthesized curve are artificially preserved. The data of the author's computational experiment on the accuracy of calculation by cubic B-splines with a result two orders of magnitude higher than theoretically predicted are presented. It is noted that the technologies of automated processing of bathymetric survey results do not replace the human factor, but provide the potential to unlock new cognitive capabilities of an expert in the transition from lithographic publications to digital cartographic products. The arsenal of basic piecewise approximation is interpreted as the variability of the model of an additive B-spline neural network to provide an incentive for the use of artificial intelligence to generalize contour lines of marine subjects. It is emphasized that the spline technology, by its mathematical architecture, is basically devoid of the computational problem of dimensionality, which serves as an additional factor for the use of piecewise approximation in solving complex navigation tasks.

Key words: navigational isosurface, generalization of the underwater relief, snake B-spline structure, straightening of a safety contour, smoothing procedure, B-spline neural network, the problem of dimension.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.

УДК 656.61.052

ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ СПЛАЙНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ НА ВЕКТОРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТЕ

И. В. Ююкин

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

Особое внимание в работе уделено необходимости обоснованной генерализации, направленной на адекватное отображение характерных особенностей профиля рельефа морского дна в соответствии с принципом навигационной изоповерхности при электронной визуализации подводного рельефа. Предполагается, что как результат генерализации рельефа дна непосредственно могут быть использованы изобаты, поскольку они представляют собой следы сечения профиля подводного рельефа горизонтальными плоскостями. Выдвинута гипотеза о применимости B-сплайновой аппроксимации для моделирования без-

опасной изобаты с целью эффективной реализации практической гарантии от посадки судна на мель. Апробирована модификация изобаты на основе управления плавностью сконструированной кривой в виде изгибающей змеевидной В-сплайновой структуры. Выполнен анализ оптимальности конфигурирования В-сплайнов на различном типе носителей с определением предпочтения кубическому случаю. Спряменение безопасной изобаты акцентируется на локальной деформации при сохранении стратегических описательных характеристик эмпирической кривой. Обосновано использование процедуры сглаживания на глубокой стороне безопасной изобаты при условии искусственного сохранения базисных точек синтезированной кривой. Приведены данные авторского вычислительного эксперимента точности расчета кубическими В-сплайнами с результатом на два порядка выше теоретически прогнозируемой. Отмечается, что технологии автоматизированной обработки результатов батиметрической съемки не заменяют человеческий фактор, но дают потенциал раскрыть новые когнитивные возможности эксперта при переходе от литографских изданий к цифровым картографическим продуктам. Арсенал базисной кусочной аппроксимации интерпретируется как вариативность модели аддитивной В-сплайновой нейронной сети для обеспечения стимула к применению искусственного интеллекта для обобщения контурных линий морской тематики. Подчеркивается, что сплайновая технология по своей математической архитектуре в принципе лишена вычислительной проблемы размерности, что служит дополнительным фактором для применения кусочной аппроксимации при решении сложных навигационных задач.

Ключевые слова: навигационная изоповерхность, генерализация подводного рельефа, змеевидная В-сплайновая структура, спряменение безопасной изобаты, процедура сглаживания, В-сплайновая нейронная сеть, проблема размерности.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.

Введение (Introduction)

Одним из основных компонентов, характеризующих навигационно-гидрографические условия морских районов, является рельеф дна, поскольку он оказывает существенное влияние на безопасность маршрутизации морских подвижных объектов [1]. При изображении подводного рельефа большое значение имеет обоснованная генерализация, направленная на отображение характерных особенностей профиля рельефа морского дна. Под картографической генерализацией понимается отбор и обобщение изображаемых на карте объектов соответственно их назначению, масштабу, содержанию и особенностям подводного рельефа. Генерализация с элементами абстракций проявляется в обобщении качественных и количественных характеристик объектов, замене индивидуальных понятий собирательными, отвлечении от частных и деталей в целях отчетливой визуализации главных черт пространственного размещения. При этом генерализацию удобнее рассматривать не как отдельные операции отбора и обобщения, а как единый процесс, который находит выражение в спрямлении изобат на месте исключенных извилин, в «утрировании» форм рельефа, в целенаправленном смещении или сдвиге изобат для достижения достоверного изображения¹.

Процесс генерализации осуществляется путем допустимого упрощения подводного рельефа и выделения его характерных форм, полученных с помощью цифровой модели. В процессе генерализации всегда приходится находить баланс между эффективными визуальными приемами для описания форм концептуальной модели подводного ландшафта и методами, позволяющими получить точные данные о рельефе [2]. В конечном итоге цифровая модель рельефа визуализируется для его отображения на векторной электронной карте. Поскольку карты создаются в широком диапазоне масштабов, необходима соответствующая генерализация цифровой модели рельефа, в противном случае его представление будет неполным. Отсутствие генерализации рельефа снижает удобочитаемость карты и ухудшает ее визуальное восприятие.

Каждый метод генерализации выполняется в соответствии с масштабом карты и уровнем детализации, необходимым для четкого отображения и требует определенного сочетания между

¹ Смирнова Е. Б. Основы изображения подводного рельефа на морских картах. Л.: ЦКФ ВМФ, 1973. 162 с.

визуальным качеством и точностью представления данных. В вопросе детализации сложно найти точные рекомендации по типичному размеру рельефа. Обычно считается, что этот размер должен отражать особенности поверхности, характерные для картографического масштаба. Генерализация геометрической формы рельефа морского дна состоит в продуманном стилизованном упрощении очертаний географических объектов, при котором сохраняются их типичные формы и особенности кривизны, но при этом допускается целенаправленный сдвиг линий, их спрямление, увеличение деталей топографии, объединение контуров и намеренное изменение исходной формы изобаты в целях наибольшей наглядности и выразительности при достижении реалистичности отражения генезиса и морфологии. Как результат генерализации из модели рельефа дна непосредственно могут быть извлечены изобаты, области глубин и отдельные глубины [3].

Существующая классическая технология отображения рельефа дна основана на принципе отбора наименьших глубин на этапе построения модели рельефа дна, разрешающая способность которой определяется масштабом электронной карты, а не стремлением подробного отображения рельефа дна. Методика представления данных съемки в виде навигационной изоповерхности рассматривается как альтернатива традиционному методу представления информации о рельефе дна для создания детальных баз батиметрических данных [4]. По своей сути данный подход может оцениваться как новый принцип картографирования рельефа дна судоходных акваторий [3]. С позиции требований, предъявляемых к навигационной изоповерхности, данные съемки архивируются как полная цифровая модель морского дна, а не как отдельный набор сертифицированных зондирований.

Разработанный процесс обработки батиметрической информации в парадигме навигационной изоповерхности предлагает новый перспективный подход к управлению, архивированию и созданию картографических продуктов на основе данных гидрографической съемки. Подход к проблеме генерации гидрографических глубинных контуров из необработанных входных данных с позиций понятия навигационной изоповерхности основан на непрерывной интерполяции плоскометрических точек батиметрических данных для обоснованного картографического обобщения. При игнорировании привязки к сетке или растеризации сохраняются позиции всех входных точек в их контурных координатах в процессе математической обработки, что с точки зрения геометрической реализации формирует кусочно-линейную поверхность как систему линий контуров глубины и создает удобную возможность аппроксимации непосредственно навигационной изоповерхности методами сплайн-функций.

Применимость методологии навигационной изоповерхности для автоматизированной организации обработки высокоскоростных измерительных данных многолучевого эхолота на основе их представления в виде цифровой модели проверялась практически проведением натурных экспериментов на специализированных судах [5]. Эксперименты показали, что сплайновый алгоритм может использоваться в режиме реального времени в отличие от традиционного подхода, но для получения максимальной выгоды от предлагаемого метода необходима тесная интеграция инструментов визуализации и математической корректуры результатов измерений, в данном случае ожидаемый прогресс будет варьироваться в зависимости от качества исходных данных. В целом гидрографические исследования доказали, что концепция навигационной изоповерхности может обеспечить точное статистическое представление морского дна. Считается возможным формировать представление гидрографических данных в виде навигационной изоповерхности на основе оптимизированной сплайнового алгоритма с обеспечением сохранения в виде цифровой модели полученных при съемке геопространственных данных большой разрешающей возможности [6]. Целостный сплайновый подход исключает субъективность предлагаемого метода отбора глубин для нанесения их на электронную карту при создании цифровой модели рельефа дна, интерпретируемой в математическом смысле как навигационная изоповерхность.

Геометрически изобаты представляют собой следы сечения форм подводного рельефа горизонтальными плоскостями, находящимися одна над другой на заданных расстояниях. Значение приобретают подходы создания цифровой модели рельефа по изолиниям с восстановлени-

ем методами сплайн-функций информации, заложенной непосредственно в структуре изолиний как геометрических объектов [7]. Изобаты, сформированные на основе математического обобщения отметок глубин, несут гораздо больше информации, чем набор отдельных значений глубины, по которым их проводят. С появлением акустических средств измерения глубин изобата проявила другую графическую возможность — передавать в изолиниях морфологические особенности рельефа: очертания форм, крутизну и расчлененность подводных склонов. На основе результатов анализа коллекции изобат можно представить общий характер подводного рельефа.

В последние десять лет начали издавать специальные морские карты, на которых для большей наглядности используют цветовую и светотеневую пластику в виде послойной окраски с приемами «освещения» и «затенения» изобат [8]. В приеме *освещенных изобат* вся поверхность морского дна закрашивается определенным тоном, а изобаты вычерчиваются белым цветом на освещенных поверхностях подводного рельефа и темно-синей на противоположных. Такое изображение способствует усилению объемного восприятия очертаний форм рельефа. К сожалению, этот прием затрудняет использование навигационных морских карт по своему прямому назначению: становятся малозаметными другие элементы гидрографической нагрузки, снижается контрастность линий, обозначений и надписей при подъеме карты и ведении навигационной прокладки. Прием *затененных изобат* по принципу создания объемной картины рельефа не отличается от способа «освещения». Однако здесь вся площадь дна остается белой. На освещенных склонах изобаты проводят более тонкими голубыми линиями, а на теневых — утолщенными линиями темно-синего цвета. Для большего усиления наглядности помимо «освещения» или «затенения» изобат дополнительно используют послойную окраску. Для морских акваторий традиционны оттенки серого, зеленого, синего и фиолетового цветов со шкалами возрастающей яркости от черного к белому цвету [9].

Изобаты отображают геоморфологическую особенность морского дна, показательно указывают на мелководье и обеспечивают наглядность навигационной информации для мореплавателей. Скоординированная модификация изобат выполняется либо при переходе от одного масштаба к меньшему, либо в пределах заданного масштаба для улучшения качества представления. Вследствие данных фактов сплайновое моделирование изобат представляет самостоятельный научный интерес для отдельного исследования.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Исследование вопроса важности аппроксимации изобат в фокусе четкой визуализации на ЭКНИС как следствие генерализации подводного рельефа.
2. Проведение анализа оптимальности конфигурирования *B*-сплайнов на вариативном типе носителей.
3. Создание алгоритма приближения изобаты базисными финитными сплайнами с обеспечением конструктивного сжатия массивов данных навигационных параметров.
4. Программная реализация для бортового компьютера *B*-сплайнового алгоритма в целях обеспечения автоматизированного моделирования изобаты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Изобата в полной мере предоставляет важную графическую возможность передавать в изолиниях морфологические особенности рельефа при составлении батиметрических карт по результатам гидрографических исследований. Поэтому при формировании изображения подводного рельефа на морских в первую очередь выбирается обработка отдельных *безопасных изобат* с акцентированием большого внимания меньшим глубинам. В решении задачи картографического обобщения представляется целесообразным акцентировать внимание на моделировании *безопасной изобаты*, которая как ограждающая изолиния является виртуальной границей между потенциальной опасностью для морского подвижного объекта и безопасностью судоходства в качестве гаранта от посадки судна на мель в морской акватории, находящейся за критическим контуром контрольной глубины. Фактическая глубина безопасной изобаты может быть оперативно

изменена вахтенным помощником с учетом конкретных обстоятельств плавания. Под вводимой судоводителем параметром «безопасная изобата» понимается глубина, пересечение которой заблаговременно автоматически предупреждается аварийной сигнализацией ЭКНИС как о риске посадки на мель.

Смысл параметра «безопасная изобата» заключается в однозначном обозначении границы опасности мореплавателям при представлении на экране ЭКНИС окрашиванием мелководья в сине-голубой цвет и безопасного в навигационном отношении открытого моря в виде белого фона, как показано на рис. 1. Ограничивающая мелководье модель линии равных глубин как границы навигационной опасности выделяется насыщенным цветом с допустимым варьированием на мониторе ЭКНИС ее местоположения от береговой черты в зависимости от заданного фактического значения параметра «безопасной изобаты».

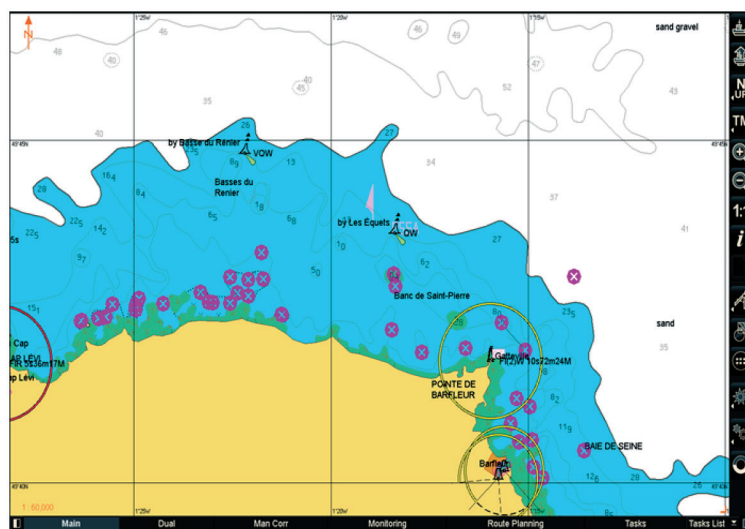


Рис. 1. Скриншот фрагмента векторной электронной карты с фиксированием «безопасной изобаты»

Приоритетную важность приобретает установка в режиме мониторинга ЭКНИС предметной реализации вариационной опции «безопасная изобата». Фактически при помощи данной функции судоводитель самостоятельно задает для собственного судна безопасную границу области электронных глубин. В общем случае изобату 20 м следует считать *предостерегательной* для судов с осадкой более 6 м, а изобату 10 м — для судов с малой осадкой². В настройках современных ЭКНИС значение *опасной изобаты* по умолчанию задается равным 30 м³.

Цифровой характер линии, хоть и представляет собой исследовательский потенциал, но одновременно демонстрирует масштаб проблем, связанных с апостериорной оценкой точности формы контурной линии. Неопределенность в наличии навигационных опасностей приводит к неопределенности в построении изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа [10]. Вследствие этого применяется *картографическое обобщение*, которое начинается с обработки контуров малой глубины и продолжается на изолиниях больших глубин. С целью релевантного составления электронных карт применяется надежное редактирование батиметрической информации, отображаемой на морской карте как обеспечение процесса, называемого *картографическим обобщением*. Следует отметить, что судоводители в своей практической деятельности должны учитывать неопределенность отображения подводного рельефа на морских навигационных картах и понимать, что морская навигационная карта не гарантирует отображение всех подводных навигационных опасностей [10]. В этом смысле картографическое

² Дмитриев В. И. Навигация и лоция: учебник. М.: ФГБУ «Морречцентр», 2015. — 360 с.

³ Дерябин В. В. Использование электронных картографических навигационных информационных систем: тренажерная подготовка: учеб. пособие. СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2024. — 140 с.

решение, как правило, не является уникальным, но удовлетворяет различным требованиям в большей или меньшей степени.

Картографическое обобщение соответствует общему принципу безопасного судоходства для обеспечения тенденции смещения обобщенного контура глубины в глубоководные районы [11]. Каждая критическая линия контура глубины должна быть обобщена индивидуально. Картографическое обобщение может быть успешно реализовано, если оно основано на понимании формы изобаты. До тех пор, пока визуальный признак четкости изолинии не будет определен аналитически, он будет оставаться основной гидрографической проблемой для полной автоматизации задачи обобщения. По мере совершенствования технологии сбора батиметрических данных с более высоким разрешением повышается потребность в устойчивых автоматизированных алгоритмах обобщения, учитывающих ограничения морской картографии, поскольку ошибки на этом этапе переносятся на конечный электронный продукт.

Формальное описание формы изобаты без учета геометрических различий является необходимым условием для изучения ошибок, возникающих при обобщении данных для предотвращения любых рельефных несоответствий. Таким образом, погрешность становится функцией формы репрезентативной линии на электронной карте, которая является необратимым детализированным фактором. Процедура обобщения соответствует картографическому принципу: изображенное на карте меньшего масштаба аналогично должно быть изображено на картах большего масштаба с целью обеспечения надежного уровня детализации. В целом метод обобщения глубинных контуров обеспечивает целостный подход к проблеме адекватного представления батиметрических данных на современных электронных картах. Электронное представление навигационной нагрузки должно создаваться как удобочитаемая карта, максимально приближенная к реальности.

Помимо требования безопасности, в процессе обобщения необходимо учитывать обязательность условия удобочитаемости электронной карты. Ни при каких обстоятельствах безопасная изобата не должна допускать любых геометрических «конфликтов», таких, например, как изобатная петля или пересечение изобат. Эти противоречия необходимо устранить во время операции картографического обобщения. Каскадные конфликты визуализации изобат необходимо расценивать как мнимые пересечения, поскольку картографическое представление не соответствует масштабу или имеет проявление неожиданных графических эффектов из-за возможных математических ошибок. Реалистичное восприятие визуализированной информации на мониторе ЭКНИС ориентировано на эффективную обработку результатов гидрографической съемки посредством агрегирования батиметрических данных, реализующегося в геометрическом контексте в *обобщении изобат* [12]. Целевое назначение обобщения заключается в четком графическом представлении любых линий на векторной электронной карте оптимальным образом. Процесс обобщения реализует комбинацию различных геометрических моделирований с целью достижения картографического компромисса для безопасности судовождения [13]. С математической точки зрения в процессе обобщения гарантированно обнаруживается серия конфликтующих сеточных сегментов интерполирующей функции. Перегруппировав проблемные сегменты, можно получить удовлетворительную сплайн-аппроксимацию батиметрических данных.

Обобщенное представление изобаты — это процесс выбора того, какое содержание должно быть убедительно показано и как оно будет представлено на электронной навигационной карте в процессе обработки пространственных данных с целью достижения четкой картографической визуализации контура глубины для обеспечения безопасности плавания судов. Унифицированным вариантом приближения изобат представляется применение методов базисных сплайн-функций. *В*-сплайновые изолинии не требуют явного задания производных и локальное изменение узлов не приводит к необходимости повторного вычисления всей алгебраической кривой. *В*-сплайн в геометрическом представлении является составной линией, позволяющей при аппроксимации набора сеточных точек избежать нежелательных осцилляций, характерных для интерполяционных многочленов высокой степени.

Численные расчеты при тестировании известного феномена Рунге показали, что гарантированно обеспечивается высокая точность аппроксимации в ситуации применения базисных сплайнов третьей степени [14]. Увеличение степени полинома для улучшения заданного соответствия может привести к неожиданным флуктуациям в соответствии с онтологией примера Рунге как классического доказательства ухудшения восстановления формы алгебраической кривой при необоснованном выборе сплайна высокой степени в качестве аппроксиматора. Вычислительная оптимальность аппроксимации любой изобаты основана на практическом применении B -сплайнов, которые при конструктивной гладкости имеют минимальный носитель с локальным интерполяционным базисом. Это обеспечивает при введении новых узлов локальное изменение сплайна. В локальных схемах аппроксимаций при достижении максимального порядка точности коэффициенты при базисных функциях определяются как значения функционалов, представляющих в математическом формате комбинации значений приближаемой функции и ее производных в определенных маркерных точках.

Стратегическое преимущество изолинии, построенной при помощи кубических B -сплайнов, заключается в том, что намеренное изменение одной из характеристических точек изолинии вызовет изменение только четырех последовательных соседних сегментов восстановленной кривой. Как следует из анализа рис. 2, тактическое варьирование одним геометрическим фрагментом обуславливает в кубическом случае сплайна модификацию только четырех сеточных отрезков и позиций пяти характеристических точек при алгоритмической возможности местной корректировки дефектного фрагмента сплайновой линии без фатальной перестройки всей аппроксимированной изолинии.

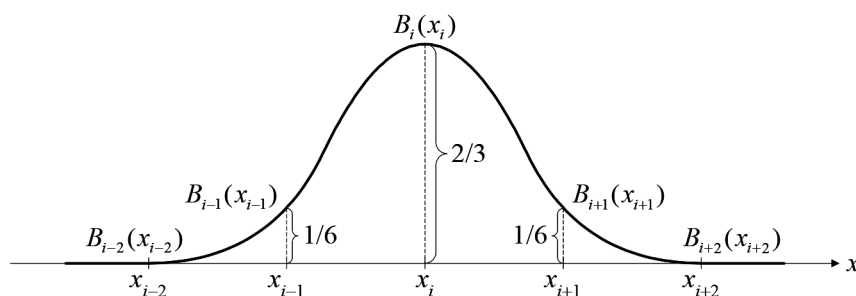


Рис. 2. Четыре сеточных сегмента
и пять узловых точек единичного кубического B -сплайна

В соответствии с рис. 2 набор локальных базисных функций в сумме образует неотрицательное разбиение единицы. Для того чтобы локально изменить кривизну общей геометрии изолинии, первоначально необходимо определить смежные контрольные точки, влияющие на кривизну, а затем изменять их позиции одну за другой (см. рис. 2). При кусочном синтезировании базисная финитная функция является вторичным фактором по отношению к оригинальной формализации, а сам B -сплайн — математическим инструментарием для приближения навигационной изолинии. Оптимальный способ устранения геометрических особенностей оригинальной изобаты реализуется в построении сплайнового многозвенника, в котором составные полиномы низкой степени последовательно применяются для первоначальной интерполяции навигационной функции на базисе групп точек. Полученная в результате «склеенная» кусочно-полиномиальная конструкция будет непрерывной, но в общем случае может иметь разрывы производных в точках соединения последовательных отрезков алгебраической кривой.

Представляется целесообразным выполнить анализ оптимальности конфигурирования B -сплайнов на вариативном типе носителей. Существует возможность построить систему базисных функций различными путями. Можно, например, умножить $B_i(x_i)$ на скалярные множители и получить альтернативную систему. В прогнозируемой ситуации «шапочные» функции утратят свойство нормализованности, т. е. алгоритмической возможности разбиения численной единицы на составляющие для базисного сплайна (см. рис. 2). Можно построить финитные функции и с другим носителем,

содержащим не четыре интервала, а, например, пять или более, но уменьшить носитель не удастся. В этом можно убедиться, если выполнить подсчет коэффициентов и условий, налагаемых на элементы $B_i(x_i)$.

В случае носителя, состоящего из трех интервалов, число коэффициентов равно числу условий, и решением служит сплайн, тождественно равный нулю. При двух сеточных интервалах задача переопределена, т. е. коэффициентов меньше, чем условий, и также имеет место лишь нулевое решение. Таким образом, задача искусственного моделирования изобат решится наилучшим образом, если применяемая кубическая базисная функция образуется на четырех сеточных носителях. Благодаря конструктивной особенности построения базисной структуры B -сплайна третьей степени на четырех сеточных отрезках объем хранимой информации аппроксимации, соответственно, сокращается в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [15]. При существующей вариативности применения базисных сплайнов выдвигается теоретический аргумент в пользу оптимальности кубической B -сплайновой конструкции с управляемой кривизной для моделирования любых контурных линий морской тематики [16]. Предлагается применять математическую формализацию безопасной изобаты на основе методов сплайн-функций для автоматизации процесса изолинейного плавания.

Традиционные навигационные параметры в общепринятом смысле полностью характеризуют внутреннюю геометрию изолинии плавания судна⁴. В ситуации применения сплайн-функций добавляется дополнительный параметр внутренней геометрии аппроксимированной изолинии — математическая «гладкость». Параметрическое представление навигационной изолинии может составить фундаментальную основу для конструирования инновационного технического устройства с целью организации изолинейного плавания при условии восстановления геометрии характерной изолинии методом сплайн-аппроксимации. Важное практическое свойство вытекает из кусочной архитектуры сплайна, который восстанавливает навигационную функцию группой сегментных полиномов в соответствии с условием «гладкости» на каждом сеточном участке.

Для автоматизации процесса выбора программной траектории и управления движением судна необходимо иметь математическое описание опасной изобаты в географической системе координат. Сплайн, описывающий опасную изобату с точки зрения навигационной безопасности, должен восстанавливать ее с заданной точностью, а с точки зрения удобств хранения информации использовать как можно меньше узлов для сокращения объема данных [17]. Предлагаемый метод может быть применен для уменьшения объема хранимой информации об опасной изобате при создании электронных карт.

Методы на основе базисных сплайнов являются перспективным инструментом для создания оптимальной схемы моделирования программируемой линии движения судна [18]. В перспективном аспекте универсальность сплайн-функций предусматривается вследствие гипотетической возможности прогнозирования организации программируемого плавания не только по изученным классическим изолиниям, но и по новейшим линиям равных значений навигационных параметров, которые могут появиться в будущем при технологических инновациях судовождения. Сплайновую апробацию аппроксимации безопасной изобаты финитными сплайнами можно трактовать как усиление позиций обобщенного метода навигационных изолиний с применением достижений перспективной математики.

Результаты (Results)

Несмотря на то, что в процессе литографской печати получался, бесспорно, красивый внешний вид бумажной карты, тщательная типографская подготовка гарантирует, что навигационная информация морально устареет к тому времени, когда мореплавателю доставят карту на судно. В условиях современности автоматическая корректура ЭКНИС играет важнейшую роль для первоочередного

⁴ Вульфович Б. А. Основы общей теории навигационных изолиний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. А. Вульфович. Л., 1975. — 43 с.

информирования судоводителя о безопасности судоходства по электронной карте при четкой наглядности визуализации безопасных изобат.

Большинство навигационных карт представляют собой совокупность геопространственной информации различного качества, аккумулированной с использованием различных методов в разное время. Данные, полученные с помощью многолучевых эхолотов высокого разрешения, могут соседствовать на карте с гидрографической информацией, собранной еще в XVIII в. [19]. Гидрографические работы относятся к дорогостоящим видам морской деятельности, поэтому при их проведении приходится преодолевать противоречие между необходимостью увеличения подробности съемки и планированием обследования максимальной по площади акватории [10].

Несколько десятилетий назад требования к высококачественным картам были иными, чем в условиях современности. Чтобы удовлетворить постоянно растущие потребности современного торгового судоходства в более точном знании рельефа морского дна, мировое гидрографическое сообщество внедрило новые системы и методы сбора, обработки и распространения информации. Значительным достижением в морской навигации за последние три десятилетия, безусловно, является ЭКНИС. Помимо отображения информации, содержащейся в электронной карте, реализована интеграция навигационных систем ГНСС, АИС и САРП. Максимальное интегрирование разнородных систем позволяют современным судоводителям оперативно выполнять задачи, которые в прошлом мореплавателям было сложно решать [20]. Примером является электронная маршрутизация судна с активацией функции аварийно-предупредительной сигнализации в ситуации, когда судно пересекает безопасную изобату. Кроме того, метеорологическая и океанографическая информация может быть инкорпорирована в ЭКНИС, помогая вахтенному помощнику эффективно выполнять рейсовое задание.

Гидрографические данные содержат набор зондирований со значительным количеством нарушений картографических ограничений, что создает прецедент необходимости последующего картографического обобщения. Полная автоматизация процесса составления электронных морских карт усложняется из-за строгих каскадных картографических ограничений, связанных с безопасностью и подводной топологией, в то время как остается сомнение, может ли автоматизация абсолютно заменить человеческий элемент [21]. Креативные технологии автоматизированной обработки результатов батиметрической съемки не столько заменяют человеческий фактор, сколько дают ему потенциал раскрыть новые возможности при переходе от литографских картографических изданий к цифровым моделям. Подтверждением служит тот факт, что на период 2015 г. более 4000 лоцманов как участников балльной системы поощрения ассоциации лоцманской службы США в соответствии с передовым опытом политики краудсорсинга внесли более 28000 значимых исправлений в национальные электронные карты [22].

В связи с растущим развитием технологии ЭГИС необходимость совершенствования эффективных методов визуализации географических данных является актуальной задачей [23]. Формально автоматизированная обработка гидрографической информации доступна к практической реализации, но проверка батиметрических данных в определенных обстоятельствах остается ручным процессом в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа. Поэтому Правила гидрографической службы № 4 (Съемка рельефа дна суходонных морских и речных акваторий. — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 314 с.) определяют необходимость интерактивного исправления данных при атрибутировании результатов съемки рельефа дна с обеспечением 95%-й доверительной вероятности: «...После автоматической обработки выполняется просмотр результатов. Их проверка и / или разрешение любых оставшихся неопределенностей должны осуществляться опытным и ответственным гидрографом». Обработка гидрографических данных сокращается в результате акцентирования внимания только на тех областях, в которых определена значительная неопределенность промеров для выявления аномальных морфологических особенностей морского дна. Для этого этапа рекомендуется использовать средства трехмерного отображения. Достоверность данных съемки является основным критерием качества выполненных работ.

Поскольку визуализация электронной карты автоматизирована, специалист может сосредоточиться исключительно на проверке сомнительного результата [12]. В этом случае увеличивается скорость изготовления векторных электронных карт и значительно снижаются производственные затраты. Идеальной ситуацией была бы реализация полного автоматизированного обобщения для бесперебойного создания морских карт из обширной базы данных. Однако, несмотря на исследовательские усилия с использованием искусственного интеллекта, задачи обобщения морских карт остаются полностью нерешенными в автоматизированном аспекте, в отдельных ситуациях выполняются вручную или полуавтоматически при ожидаемом допущении влияния человеческого фактора [11].

Аппроксимация изобат на основе применения финитных сплайнов позволяет использовать алгоритмические преимущества в морском контексте. Оптимальным образом изобаты моделируются с помощью *B*-сплайнов, сохраняющих плавность сконструированных кривых. Интуитивное понимание принципа построения аппроксимирующей изобаты сводится к реализации приближения к фиксированным контрольным вершинам, которые находятся на стороне безопасной глубины. Допускается возможность приложить искусственные усилия в определенных местах области определения навигационной функции, чтобы частично деформировать изолинию в сторону безопасности. Основанное на особенностях обобщения изобат в соответствии со значимостью подчеркивает характерные подводные объекты в соответствии с их значением. Например, изобата, моделирующая риф, сохраняется и может быть увеличена, в то время как изобата, обозначающая впадину, может быть просто опущена [24].

Для практического выполнения задачи выполняются специальные математические операции частичного деформирования изолинии, обеспечивающие локальную коррекцию изобаты с целью изменения протяженности объекта в целях обеспечения *спрямления изобаты* [2]. С позиций сплайн-функций применяется аллегория змеиной модели с объяснением сути подхода в физических терминах сохранения внутренней энергии. Последующее сглаживание изолинии выполняется путем сохранения базисных точек кривой всегда на глубокой стороне безопасной изобаты, как представлено на рис. 3 [25], где показаны ограничения безопасности с помощью оригинальной линии безопасной изобаты (original isobath) и двух примеров ее обобщения. Применение точечной пунктирной линии недопустимо (non valid generalisation), поскольку она не проходит полностью по глубине исходной линии. Участки этой линии на мелководной стороне не соответствуют требованиям безопасности судоходства. Точечная пунктирная линия небезопасна, так как в этом случае судоводитель может подумать, что море фактически глубже, чем оно представлено на карте, в местах, отмеченных светло-серым цветовым оттенком. Пунктирная линия с длинными штрихами полностью проходит по глубокой стороне морской акватории (area of greater depth) и соответствует требованиям безопасности (valid generalisation). На рис. 3 рассмотрена ситуация, поясняющая необходимость реализации тенденции смещения контура безопасной изобаты в сторону более глубокой воды. При любых обстоятельствах навигационная карта должна соответствовать правилу смещения безопасной изобаты в сторону увеличения глубины для реализации гарантии того, что судно никогда не сядет на мель из-за искаженного предоставления гидрографической информации [25].

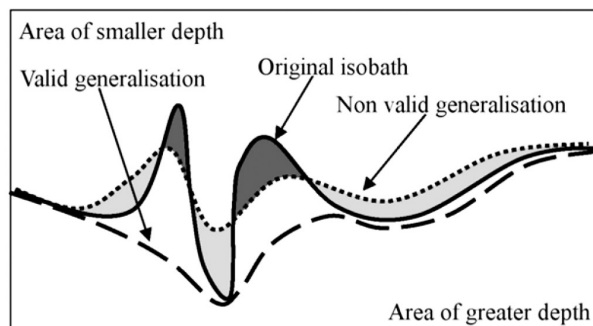


Рис. 3. Обобщение безопасной изобаты в сторону глубоководной акватории

При изменении масштаба карты на меньший необходимо сгладить изобату, чтобы удалить ненужные детали и получить разборчивую четкость плоской кривой. Из анализа рис. 3 следует констатация факта ограниченности положения финальной безопасной изобаты, сглаживание которой необходимо выполнять, изогнув линию на более глубоководную сторону. Сглаживание используется для улучшения эстетических характеристик алгебраической кривой путем устранения острых углов и ослабления ее осциллирующих колебаний. Процесс сглаживания включает в себя упрощение формы безопасной изобаты за счет устранения неконструктивных деталей с целью сохранения основной информации о форме и ориентации кривой линии, удаляя при этом несущественную информацию. Сглаживание выполняется путем сохранения базисных точек сплайновой кривой всегда на глубокой стороне исходной линии, чтобы финальный результат соответствовал безопасности представления гидрографической информации [26].

Интерпретируемая по морской карте оцифровка изобаты не должна превышать реальной глубины [27], так как в противном случае судоводитель может посчитать, что глубина акватории превышает официальный подводный рельеф. Суть проблемы ограничения безопасности при реализации картографического обобщения отображает рис. 4 [2].

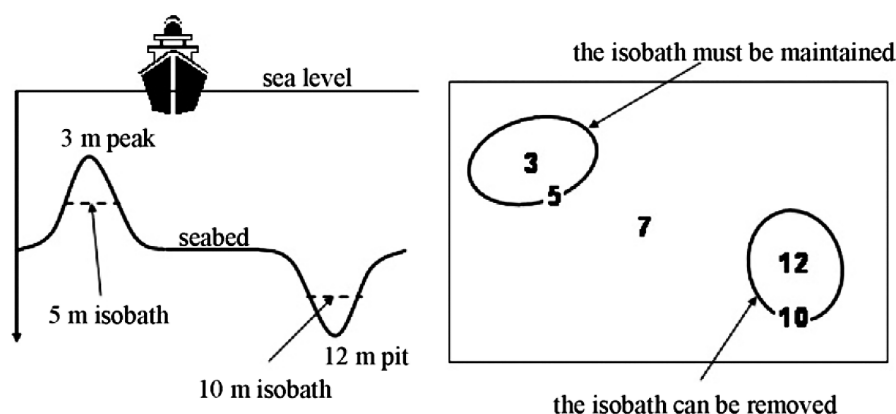


Рис. 4. Демонстрация ограничений безопасности с оцифрованными изобатами и точечными глубинами

Слева показан вертикальный разрез моря от морского дна (seabed) до водной границы уровня моря (sea level) с трехметровым выступом (peak) и 12-метровым углублением (pit), справа — фрагмент морской карты с изобатами и точечными глубинами, соответствующей демонстрируемой в левой части рис. 4 гидрографической ситуации. Изобату, обозначающую глубину в 10 м, можно убрать с графического представления данного географического участка (the isobath can be removed), но обязательно необходимо визуализировать пятиметровую изобату (the isobath must be maintained), обозначающую подводную вершину. На электронной карте необходимо сохранить рельеф морского дна и подчеркнуть наиболее характерные геоморфологические структурные элементы. Модификация изобатиметрического контура может производиться путем перемещения точек изолинии в более глубокие области морской акватории при абсолютной недопустимости обратной ситуации. Разборчивый результат гибридного подхода, при котором в ручном режиме проверяются и исправляются результаты работы автоматических алгоритмов обобщения, является актуальным и прагматичным решением. При картографическом обобщении изобат автоматизированная система не всегда может определить, какая сторона изобаты глубже. Например, возможна ситуация, когда окружающие изобаты находятся на одинаковой глубине. Необходима идентификация гидрографической информации, чтобы экспертная система могла правильно автоматически осуществить операцию обобщения изобаты.

В последнее десятилетие в картографическом обобщении на векторных электронных картах начал активно использоваться принцип смещения выпуклости безопасной изобаты в сторону глубоководной акватории с целью максимального обеспечения безопасности судоходства [28].

B-сплайновый метод, основанный на серпантинной аллегории змеиной модели, точно учитывает ограничения, связанные с удобочитаемостью и безопасностью морской карты, которые определяют тенденцию деформации синтезированной изобаты. Плоские кривые, моделируемые с помощью *B*-сплайнов, оптимально подходят для моделирования изобатиметрических контуров, поскольку они сохраняют плавность линий и позволяют оперативно формировать изменения сложных геометрических форм.

В процессе гидрографической обработки для оценки гладкости кривой используются две основные характеристики: натяжение и изгиб. Натяжение определяется первой производной по оси абсцисс криволинейной линии. Если производная глобально мала вдоль кривой, это означает, что кривая растянута. Напряжение также связано с длиной аппроксимируемого контура, поскольку кривая укорачивается при растяжении. Изгиб определяется геометрической кривизной. Обобщенные изобаты адекватно отображают геоморфологическую форму морского дна с изменчивой топологией, указывают на мелководье и обеспечивают безопасность навигационной информации для мореплавателей. Искусственная трассировка изобат выполняется таким образом, чтобы навигационная информация по своей сути была абсолютно безопасной для судовождения при выполнении условия сохранения эстетического качества векторной карты.

Аппроксимированная сплайнами изобата рассматривается как деформируемая модель с собственной энергией, определяемой ее производными, и учетом внешних ограничений, связанных с обеспечением безопасности при обязательном выполнении условия удобочитаемости карты. Безопасность судовождения соблюдается, если сглаженная кривая полностью расположена на более глубокой стороне акватории по сравнению с ее исходным положением. В физическом понимании для предотвращения неправильных графических смещений нормализованная энергия, пропорциональная расстоянию от начальной кривой, прикладывается к точкам, расположенным на меньшей стороне, что с математической точки зрения обеспечивает успешное манипулирование производными навигационной функции в фиксированных сеточных узлах.

При модификации топологии безопасной изобаты гарантированно может быть найдено положение интерпретируемого энергетического равновесия, которое удовлетворяет требованиям безопасности судовождения. Чтобы предотвратить незапланированную деформацию аппроксимированной изобаты, характерные контрольные точки фиксируются для сохранения основных характеристик изолинии. После сглаживания или уменьшения масштаба искусственная изолиния может быть представлена с меньшим количеством маркерных точек по причине удаления лишних метаданных карты. Количество реперных точек определяется для достижения наилучшего сжатия изобаты с допуском, заданным толщиной карандашной отметки на бумажной карте, чтобы человеческим взглядом не воспринималась разница между ломаной линией и сглаженной *B*-сплайновой кривой. Таким образом, форма плоской кривой определяется алгоритмически для того, чтобы в физической интерпретации обобщения сбалансировать влияние внутренней и внешней энергий таким образом, чтобы результирующая линия была как можно более гладкой, но при этом удовлетворяла внешним ограничениям безопасности.

В ходе процесса автоматизированного обобщения проверяется согласованность картографического решения путем выявления любых рельефных конфликтов. Геометрические противоречия устраняются путем удаления соответствующих сеточных сегментов *B*-сплайновой кривой и изменения ее формы за счет плавного изгиба на характерном интервале. Главное преимущество кусочных конструкций заключается в том, что они всегда обеспечивают плавное представление, которое улучшает операции сжатия и визуализации при масштабировании, проявляющемся в традиционном обобщении зигзагообразных эффектов ломаной дуги за счет использования многоугольных линий [25].

Ограничение гидрографической разборчивости означает отсутствие визуальных конфликтов, таких как пересечение изобат, их наложение друг на друга или условные эффекты графических пересечений, когда батиметрические контуры расположены слишком близко, чтобы их можно было различить. При уменьшении масштаба расстояния между сегментами

B-сплайнов, уменьшаются, соответственно, и геометрические конфликты. Если обобщение выполняется при изменении масштаба, то никаких конфликтов не происходит. Возможно, что в исходных данных уже имеются перегибы или петли изобат. Очевидно, они возникают из-за ошибок измерений или числовых погрешностей, допущенных на этапе сбора батиметрических данных. Конфликты, возникающие в процессе сглаживания, связаны с применением ограничений на смещение. Цель процесса генерализации фактически заключается в проверке согласованности геометрического решения путем выявления любых пространственных конфликтов в виде самопересечения изобат. Фактические пересечения изобат обычно возникают из-за ошибок сплайн-аппроксимации в областях с большим количеством изолиний.

Вероятность визуальных пересечений зависит от предельной точности масштаба морской карты. С целью предотвращения деформации синтезированной изобаты сохраняются основные характеристики линии за счет фиксации характерных контрольных точек. Деформации могут быть устранены путем локального смещения линии в сторону более глубокой воды за счет реализации математической операции сглаживания. Процедура сглаживания выполняется путем устранения небольших колебаний синтезированной изолинии при сохранении информации о форме и ориентации алгебраической кривой. Если внешние ограничения не накладываются, изобата сглаживается за счет уменьшения ее внутренней энергии в физическом смысле. В процессе сглаживания геометрическая форма изолинии становится более плавной, так что количество фиксированных точек уменьшается до тех пор, пока не будут зафиксированы минимально необходимые контрольные сеточные узлы, соответствующие основным характеристическим признакам.

Фиксация критических контрольных точек имеет две основные цели в этом процессе. Во-первых, сохраняются характерные особенности и форма кривой. Во-вторых, сглаживание осуществляется путем фактического нивелирования графических осцилляций. Поскольку эти точки не могут перемещаться, сглаживание вблизи них может быть выполнено только путем незначительного сдвига контрольных точек на большую глубину, чтобы обеспечить навигационную безопасность. В конце процесса сглаживания сложность синтезированной кривой может быть значительно снижена. Как следствие, моделируемая изолиния может быть представлена с меньшим количеством контрольных маркеров, позволяющим уменьшить объем метаданных. Топологические противоречия устраняются путем удаления соответствующих сеточных сегментов и изменения локальной формы изолинии.

B-сплайновая изобата рассматривается в виде змеи, а фактор сглаживания условно реализуется за счет уменьшения физической энергии серпантинной линии, определяемой манипулированием производными. Под изображением в виде змеи понимается параметрическая сплайн-функция, концентрирующая собственную энергию, связанную с ее пространственным положением. Когда физическая змея находится в стабильной ситуации, ее энергия минимальна. В перспективе змея будет деформироваться при максимальной экономии общей энергии для достижения минимизированного конфигурационного равновесия. Изобатой формально считается змея, полная энергия которой складывается из внутренней энергии, связанной с формализацией серпантинной линии и внешнего энергетического эффекта, определяемого потенциальными картографическими конфликтами, которые в виде каскадных ограничений применяются к обобщенной изолинии [13].

Энергии могут быть объединены для выполнения как сглаживания, так и смещения. Если картографическое обобщение нарушено, то внешняя энергия высока, и линия искусственно локально деформируется, чтобы свести внешнюю энергию к нулю и минимизировать общую энергию геометрической системы, обеспечивая физическое равновесие. Поскольку серпантинная плавность движения змеи как физического субъекта зависит от кривизны траектории, следует уделять большое внимание математической алгоритмизации энергии изгиба и плавности синтезированной изолинии. Изолиния считается гладкой, если ее энергия изгиба фактически значительно уменьшена. Внутренняя энергия определяется заданием соответствующих производных, поэтому ее уменьшение приводит к сглаживанию изобаты. Математические параметры контролируют натяжение и изгиб аллегорической змеиной модели. Поскольку гладкость характеризуется изгибом

в характерной точке, значение производной в этой точке равно нулю, а функциональность определяется константой. Аналогичным образом при обработке изображений для определения четких контуров применяются плавные линии, которые формируются своей собственной энергией, исходя из геометрических особенностей сплайн-функций. Общая серпантинная энергия определяется в соответствии с плавностью кривой и требованиями безопасности судовождения, чтобы обеспечить последовательную деформацию в нужном направлении. Удобочитаемое контурное решение графического представления изобат получается, когда общая энергия физической интерпретации математической системы минимизирована.

Успешность аппроксимации безопасной изобаты *B*-сплайнами зависит от точности входных батиметрических данных, ошибок округления, допущенных при вычислениях, а также от точности самой аппроксимации. Точность математического приближения навигационных функций графически в большей степени соответствует минимальному расстоянию, которое должно соблюдаться между двумя изобатами. Именно это значение формирует визуальные конфликты. Например, во избежание «конфликта» по расстоянию, линейный размер неровностей поверхности, которые должны быть показаны на российской топографической карте масштаба 1: 200000, должен составлять не менее 3–10 мм в зависимости от типа объекта [29]. Экспериментальная работа, проведенная на нескольких примерах реконструированных эталонных цифровых моделей рельефа по использованию топографических карт, обобщенных вручную, позволила вывести эмпирическое правило для выбора оптимальной относительной степени детализации для мелкомасштабного картографирования, которая составляет приблизительно 5–6 мм в масштабе визуализации [29].

Для оценки точности аппроксимации был протестирован *B*-сплайновый алгоритм с использованием единиц измерения батиметрии в сантиметрах. Согласно результатам эксперимента прогнозируемая точность *B*-сплайновой аппроксимации должна быть равна 10^{-4} при математическом восстановлении гидрографических данных в указанных единицах измерения с целью обеспечения стандартной предельной точности масштаба векторной электронной карты [30]. На основе результатов авторского вычислительного эксперимента получена точность расчета кубическими *B*-сплайнами в основном числовом диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-8}$ погрешности навигационного параметра синхронизированных единиц измерения [14].

Вопрос вычислительной точности сплайнового алгоритма исследован в тестовом эксперименте при решении задачи фрагментарного восстановления поверхности сегмента сферы на сеточном патче размером 30×30 маркерных узловых значений (рис. 5). Сфера выбрана в качестве объекта оригинального исследования по факту представления поверхности постоянной гауссовой кривизны, что обеспечивает возможность получения реалистичных оценок точности сплайн-аппроксимации.

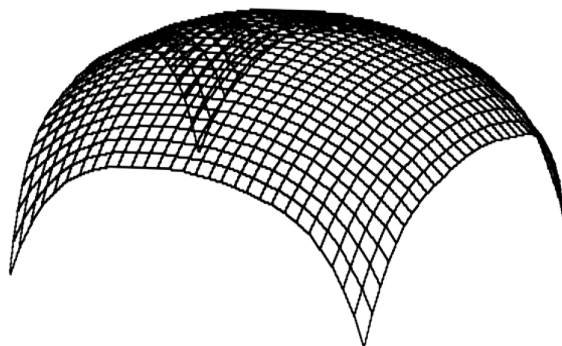


Рис. 5. Скриншот аппроксимированного сплайнового сегмента сферы

Точностные характеристики выводились на компьютерный дисплей при помощи задания в паскаль-программе специального логического условия по расчету абсолютной максимальной разницы между фиксированным значением функции как результата расчета по стандартной формуле

сферы и сплайновым аппроксимированным значением в каждом сеточном узле. Поскольку погрешность аппроксимации определялась в разностном варианте, полученные количественные характеристики применимы для любых измерительных единиц.

По результатам проведенного эксперимента точность расчета на центральной части сферического сегмента обеспечивается в числовом диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} условных разностных единиц измерения, и только в четырех концевых позициях задания краевых условий наблюдается всплесковое повышение погрешности до 10^{-2} – 10^{-3} (см. рис. 5). Цифровые значения погрешности сплайн-аппроксимации синхронно рассчитывались в каждой сеточной точке с выводом на компьютерный дисплей максимальной погрешности по размаху.

Полученные результаты оценки точности графически демонстрируются графиком объемной погрешности аппроксимации в перспективном ракурсе (рис. 6). Весовой коэффициент задавался в данном эксперименте равным 0,5 как эмпирический параметр сглаживания, определенный автором данного исследования в интерактивном режиме.

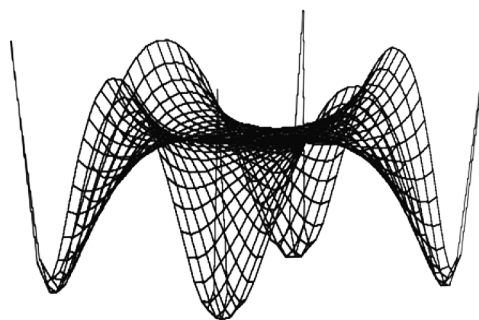


Рис. 6. Скриншот погрешности сплайновой аппроксимации сферического сегмента

На рис. 6 отчетливо различимы четыре характерных всплеска погрешности на концевых участках сферического сегмента, понижающие точность аппроксимации до 10^{-2} – 10^{-3} . Всплесков погрешности аппроксимации можно избежать при вводе специальных граничных условий, но это определенным образом усложнит алгоритм. По результатам проведенного тестового эксперимента точность расчета числового массива на основном поле вычислений обеспечивается в алгоритмических пределах 10^{-6} – 10^{-8} , и только в четырех концевых позициях задания краевых условий на фрагментированном домене аппроксимации наблюдается снижение точности до 10^{-2} – 10^{-3} , которыми в практических приложениях можно пренебречь.

Требование точности приближения *B*-сплайновой изолинии к контрольной изобате действует в качестве дополнительного регулятора как аналог полиномиальных энергий упругого сжатия для реализации задачи оптимизации синтеза алгебраической линии в физическом понимании. Следовательно, адаптивный алгоритм сплайн-аппроксимации гарантированно может быть использован для аппроксимации безопасной изобаты в реализации вопроса необходимой картографической точности. Надежное алгоритмическое обеспечение приемлемой точности аппроксимации, безусловно, создает эффект визуализированной четкости графического атрибута ЭКНИС при адаптации с учетом эстетики соответствующей семантики навигационной символики для однозначной удобочитаемости электронной карты. Альтернативная точность морской навигации является актуальной задачей обеспечения безопасности и эффективности мореплавания [31].

Практическое использование аппроксимированных данных о рельефе дна с высоким уровнем пространственного разрешения может позволить повысить надежность безопасности судо-вождения для крупнотоннажных судов в прибрежном плавании. Традиционно капитаны считают опасность реалистичной при ее обнаружении в полумиле от проложенного курса или если запас глубины под килем находится в пределах 10 м от осадки судна. В случае, когда суда проходят

в каналах и гаванях, возникают ситуации практической необходимости нахождения в нескольких метрах от навигационных опасностей с запасом воды под килем всего один метр [22].

Расстояние до навигационных опасностей используется в качестве основного количественного показателя стесненности акватории и может применяться как частная характеристика навигационной безопасности судоходных маршрутов [32]. При чтении морской карты вахтенный помощник должен обращать внимание на изменение уровня воды на мелководье, так как важный параметр, который судоводитель должен знать в любой момент времени — это реальный запас воды под килем. При этом необходимо учитывать, что минимальная глубина, показанная на морской карте, может существенно отличаться от фактической минимальной глубины акватории [33].

Сплайновый алгоритм с программной реализацией в вариативности паскаль-модуля для вычислительной формализации базисной аппроксимации навигационной изобаты апробирован с подробной математической формализацией на примере расчета траектории изолинейного плавания судна [14]. Процедура картографического обобщения стратегически ориентирована на характеристические точки изобаты, которые определяют аппроксимирующий ее B -сплайн. Модернизированная сплайновая изолиния оперативным образом перестраивается с использованием апостериорной информации без формального увеличения количества сеточных точек сплайна для обеспечения процесса обобщения. Типизация изолинии осуществляется путем удаления небольших изгибов при оптимальном сглаживании синтезированной кривой, как показано на скриншоте (рис. 7).

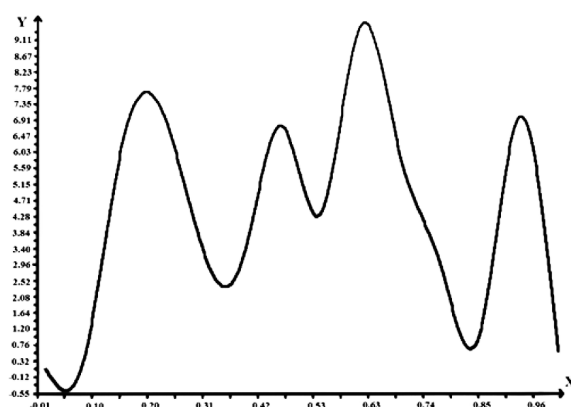


Рис. 7. Обобщенное синтезирование безопасной изобаты кубическим финитным сплайном

Целесообразность применения вариативного синтезирования контура глубины в режиме реального времени позволяет с предельной точностью конкретизировать метод решения задачи оперативного локального смещения безопасной изобаты в глубоководную область акватории методом плавного изгибания гладких кубических B -сплайнов для обеспечения процесса обобщения (см. рис. 7). Оперативное управление формой моделируемой изобаты осуществляется за счет плавности, гладкости и задания оптимального количества контрольных точек или вводом дополнительных сеточных узлов аппроксимации для повышения адаптивности и гибкости модели B -сплайнов за счет своей вычислительной эффективности при сегментировании контурных линий с высокой сложностью [34].

Применяемый практически фактор локальности означает тактическую возможность корректировки общей формы аппроксимированной изолинии без стратегической перестройки всей восстановленной алгебраической линии. Изменчивое генерирование формы аппроксимированной кривой выполняется путем синхронного координирования характеристических точек с финитными функциями B -сплайна с целью согласования геометрии изобаты. Обобщенный контур глубины алгоритмически отражает выпуклость безопасной изобаты в сторону глубоководной области

при визуализации на электронных картах реализации B -сплайновой «модели змеи» по аналогии с серпантинной конфигурацией линии активного контура глубины в виде кусочно-полиномиальной функции [35].

Стратегия локальной корректировки использует преимущества свойств оперативной поддержки базисных сплайнов при геометрических операциях выбора конкретного метода визуализации контурной линии глубины в соответствии со сложностью батиметрической среды. Кроме того, сплайновый алгоритм сокращает начальный путь аппроксимации с меньшим количеством доминирующих точек, что значительно ускоряет скорость вычислительных операций. Сплайновый алгоритм позволяет генерировать плавные и естественные визуализированные изолинии. Каждая синтезированная изолиния интерпретируется как B -сплайновая линия активного контура глубины. B -сплайны конструктивно обеспечивают удобный способ обработки внутренних свойств формы алгебраической кривой. Преимущество использования активных сплайновых изолиний заключается в том, что взаимодействие с пользователем в интерактивном режиме может быть реализовано путем локального изменения формы кривой посредством манипулирования некоторыми маркерными точками и весовыми коэффициентами сглаживания. По прототипу оперирования B -сплайнами применительно к безопасной изобате можно использовать алгоритм базисной аппроксимации к любому геометрическому атрибуту векторной электронной карты в максимальном варианте трехмерного представления морского дна [36].

ЭКНИС успешно эволюционирует от двумерного статического отображения батиметрических данных к идеальной интерфейсной системе поддержки принятия решений, способной предоставлять апробированную информацию 3D формата на основе геовизуализации с временными метками [37]. С целью обеспечения наглядности восприятия визуализированных навигационных изоповерхностей применяется оптимальная стратегия подгонки любой формы алгебраической кривой с помощью функций B -сплайна на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала для быстрого получения дополнительного узла по *схеме Марсдена* [38]. При оптимальной организации сеточных узлов использование B -сплайна позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию реконструированной поверхности с кривизной высокого порядка [39].

При использовании дополненной виртуальности тенденции интерактивных геопространственных конфигураций неразрывно связаны с принципами цифрового картографического проектирования [40]. Дисплеи дополненной реальности предполагают наложение изображений компьютерной графики на визуализированное представление окружающей среды для одновременного непосредственного просмотра графических изображений. Технологии дополненной реальности позволяют видеть обозначенные или иным образом улучшенные береговые объекты, буи, надводные или подводные опасности в толще воды, ретранслируемые так, как если бы вода была прозрачной. Тем не менее современный дисплей ЭКНИС внешне похож на бумажную карту как двумерное отображение фиксированных цифровых данных. Практически неизбежным является то, что современные электронные карты технологически в значительной степени опираются на бумажные карты в качестве примера для составления. Для того чтобы бортовой ЭКНИС являлся оптимизированной системой поддержки принятия решений, способной предоставлять судоводителю перспективную навигационную информацию, необходимо разработать новые подходы к улучшению содержания, управления и отображения гидрографических данных.

Традиционные методы электронного картирования достаточно точны, но в то же время очень финансово затратны и требуют много времени для обширной географической области. Автоматизация производства картографических карт является важной областью исследований в аспекте функционирования электронных географических информационных систем (ЭГИС). В перспективе с развитием прогрессивных математических методов в технологии компьютерной визуализации картографических объектов необходимость обеспечения точных автоматизированных методов обработки гидрографических данных остается актуальной задачей. Контурные линии, полученные с помощью сплайновых алгоритмов из облака метаданных, могут быть ис-

пользованы эффективным образом для построения подробной цифровой модели подводной топологии [41]. Развитие ЭГИС в сочетании с достижениями в области телекоммуникационных систем, систем позиционирования, мобильных устройств и веб-сервисов с использованием открытых данных бесплатного программного обеспечения открывает новые перспективы визуализации генерализованных подводных рельефов [42]. С учетом возможностей компьютерного зрения в настоящее время практически реализуема координатная привязка интеллектуальной визуализации геоизображения как пространственно-временной мультигенерализованной модели объекта, представленного в графической образной форме, на основе технологии сопоставления изображений [43]. При этом для реализации процедуры кластеризации изображения предполагается в сложных случаях использовать сплайн-функции. Разработка исследовательских картографических интерфейсов, в которых пользователь может интерактивным образом менять параметры изображения рельефа путем различных манипуляций в интерфейсе, в том числе посредством тактильных жестов [43] или наложением звука на изобату [25], является одним из перспективных направлений развития генерализации.

В идеале судоводитель на электронной карте будущего должен иметь возможность бесплатно пользоваться подробными гидрографическими данными широкой доступности в любом открытом репозитории в совокупности с прогнозами уровня воды прибрежной зоны в реальном времени. Обладая этой информацией, вахтенный помощник сможет планировать и безопасно осуществлять переход, пользуясь точно определенным фактическим запасом воды под килем для нивелирования интуитивного понимания капитаном безопасного положения судна и развития навигационной ситуации.

Стратегия аппроксимации безопасной изобаты на основе методов сплайн-функций основывается на фактическом определении пространственных связей между синтезированными изобатами и формальными правилами картографического обобщения. Предлагаемый подход сплайн-аппроксимации безопасной изобаты в перспективе может быть использован как условие для полной автоматизации обработки батиметрической информации. Выбор метода *B*-сплайнов оптимален для полностью автоматизированных решений. Реализованный в паскаль-программе ключевой алгоритм искусственного синтеза контура глубины способствует эффективному решению задачи автоматизированного обобщения изобат на векторной электронной карте для прикладного обеспечения безопасного морского судоходства. По мнению д-ра техн. наук, проф. Б. А. Вульфовича в XXI в. достаточно точный алгоритм, реализованный в программе с дружественным интерфейсом, должен побудить судоводителей сформировать новые наблюдательные привычки в целях получения больших возможностей в вопросах обработки навигационной информации [44]. При правильном навигационном использовании актуальной безопасной изобаты вахтенному помощнику обеспечивается транзитный фарватер, в котором гарантируется безопасное движение судна.

Обсуждение (Discussion)

Для предотвращения морских аварий, причиной которых является человеческий фактор, представляется целесообразным дополнительно к аппаратуре навигационного автоматизированного комплекса использовать метод определения места судна по глубинам на основе нейронной сети, принимающей на вход последовательность глубин, измеренных при помощи эхолота, и прогнозирующей широту и долготу судна на момент измерения последней глубины [45].

Альтернативно для решения задач батиметрической навигации могут применяться *B*-сплайны, интерпретируемые как вариативность нейронных сетей в виде так называемой *B*-сплайновой нейронной сети [46]. Преимущество *B*-сплайнов в нейронных сетях получает прикладное применение. Благодаря финитному свойству *B*-сплайнов модернизированная нейронная сеть хранит информацию большой размерности в локальном варианте, что означает, что обучение в одной части входного пространства поддержки принятия решения оказывает минимальное влияние на остальную его часть, что синхронизируется с решением задач идентификации системы искусственного интеллекта.

Аппроксимация навигационных функций большой размерности является чрезвычайно сложной математической задачей. Проблема размерности оказывает негативное влияние на классические методы, и, следовательно, на практике они применимы исключительно для решения задач минимальной размерности [47]. Суть проблемы означает экспоненциальный рост экспериментальных данных по сравнению с размерностью пространства вероятностно-статистических решений. По мнению ведущего американского специалиста в области математики Ричарда Эрнеста Беллмана, проблема размерности действует на конечный результат оптимизационного метода в силу неоправданного усложнения целевой функции. Экстремум функционала, соответствующий искомого навигационному решению, в упрощенном варианте не позволяет найти абсолютно точное решение в масштабе реального времени. Таким образом, происходит автоматическое возвращение к необходимости первоначальной сложности алгоритма с организацией итерационного замкнутого круга нерешенной проблемы предсказательного моделирования навигационного процесса.

В то же время нейронные сети способны преодолеть проблему при решении различных задач большой размерности в контексте анализа изображений и распознавания образов. Комбинированная модель искусственного интеллекта в терминах B -сплайнов использует одномерные кусочные конструкции в качестве внутренних функций, которые впоследствии трансформируются в вариационные сплайны с тензорным произведением в качестве внешних функций. Внутренние функции действуют как средства оперирования объектами малой размерности, в то время как сочетание внешних функций рассматривается как иерархическая вариация нейронной сети большой размерности. Функциональность гибридной системы обеспечивается благодаря оптимальным вычислительным свойствам B -сплайнов. Оценки погрешности для линейной аппроксимации подмножества многомерных непрерывных функций, а также многомерных обобщенных функций с ограниченной полосой пропускания обуславливают положительную тенденцию успешной применимости сплайнового подхода как композиционного условия функционирования нейронной сети. В первом случае проблема нивелируется, в то время как во втором случае она полностью преодолевается.

При использовании классических алгоритмов калмановской фильтрации или метода Байеса в процессе решения навигационной задачи возникают потребности высокой вычислительной нагрузки [48]. В отличие от инвариантности фильтра Калмана и байесовского подхода [49], сплайновая аппроксимация является высокоскоростным средством решения различных навигационных задач, так как формат аппроксимированной функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции. Байесовские алгоритмы дают оптимальное решение задач нелинейной фильтрации, однако необходимые для их практического воплощения вычислительные ресурсы остаются не всегда реализуемыми и при современном уровне развития компьютерной техники.

Сверхточную нейронную сеть можно рассматривать как вариативность аддитивной B -сплайновой модели. Сплайновая технология по своей математической архитектуре в принципе лишена проблемы размерности, что служит дополнительным основанием для применения кусочной аппроксимации при решении сложных навигационных задач.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Определена значимость постулата безопасной изобаты для обеспечения гарантированного безаварийного транзита судна.
2. Согласно проведенному анализу оптимальности конфигурирования B -сплайнов на вариативном типе носителей предпочтение для решения поставленной задачи отдано кубическому случаю.
3. В качестве исследовательской разработки апробирован метод вычислительной процедуры аппроксимации безопасной изобаты на основе B -сплайнов. Диапазон применения данного подхода можно расширить до восстановления навигационной изолинии любой степени сложности,

включая возможность синтеза искаженной изолинии. Изолиния с многочисленными функциональными разрывами имеет сложную математическую формализацию и традиционным путем подобную задачу решить практически невозможно. Кроме того, разработанный алгоритм позволяют напрямую использовать в современном судовождении сетку искаженных поправками изолиний при широко используемом в современном судовождении дифференциальном режиме в различных его вариантах.

4. На основе алгоритмического обеспечения *B*-сплайновой аппроксимации навигационной функции составлена паскаль-программа для бортового компьютера, обеспечивающая высокую точность и устойчивость вычислительных операций в качестве прикладного обеспечения для усиления позиций полной автоматизированной обработки батиметрической информации. В перспективе дальнейшему исследованию подлежит применение перспективных возможностей искусственного интеллекта для обобщения гидрографической нагрузки электронной карты, что создает возможность обеспечить лучшую ситуационную осведомленность вахтенного помощника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенич А. В. Цифровые модели рельефа морского дна коррекционных полигонов для подводной навигации по рельефу / А. В. Костенич, А. А. Веселов, В. Ю. Бахмутов // Навигация и гидрография. — 2022. — № 69. — С. 32–41. — EDN VTVOYE.
2. Guilbert E. Terrain generalisation / E. Guilbert, J. Gaffuri, B. Jenny // Abstracting geographic information in a data rich world: methodologies and applications of map generalisation. — Berlin, Heidelberg, New-York: Springer, 2014. — Pp. 227–258. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_8.
3. Зубченко Э. С. Навигационная поверхность — новая форма цифровой модели для представления данных съемки рельефа дна в интересах повышения безопасности мореплавания / Э. С. Зубченко // Навигация и гидрография. — 2008. — № 27. — С. 77–93. — EDN NCQAWL.
4. Ююкин И. В. Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675. — EDN PCOBT.
5. Calder B. R. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data / B. R. Calder, L. A. Mayer // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. — 2003. — Vol. 4. — Is. 6. — Pp. 1048. DOI: 10.1029/2002GC000486.
6. Li Z. Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions / Z. Li // High Performance Computing for Geospatial Applications. — Springer, Cham, 2020. — Pp. 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5_4.
7. Кошель С. М. Моделирование рельефа по изолиниям / С. М. Кошель // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К. А. Салищева. (Ред. А. М. Берлянт). — М.: Аспект Пресс, 2005. — С. 198–208. — EDN TFLALY.
8. Koshel S. New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables / S. Koshel, O. Mikhalyov // Proceedings of 26th International Cartographic Conference. — ICA, 2013. — Pp. 743–744. DOI: 10.13140/RG.2.1.3100.6566.
9. Самсонов Т. Е. Картографические методы визуализации и генерализации цифровых моделей рельефа / Т. Е. Самсонов // сборник Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле, вып. № 6. — М.: Медиа-ПРЕСС, 2016. — С. 9–18. — EDN WZQPB.
10. Афонин А. Б. Особенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа / А. Б. Афонин, С. А. Лутков, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — Т. 7. — № 4. — С. 90–95. — EDN UDJUTN.
11. Nada T. Towards automating the nautical chart generalization workflow / T. Nada, C. Kastri-sios, B. Calder, C. Ence, C. Greene, A. Bethell // Geo-spatial Information Science. — 2024. — Pp. 1–26. DOI: 10.1080/10095020.2024.2366873.
12. Skopelti A. Nautical Charts Generalization: A Pragmatic Approach / A. Skopelti, L. Tsoulos, L. Stamou, S. Pe'eri // Abstracts of the International Cartographic Association. — 2021. — Vol. 3. — Pp. 267. DOI: 10.5194/ica-abs-3-267-2021.

13. *Burghardt D.* Controlled Line Smoothing by Snakes / D. Burghardt // *Geoinformatica*. — 2005. — Vol. 9. — Pp. 237–252. DOI: 10.1007/s10707-005-1283-3.
14. *Ююкин И. В.* Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
15. *Ююкин И. В.* Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274. — EDN BQRXTR.
16. *Saux E.* B-spline functions and wavelets for cartographic line generalization / E. Saux // *Cartography and geographic information science*. — 2003. — Vol. 30. — Is. 1. — Pp. 33–50. DOI: 10.1559/152304003100010938.
17. *Жухлин А. М.* Использование метода сплайн-функций для описания опасной изобаты / А. М. Жухлин, К. П. Мамаев // *Методы и технические средства морской навигации: сб. науч. тр.* — М.: ВО «Мортеин-формреклама», 1993. — С. 38–41.
18. *Zhang Y.* An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm / Y. Zhang, P. Wang, K. Cui, H. Zhou, J. Yang, X. Kong // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — Is. 19. — Pp. 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
19. *Kastrisios C.* Nautical chart data uncertainty visualization as the means for integrating bathymetric, meteorological, and oceanographic information in support of coastal navigation / C. Kastrisios, C. Ware, B. Calder, T. Butkiewicz, L. Alexander, O. Hauser // *100th American Meteorological Society Meeting, 18th Symposium on Coastal Environment*. — AMS, 2020. — Pp. 11–17. DOI: 10.6084/m9.figshare.12196764.
20. *Ююкин И. В.* Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014. — EDN JRCDLU.
21. *Dyer N.* Label-based generalization of bathymetry data for hydrographic sounding selection / N. Dyer, C. Kastrisios, L. De Floriani // *Cartography and Geographic Information Science*. — 2022. — Vol. 49. — Is. 4. — Pp. 338–353. DOI: 10.1080/15230406.2021.2014974.
22. *Glang G. F.* NOAA Harnesses Digital Technology to Improve Navigational Intelligence / G. F. Glang, S. Smith, D. Forsythe // *Marine Technology Society Journal*. — 2015. — Vol. 49. — № 2. — Pp. 159–166. DOI: 10.4031/MTSJ.49.2.4.
23. *Guilbert E.* Cartographic generalization of lines based on B-spline snake model / E. Guilbert, E. Saux // *International Journal of Geographical Information Science*. — 2008. — Vol. 22. — Is. 8. — Pp. 847–870. DOI: 10.1080/13658810701689846.
24. *Yan J.* An ontology-driven multi-agent system for nautical chart generalization / J. Yan, E. Guilbert, E. Saux // *Cartography and Geographic Information Science*. — 2017. — Vol. 44. — Is. 3. — Pp. 201–215. DOI: 10.1080/15230406.2015.1129648.
25. *Guilbert E.* Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model / E. Guilbert, H. Lin // *Marine Geodesy*. — 2007. — Vol. 30. — Is. 1–2. — Pp. 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
26. *Guilbert E.* B-spline Curve Smoothing for Isobathymetric Line Generalization / E. Guilbert, H. Lin // *Geographic Information Sciences*. — 2005. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 78–86. DOI: 10.1080/10824000509480603.
27. *Kastrisios C.* Efforts to Streamline Bathymetry Compilation for Marine Navigation / C. Kastrisios // *Abstracts of the International Cartographic Association*. — 2023. — Vol. 6. — Pp. 119. DOI: 10.5194/ica-abs-6-119-2023.
28. *Kastrisios C.* Increasing Efficiency of Nautical Chart Production and Accessibility to Marine Environment Data through an Open-Science Compilation Workflow / C. Kastrisios, N. Dyer, T. Nada, S. Contarinis, J. Cordero // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2023. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 116. DOI: 10.3390/ijgi12030116.
29. *Samsonov T.* Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation / T. Samsonov // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Is. 5. — Pp. 1270. DOI: 10.3390/rs14051270.
30. *Guilbert E.* B-Spline Curve Smoothing under Position Constraints for Line Generalization / E. Guilbert, H. Lin // *Proceedings of the 14th annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (GIS'06)*. — Arlington: ACM, 2006. — Pp. 3–10. DOI: 10.1145/1183471.1183474.

31. *Логиновский В. А.* Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346. — EDN DDNVHE.
32. *Андреева Е. В.* Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62. — EDN WZHJEX.
33. *Афонин А. Б.* Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королёв, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9 — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016. — EDN ZSRYCN.
34. *Delgado-Gonzalo R.* Efficient Shape Priors for Spline-Based Snakes / R. Delgado-Gonzalo, D. Schmitter, V. Uhlmann, M. Unser // IEEE Transactions on Image Processing. — 2015. — Vol. 24. — Is. 11. — Pp. 3915–3926. DOI: 10.1109/TIP.2015.2457335.
35. *Miao D.* Gradual generalization of nautical chart contours with a cubic B-spline snake model / D. Miao, B. Calder // 2013 OCEANS — San Diego. — IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741201.
36. *Ююкин И. В.* Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79. — EDN PQTBSM.
37. *Krassanakis V.* Geovisualization: Current Trends, Challenges, and Applications / V. Krassanakis, A. Skopelti, M. Keskin, and P. Cybulski // Geographies. — 2023. — Vol. 3. — Is. 4. — Pp. 801–805. DOI: 10.3390/geographies3040043.
38. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534. — EDN KGJJVG.
39. *Campbell B. K.* An arbitrarily high-order three-dimensional Cartesian-grid method for reconstructing interfaces from volume fraction fields / B. K. Campbell // Journal of Computational Physics. — 2021. — Vol. 426. — Pp. 109727. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109727.
40. *Gralak R. A.* A Method of Navigational Information Display Using Augmented Virtuality / R. A. Gralak // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 237. DOI: 10.3390/jmse8040237.
41. *Bayer T.* Simplification of contour lines, based on axial splines, with high-quality results / T. Bayer, I. Kolingerova, M. Celonk, J. Lysak, // International Journal of Geographical Information Science. — 2023. — Vol. 37. — Is. 7. — Pp. 1520–1554. DOI: 10.1080/13658816.2023.2193969.
42. *Contarinis S.* Web-based nautical charts automated compilation from open hydrospatial data / S. Contarinis, B. Nakos, L. Tsoulos, A. Palikaris // The Journal of Navigation. — 2022. — Vol. 75. — Is. 4. — Pp. 763–783. DOI: 10.1017/S0373463322000327.
43. *Мухаметшин А. Р.* Координатная привязка геоизображений с использованием компьютерного зрения / А. Р. Мухаметшин, Т. Е. Самсонов, И. К. Лурье // Геодезия и картография. — 2024. — № 5. — С. 24–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1007-5-24-36. — EDN QHNJBO.
44. *Vulfovich B.* New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium / B. Vulfovich, V. Fogilev // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 2. — Pp. 373–378. DOI: 10.1017/S0373463309990348.
45. *Дерябин В. В.* Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16. — EDN LJVSHI.
46. *Fakhoury D.* ExSpliNet: An interpretable and expressive spline-based neural network / D. Fakhoury, E. Fakhoury, H. Speleers // Neural Networks. — 2022. — Vol. 152. — Pp. 332–346. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.04.029.
47. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39. — EDN FNMZII.

48. Stepanov O. A. Recursive and Nonrecursive Algorithms Applied to Navigation Data Processing: Differences and Interrelation with Factor Graph Optimization Algorithms / O. A. Stepanov, A. V. Motorin, V. P. Zolotarevich, A. M. Isaev, Yu. A. Litvinenko // 2024 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2024. — Pp. 424–431. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.

49. Васильев В. А. Анализ эффективности решения задачи навигации с использованием карты и измерителя геофизического поля в зависимости от изменчивости погрешностей корректируемой навигационной системы / В. А. Васильев, О. А. Степанов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. — 2022. — № 4. — С. 7–11. DOI: 10.24412/2541-9269-2022-4-07-11. — EDN REBGUF.

REFERENCES

1. Kostenich A V., A. A. Veselov and V. Yu. Bakhmutov “Tsifrovye modeli rel’efa morskogo dna korrektsionnykh poligonov dlya podvodnoy navigatsii po rel’efu.” *Navigatsiya i gidrografiya* 69. 2022: 32–41.

2. Guilbert, Eric, Julien Gaffuri and Bernhard Jenny. “Terrain generalisation.” *Abstracting geographic information in a data rich world: methodologies and applications of map generalisation*. Berlin, Heidelberg, New-York: Springer, 2014: 227–258. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_8.

3. Zubchenko, E. S. “Navigational surface — a new form of digital model for presenting the bottom relief survey data to increase the safety of navigation.” *Navigatsiya i gidrografiya* 27 (2008): 77–93.

4. Yuyukin, Igor V. “Spline model of gridded data operation as principle of electronic mapping seabed topographies.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.

5. Calder, Brian R. and Larry A. Mayer. “Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4.6 (2003): 1048. DOI: 10.1029/2002GC000486.

6. Li, Zhenlong. “Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions.” *High Performance Computing for Geospatial Applications*. Springer, Cham, 2020. 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5_4.

7. Koshel’, S. M. . “Modelirovanie rel’efa po izoliniyam.” *Universitetskaya shkola geograficheskoy kartografii : k 100-letiyu prof. K. A. Salischeva*. Moskva : Aspekt press, 2005: 198–208.

8. Koshel, Sergey, and Oleg Mikhalyov. “New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables.” *Proceedings of 26th International Cartographic Conference*. ICA, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.3100.6566.

9. Samsonov, T. E. . “Kartograficheskie metody vizualizatsii i generalizatsii tsifrovyykh modeley rel’efa.” *Geomorfologiya : Sovremennye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya rel’efa v nauках o Zemle. Tom Vypusk 6*. Moskva : Media-PRESS, 2016: 9–18.

10. Afonin, Andrey B., Sergey A. Lutkov and Aleksandr L. Tezikov. “Features creation of depth contours in the conditions of insufficient hydrographic study of the seabed.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 7.4 (2015): 90–95.

11. Nada, Tamer, Christos Kastrisios, Brian Calder, Christie Ence, Craig Greene and Amber Bethell. “Towards automating the nautical chart generalization workflow.” *Geo-spatial Information Science* (2024): 1–26. DOI: 10.1080/10095020.2024.2366873.

12. Skopelti, Andriani, Lysandros Tsoulos, Leda Stamou and Shachak Pe’eri. “Nautical Charts Generalization: A Pragmatic Approach.” *Abstracts of the International Cartographic Association* 3 (2021): 267. DOI: 10.5194/ica-abs3-267-2021.

13. Burghardt, Dirk. “Controlled Line Smoothing by Snakes.” *Geoinformatica* 9 (2005): 237–252. DOI: 10.1007/s10707-005-1283-3.

14. Yuyukin, Igor V. “Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

15. Yuyukin, Igor V. “Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

16. Saux, Eric. “B-spline functions and wavelets for cartographic line generalization.” *Cartography and geographic information science* 30.1 (2003): 33–50. DOI: 10.1559/152304003100010938.

17. Zhukhlin, A. M. and K. P. Mamaev. Ispol'zovanie metoda splayn-funkciy dlya opisaniya opasnoy izobaty. M.: Mortchinformreklama, 1993.
18. Zhang, Yulong, Pengwei Wang, Kaichen Cui, Hengheng Zhou, Jinshan Yang and Xiangcun Kong. "An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm." *Sensors* 23.19 (2023): 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
19. Kastrisios, Christos, Colin Ware, Brian Calder, Thomas Butkiewicz, Lee, Alexander and Olivia Hauser. "Nautical chart data uncertainty visualization as the means for integrating bathymetric, meteorological, and oceanographic information in support of coastal navigation." *100th American Meteorological Society Meeting, 18th Symposium on Coastal Environment*. AMS, 2020. DOI: 10.6084/m9.figshare.12196764.
20. Yuyukin, Igor V. "The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.
21. Dyer, Noel, Christos Kastrisios and Leila De Floriani. "Label-based generalization of bathymetry data for hydrographic sounding selection." *Cartography and Geographic Information Science* 49.4 (2022): 338–353. DOI: 10.1080/15230406.2021.2014974.
22. Glang, Gerd F., Shepard Smith and Dawn Forsythe. "NOAA Harnesses Digital Technology to Improve Navigational Intelligence." *Marine Technology Society Journal* 49.2 (2015): 159–166. DOI: 10.4031/MTSJ.49.2.4.
23. Guilbert, Eric and Eric Saux. "Cartographic generalization of lines based on B-spline snake model." *International Journal of Geographical Information Science* 22.8 (2008): 847–870. DOI: 10.1080/13658810701689846.
24. Yan, Jingya, Eric Guilbert and Eric Saux. "An ontology-driven multi-agent system for nautical chart generalization." *Cartography and Geographic Information Science* 4 4.3 (2017): 201–215. DOI: 10.1080/15230406.2015.1129648.
25. Guilbert, Eric, and Hui Lin. "Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model." *Marine Geodesy* 30.1–2 (2007): 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
26. Guilbert, Eric and Hui Lin. "B-spline curve smoothing for isobathymetric line generalization." *Geographic Information Sciences* 11.2 (2005): 78–86. DOI: 10.1080/10824000509480603.
27. Kastrisios, Christos. "Efforts to Streamline Bathymetry Compilation for Marine Navigation." *Abstracts of the International Cartographic Association* 6 (2023): 119. DOI: 10.5194/ica-abs6-119-2023.
28. Kastrisios, Christos, Noel Dyer, Tamer Nada, Stilianos Contarinis, and Jose Cordero. "Increasing Efficiency of Nautical Chart Production and Accessibility to Marine Environment Data through an Open-Science Compilation Workflow." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12.3 (2023): 116. DOI: 10.3390/ijgi12030116.
29. Samsonov, Timofey "Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation." *Remote Sensing* 14.5 (2022): 1270. DOI: 10.3390/rs14051270.
30. Guilbert, Eric, and Hui Lin. "B-Spline Curve Smoothing under Position Constraints for Line Generalization." *Proceedings of the 14th annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (GIS'06)*. ACM, 2006: 3–10. DOI: 10.1145/1183471.1183474.
31. Loginovsky, Vladimir A. "Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.
32. Andreeva, Ekaterina V. and Aleksandr L. Tezikov. "Formalization of the constraint indicator of the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.
33. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
34. Delgado-Gonzalo, Ricard, Daniel Schmitter, Virginie Uhlmann, and Michael Unser "Efficient Shape Priors for Spline-Based Snakes." *IEEE Transactions on Image Processing* 24.11 (2015): 3915–3926. DOI: 10.1109/TIP.2015.2457335.
35. Miao, Dandan, and Brian Calder. "Gradual generalization of nautical chart contours with a cubic B-spline snake model." *OCEANS-San Diego*. IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741201.
36. Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in computer visualization of underwater relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.

37. Krassanakis, Vassilios, Andriani Skopelti, Merve Keskin, and Paweł Cybulski “Geovisualization: Current Trends, Challenges, and Applications.” *Geographies* 3.4 (2023): 801–805. DOI: 10.3390/geographies3040043.
38. Yuyukin, Igor V. “Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
39. Campbell, Bryce K. “An arbitrarily high-order three-dimensional Cartesian-grid method for reconstructing interfaces from volume fraction fields.” *Journal of Computational Physics* 426 (2021): 109727. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109727.
40. Gralak, Rafal A. “A Method of Navigational Information Display Using Augmented Virtuality.” *Journal of Marine Science and Engineering* 8.4 (2020): 237. DOI: 10.3390/jmse8040237.
41. Bayer, Tomas, Ivana Kolingerova, Marek Celonk and Jakub Lysak “Simplification of contour lines, based on axial splines, with high-quality results.” *International Journal of Geographical Information Science* 37.7 (2023): 1520–1554. DOI: 10.1080/13658816.2023.2193969.
42. Contarinis, Stilianos, Byron Nakos, Lysandros Tsoulos and Athanasios Palikaris. “Web-based nautical charts automated compilation from open hydrospatial data.” *The Journal of Navigation* 75.4 (2022): 763–863. DOI: 10.1017/S0373463322000327.
43. Mukhametshin, A. R., T. E. Samsonov and I. K. Lurie. “Coordinate georeferencing of geoimages using computer vision.” *Geodesy and Cartography* 85.5 (2024): 24–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1007-5-24-36.
44. Vulfovich, Boris, and Vasily Fogilev “New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium” *The Journal of Navigation* 63.2 (2010): 373–378. DOI: 10.1017/S0373463309990348.
45. 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.
46. Fakhoury, Daniele, Emanuele Fakhoury, and Hendrik Speleers. “ExSpliNet: An interpretable and expressive spline-based neural network.” *Neural Networks* 152 (2022): 332–346. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.04.029.
47. Yuyukin, Igor V. “Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
48. Stepanov, O.A., A. V. Motorin, V. P. Zolotarevich, A. M. Isaev and Yu. A. Litvinenko. “Recursive and Nonrecursive Algorithms Applied to Navigation Data Processing: Differences and Interrelation with Factor Graph Optimization Algorithms.” *2024 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. — IEEE, 2024. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
49. Vasilev, V. A. and O. A. Stepanov. “The efficiency of a map-aided navigation under variability of the corrected navigation system errors.” *Matematicheskoe modelirovanie, komputernyi i prirodnyy eksperiment v estestvennykh naukah* 4 (2022): 7–11. DOI: 10.24412/2541-9269-2022-4-07-11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 11 октября 2024 г.
Received: Oct. 11, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945

METHODOLOGY FOR DETERMINING FREIGHT INDICES

A. N. Sitov¹, Y. A. Speranskaya², A. E. Slitcan¹

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

² — Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The paper considers the issues of quantifying the indicator of the freight market conjuncture and analyzes some basic principles used in calculating freight indices. It is noted that the current geopolitical situation has a significant impact on the general behavior of the global freight market and inevitably leads to temporary restrictions on the functioning of the Russian market, which objectively determines the need to calculate domestic indices based on their own methods. The existing world practice of determining freight indices is considered, as well as the features of the Russian freight market as an integral part of the world market. It is emphasized that the nomenclature of transported goods, the geography of transportation and the parameters of the fleet used are radically different from the world ones, which makes them irrelevant for Russian shipowners mastering export cargo flows from Russia and also that foreign freight indexes are only informative and cannot be used in practical work. The paper shows the structure of the formation of freight rates and identifies the main components of the carrier's expenses. The structure of the freight rate is the basis for the formation of the proposed methodology for calculating freight indices. The criteria for determining the specific weights of individual sectors of the freight market are considered. The conclusions drawn in the conducted research are supported by analytical data presented in graphical form. The practical use of the presented methodology will allow interested parties involved in transportation to make informed management decisions.

Keywords: market conditions, freight rate, freight index, freight market transport process, shippers/ consignees, tonnage, labor costs.

For citation:

Sitov, A. N., Y. A. Speranskaya and A. E. Slitcan "Methodology for determining freight indices." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 935–945. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945.

УДК 656.6

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАХТОВЫХ ИНДЕКСОВ

А. Н. Ситов¹, Я. А. Сперанская², А. Е. Слищан¹

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

² — ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены вопросы количественного определения показателя конъюнктуры фрахтового рынка и проанализированы некоторые базовые принципы, используемые при расчете фрахтовых индексов. Отмечается, что современная геополитическая обстановка оказывает существенное влияние на общее поведение мирового фрахтового рынка и неизбежно приводит к временным ограничениям функционирования российского рынка, что объективно обуславливает необходимость расчета отечественных индексов на основе собственных методик. Рассмотрена существующая мировая практика определения фрахтовых индексов, а также особенности российского фрахтового рынка как составляющей части мирового рынка. Подчеркивается, что номенклатура перевозимых грузов, география перевозок и параметры используемого флота кардинально отличаются от мировых, что делает их неактуальными для российских судовладельцев, осваивающих экспортные грузопотоки из России, а также, что иностранные фрахтовые индексы носят лишь информативный характер и не могут использоваться в практической работе. В работе показана структура формирования фрахтовых ставок и выявлены основные составляющие расходов перевозчика. В основу формирования предложенной методики расчета фрахтовых индексов заложена структура фрахтовой ставки. Рассмотрены критерии определения удельных весов отдельных секторов фрахтового

рынка. Выводы, сделанные в процессе проведенного исследования, подкреплены аналитическими данными, представленными в графическом виде. Практическое использование представленной методики позволит заинтересованным сторонам — участникам перевозки принимать обоснованные управленческие решения.

Ключевые слова: конъюнктура, фрахтовая ставка, фрахтовый индекс, фрахтовый рынок, транспортный процесс, грузоотправители / грузополучатели, тоннаж, трудозатраты.

Для цитирования:

Ситов А. Н. Методика определения фрахтовых индексов / А. Н. Ситов, Я. А. Сперанская, А. Е. Слищан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 935–945. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-935-945.

Введение (Introduction)

Конъюнктура — это совокупность условий, оказывающих влияние на текущую обстановку в какой-либо области или ситуации. Понятие «рыночная конъюнктура» трактуется как экономическая ситуация на конкретном товарном рынке вместе с совокупностью факторов, благодаря которым она сформирована. Понятие «фрахтовый рынок» подразумевает взаимосвязанную совокупность составляющих его элементов и участников транспортного процесса, в качестве элементов которого выступают грузопотоки и транспортные средства, в качестве участников — грузоотправители / грузополучатели, судовладельцы, перевозчики, агенты, экспедиторы и прочие [1].

Можно утверждать, что фрахтовый рынок — это сложная динамическая система, поведение которой характеризуется множеством показателей, отражающих различные (экономические, политические, технические и технологические, природные и иные) процессы, протекающие в сфере его функционирования. Расширение множества факторов, рассматриваемых при анализе показателей конъюнктуры, безусловно, повышает степень объективности получаемых выводов о состоянии рынка, но неоправданно увеличивает его трудозатраты, и наоборот.

Таким образом, конъюнктура фрахтового рынка — его абстрактная общая характеристика, характеризующая уровнем фрахтовых ставок, соотношением спроса и предложения тоннажа, величиной существующих грузопотоков, количеством участников транспортной деятельности, а также иными факторами (экономическими, политическими и др.), определяющими конкретную ситуацию на рынке транспортных услуг [2].

Для правильного принятия решений участниками фрахтового рынка необходим анализ его конъюнктуры, причем даже не количественный, а качественный, выполнение которого является затруднительным без привлечения соответствующих специалистов.

Для выполнения анализа следует рассмотреть ряд показателей:

- предложение свободного для фрахтования тоннажа и спрос на него на рынке, соотношение между спросом и предложением;
- объемы перевозок по отдельным и укрупненным группам товаров, по направлениям и бассейнам, по типоразмерам используемого флота;
- цикличность рынка;
- волатильность рынка, уровень рисков и др.

На основе результатов анализа участники фрахтового рынка формируют индивидуальное мнение о его состоянии и принимают управленческие решения.

Глобальный (мировой) фрахтовый рынок может быть условно разделен на множество локальных секций (по географическому, товарному или иному признаку), имеющих определенную автономию. Элементы и участники локальных секций могут изменять в соответствии с реальной конъюнктурой свое положение на глобальном рынке путем перехода в иные секции. Очевидно, что именно совокупность тенденций локальных рынков определяет поведение глобального фрахтового рынка в целом.

Было бы заблуждением считать, что возможна изоляция локального сектора глобального фрахтового рынка, так как он в любом случае влияет на рынок, и осуществить подобное действие

практически невозможно. В современных геополитических условиях, когда фрахтовый рынок России начал работать в условиях множества ограничений, искусственная «изоляция» отечественного сектора перевозок приводит лишь к необъективности любых оценок конъюнктуры, касающихся как глобального, так и российского (локального) фрахтового рынков [3], [4].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для оценки конъюнктуры фрахтового рынка принято использовать *фрахтовые индексы*, которые могут быть сложными и простыми. Простые индексы — это относительные величины, получаемые путем деления текущей фрахтовой ставки на «базовую» (в качестве «базовой» ставки принимается условно конкретная ставка для установленного «базового» момента времени); для расчета простых индексов разработки специальной методики не требуется. Сложные индексы являются комплексными и включают одновременно несколько показателей, влияющих на рыночную ситуацию, поэтому их определение требует применения какой-либо методики. Очевидно, что сложные индексы более объективно характеризуют ситуацию на фрахтовом рынке. Конечно, кроме фрахтовых индексов при анализе используются также и иные показатели (средние ставки фрахта, тайм-чартерный эквивалент, средние расходы и др.), которые также могут быть включены в методику расчета сложных индексов.

В соответствии с делением мирового фрахтового рынка на сектора рассчитываются и фрахтовые индексы, причем для любого сектора могут определяться как простые, так и сложные индексы. В настоящее время для анализа ситуации на мировом фрахтовом рынке используются следующие индексы:

Балтийский фрахтовый индекс (Baltic Freight Index, BFI), который публикуется Балтийской международной фрахтовой биржей (Baltic Exchange) с 1985 г. За период существования BFI методика его расчета не изменялась в отличие от исходной базы данных, используемой для расчета. Данный сложный индекс сегодня является одним из наиболее используемых для глобального рынка. В процессе анализа также рассчитываются несколько сложных индексов для локальных (по тому или иному критерию) рынков, наиболее популярным из которых является *Балтийский сухогрузный индекс* (Baltic Dry Index, BDI).

Китайский фрахтовый индекс (China Freight Index, CFI) рассчитывается Шанхайской судоходной биржей (Shanghai Shipping Exchange) с 1996 г. CFI затрагивает лишь те маршруты, которые обеспечивают перевозки экспортно-импортные перевозки Китая. Аналогично BFI рассчитывается множество сложных индексов для локальных секторов рынка.

Журнал Lloyd's Ship Manager, начиная с 1948 г., публикует свой ежемесячный индекс, который представлен в двух вариантах: для *наливного и сухогрузного тоннажа*. В свою очередь, эти два основных индекса дифференцируются по отдельным секторам фрахтового рынка.

Фрахтовый индекс перевозки зерна и масличных культур (Grains and Oilseeds Freight Index, GOFI), публикуемый еженедельно Международным зерновым советом (International Grain Council). Индексы рассчитываются для зернового сектора мирового фрахтового рынка.

Кроме того, существует также множество иных используемых на практике индексов, характеризующих как глобальный фрахтовый рынок в целом, так и отдельные его сектора (AFRA, Maritime Research, Braemar ACM Shipbroking, Womar Tanker Pools, Fearnleys и др.).

Как отмечалось ранее, расчет фрахтовых индексов осуществляется как для глобального фрахтового рынка в целом, так и для отдельных его секторов. Условное деление на сектора выполняется по следующим параметрам.

1. *Вид перевозимого груза*. Возможно деление на две основных группы: наливные грузы (сырая нефть, нефтепродукты, сжиженный газ и иные) и сухие грузы (уголь, удобрения, зерно, продукция металлургии, строительные материалы и иные); деление на группы и подгруппы выполняется компанией, осуществляющей расчет по собственному усмотрению.

2. *Типоразмер используемого флота*. Классификация по типоразмерам судов в значительной степени определяется родом перевозимого груза. Основными выделяемыми группами танкеров

являются: VLCC (280 тыс. т), Suezmax (120–200 тыс. т), Aframax (80 тыс. т); сухогрузы разделяются на Newcastlemax (208 тыс. т), Capesize (180 тыс. т), Kamsarmax (82 тыс. т), Panamax (60–80 тыс. т), Ultramax (64 тыс. т), Supramax (35–60 тыс. т), Handysize (15–35 тыс. т), Coaster (<15 тыс. т).

3. *Направление перевозки.* Количество групп по каждому параметру определяет степень детализации проводимого исследования. Очевидно, что увеличение детализации приведет к повышению трудоемкости и количества расчетов, а ее уменьшение — к снижению уровня информативности.

Российский фрахтовый рынок как неотъемлемая часть мирового рынка может классифицироваться по аналогичным параметрам с учетом своей специфики [5]. Будучи одним из ведущих мировых экспортеров сырьевых и сельскохозяйственных товаров (как наливных, так и сухих) Россия неизбежно оказывает значительное влияние на мировой фрахтовый рынок. Любая попытка исключить российский рынок при расчете индексов приведет к существенным ошибкам. Сегодня ряд мировых рейтинговых агентств прекратили публикацию индексов по российским направлениям перевозок, при этом можно с уверенностью утверждать, что учет этих перевозок все равно по-прежнему осуществляется. Доступ российских пользователей к информации по фрахтовым индексам также ограничен.

Следует отметить, что и до 2022 г. публикуемые в мире фрахтовые индексы не в полной мере отражали реальный фрахтовый рынок России. Так, например, при расчете BDI не учитывались любые суда дедвейтом до 35 тыс. т как имеющие рыночную долю до 10 %. При этом на российском зерновом рынке суда грузоподъемностью до 15 тыс. т сегодня осваивают 20–35 % грузопотока и суда грузоподъемностью 15–35 тыс. т перевозят примерно 15–30 % грузопотока (рис. 3). География российских перевозок также не отражена при расчете индексов как не оказывающая существенного влияния на мировые грузоперевозки. Таким образом, индекс BDI не в полной мере отражает текущую ситуацию на фрахтовом рынке РФ и носит лишь информативный характер. Подобный вывод справедлив для большинства мировых рейтинговых агентств, поэтому возникла объективная необходимость в расчете собственного российского фрахтового индекса и разработке соответствующей методики его расчета [6], [7].

Для расчета фрахтовых индексов следует остановиться подробно на структуре фрахтовой ставки. Судовладелец может сдать судно в аренду на условиях бербоут-чартера, тайм-чартера и рейсового чартера в соответствии с собственным пониманием ситуации на фрахтовом рынке. В случае бербоут-чартера судовладелец не несет никаких расходов и просто устанавливает в качестве фрахтовой ставки размер ежедневной прибыли, которую он хочет иметь при сдаче судна в аренду. Его прибыль в данном случае не зависит от конъюнктуры рынка, интенсивности эксплуатации судна и прочего — фрахтователь может вообще не использовать судно, но прибыль судовладельцу он обязан заплатить. В любом случае сдача судна в аренду на условиях бербоут-чартера для судовладельца является прибыльной, но делать вывод об экономической эффективности подобной деятельности в контексте данной статьи не представляется возможным.

В случае сдачи судна в тайм-чартер фрахтовая ставка (тайм-чартерный эквивалент, TCE) включает бербоутную ставку и постоянные расходы (Operation Expenses, OPEX). Общая смета OPEX составляется на весь период тайм-чартера, но при этом также может быть определена и ее суточная величина. Тайм-чартерная ставка может уменьшаться только до величины OPEX, иначе владение судном станет нецелесообразным экономически. В OPEX включаются расходы на заработную плату и содержание экипажа (Crew exp.), страхование корпуса и механизмов судна (Hull and machinery exp.), обслуживание банковских операций (Bank exp.), ремонтные работы и освидетельствования (Repairing and class exp.), обслуживание управленческой структуры (Office exp.). Суточное значение постоянной части расходов не изменяется на протяжении всего периода действия договора.

Бербоутная ставка, OPEX и, следовательно, TCE не зависят от вида перевозимого груза, направления перевозки и параметров конкретного рейса, но зависят от типоразмера используемого судна.

В случае сдачи судна в аренду на рейс фрахтовая ставка включает бэрбоутную ставку, OPEX и переменные расходы (Voyage Expenses, VoyExp). Переменные расходы рассчитываются только на период текущего рейса, а не на период тайм-чартера. В VoyExp включаются расходы на топливо (Fuel exp.), дисбурсментские счета (Disbursement account exp.), оплату прохода каналов (Chanel dues), дополнительные расходы по перевозке и перегрузке на усмотрение и за счет перевозчика (Miscellaneous). Средняя суточная величина переменных расходов определяется путем деления общей суммы этих расходов за рейс на его длительность, при этом следует иметь в виду, что возможны изменения в любую сторону этой величины за счет принятия каких-либо управленческих решений во время рейса (например, снижение / увеличение скорости судна и пр.). Очевидно, что переменные расходы зависят от направления перевозки, типоразмера судна и параметров конкретного рейса.

Таким образом, фрахтовая ставка в долл. за 1 тонну перевозимого груза может быть определена по следующим формулам:

$$TCE_j^{\text{сут}} = OPEX_j^{\text{сут}} + \frac{\text{сут}}{j}; \quad (1)$$

$$FR_{ijkf} = T_f \left(TCE_j^{\text{сут}} + VoyExp_{jkf}^{\text{сут}} \right) / \left(DWCC_{jk} \frac{SF_i}{U_j} \right), \quad (2)$$

где i — номер наименования груза;

j — номер типоразмера судна;

k — номер направления перевозки;

f — номер рейса;

T_f — длительность f -го рейса;

$TCE_j^{\text{сут}}$ — суточная величина тайм-чартерного эквивалента судна j -го типоразмера;

$OPEX_j^{\text{сут}}$ — суточные постоянные расходы (Operation Expenses) судна j -го типоразмера;

$\frac{\text{сут}}{j}$ — бэрбоутная ставка при сдаче в аренду судна j -го типоразмера;

FR_{ijkf} — фрахтовая ставка для судна j -го типоразмера на k -м направлении в f -м рейсе при перевозке i -го груза;

$VoyExp_{jkf}^{\text{сут}}$ — суточные переменные расходы судна j -го типоразмера на k -м направлении в f -м рейсе;

$DWCC_{jk}$ — чистая грузоподъемность судна (Deadweight Cargo Capacity) j -го типоразмера на k -м направлении;

SF_i — удельный погрузочный объем i -го груза;

U_j — удельная грузоподъемность судна j -го типоразмера.

В случае, если $SF_i / U_j \geq 1$, то это отношение принимается равным единице. В случае, если осуществляется перевозка «тяжелого» для рассматриваемого судна груза (вне зависимости от его наименования), то используется вся чистая грузоподъемность судна и $SF_i / U_j = 1$; для «легких» грузов ставка фрахта за тонну груза увеличивается.

В основе для расчета фрахтовых индексов заложены статистические данные. Если имеющаяся статистика содержит исходную информацию по фрахтовым ставкам с разбивкой по отдельным рейсам, то для расчета средних фрахтовых ставок может быть использована формула (1):

$$\overline{FR}_{ijk} = \frac{\sum_{f=1}^F FR_{ijkf} - \sum_m (FR_{ijkf}^{\max} + FR_{ijkf}^{\min})}{F_{ijk} - 2m_{ijk}}, \quad (3)$$

где j — номер типоразмера судна;

i — номер наименования груза;

k — номер направления перевозки;

f — номер рейса;

F_{ijk} — общее количество рейсов при перевозке i -го груза с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении;

FR_{ijkf} — фрахтовая ставка при перевозке груза при перевозке i -го груза с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении в f -м рейсе;

$\overline{FR}_{ijk}$ — средняя фрахтовая ставка при перевозке при перевозке i -го груза с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении;

$FR_{ijkf}^{\max}$ — фрахтовая ставка удаленная от максимальной на m единиц при перевозке при перевозке i -го груза с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении в f -м рейсе;

$FR_{ijkf}^{\min}$ — фрахтовая ставка удаленная от минимальной на m единиц для i -го вида груза при перевозке его с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении в f -м рейсе;

m_{ijk} — количество исключаемых из расчета фрахтовых ставок в целях снижения влияния их аномальных значений на результат; если $F_{ijk} \leq 10$, то никакие ставки из расчета не исключаются ($m_{ijk} = 0$); в случае если $10 \leq F_{ijk} < 20$, то из расчета исключается самая большая и самая маленькая ставки ($m_{ijk} = 1$); для $20 \leq F_{ijk} < 30$ исключаются по две самых больших и самых маленьких ставки ($m_{ijk} = 2$); для $30 \leq F_{ijk} < 40$ исключаются по три самых больших и самых маленьких ставки ($m_{ijk} = 3$).

На практике исходные данные содержат значения средних фрахтовых ставок, в этом случае расчет по формуле (3) не нужен.

В экономике существует несколько формул для исчисления индексов товарных цен, в основе которых находится расчет по формуле Ласпейреса средневзвешенных значений. Следует отметить, что для фрахтового рынка выбор критерия для «взвешивания» имеет весьма принципиальный характер. В качестве показателя, определяющего объем транспортной работы, могут быть выбраны: объем перевозок, т; грузооборот, т-миль; доход, руб. Объем перевозок характеризует лишь количество перевезенных тонн груза, при этом не рассматриваются дальность перевозки, время рейса и иные важные эксплуатационно-экономические показатели. При использовании грузооборота дополнительно в рассмотрение включается дальность перевозки.

Наиболее комплексно отражает перевозку именно доход, при расчете которого используются объем перевозок и фрахтовая ставка, которая, в свою очередь, зависит и от дальности перевозки, и от времени рейса, а также от многих иных факторов. Различия «весовых» долей отдельных секторов или элементов фрахтового рынка [8], [9], определенных по разным показателям¹, существуют несмотря на то, что не имеют принципиального характера (рис. 1–3). Вместе с тем правильный выбор критерия для «взвешивания» долей при расчете фрахтовых индексов позволит повысить объективность выполняемого анализа и, соответственно, обоснованность принимаемых управленческих решений [10].

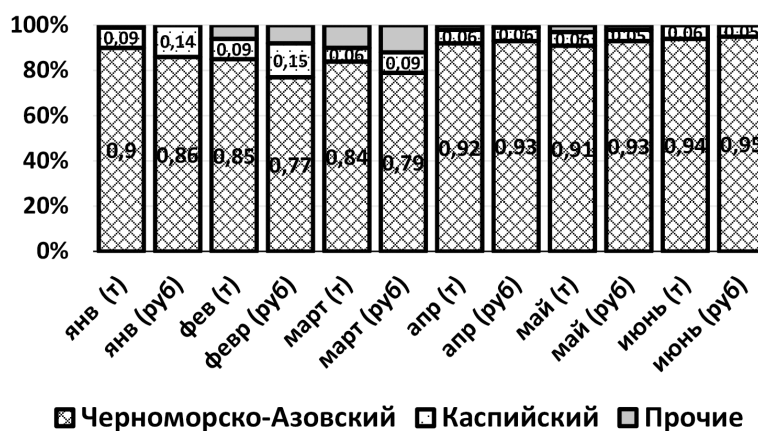


Рис. 1. Удельный вес морских бассейнов по объему перевозок и доходам при перевозке зерновых грузов из РФ в первом полугодии 2024 г.

¹ Российский зерновой союз. XXV Международный зерновой раунд «Рынок зерна – вчера, сегодня, завтра». Обращение участников XXV Международного зернового раунда // Хлебопродукты. — 2024. — № 7. — С. 20–22. — EDN ABJKND.

Для расчета простого индекса изменения фрахтовой ставки при перевозке i -го типа груза с использованием j -го типоразмера судна на k -м направлении применяется следующая формула:

$$I_{ijk}^T = \frac{\overline{FR}_{ijk}^T W_{ijk}^T}{\overline{FR}_{ijk}^6 W_{ijk}^6}, \quad (4)$$

где I_{ijk}^T — текущее значение фрахтового индекса;

T — признак, соответствующий текущему моменту времени;

6 — признак, соответствующий «базовому» моменту времени; в качестве «базового» может быть принят любой момент времени, в том числе и тот, когда «стартовал» расчет индекса;

W_{ijk}^T — «вес» рассматриваемого сектора рынка, соответствующего i -му типу груза, j -му направлению при использовании судов k -го типоразмера в текущий момент времени;

W_{ijk}^6 — «вес» рассматриваемого сектора рынка, соответствующего i -му типу груза, j -му направлению при использовании судов k -го типоразмера в «базовый» момент времени;

$\overline{FR}_{ijk}^T$ — текущая ставка фрахта за перевозку i -го груза на j -м направлении перевозки с использованием тоннажа k -го типоразмера;

$\overline{FR}_{ijk}^6$ — «базовая» ставка фрахта за перевозку i -го груза на j -м направлении перевозки с использованием тоннажа k -го типоразмера.



■ Пшеница □ Ячмень □ Кукуруза □ Прочие

Рис. 2. Удельный вес различных видов зерновых грузов по объему перевозок и доходам при перевозке из РФ в первом полугодии 2024 г.

При расчете сложного индекса изменения фрахтовой ставки для i -го вида груза при перевозке его с использованием j -го типоразмера судна на всех направлениях будет применяться формула (5), при расчете сложного индекса изменения фрахтовой ставки для i -го вида груза при перевозке его с использованием любых судов на всех направлениях — формула (6), при расчете индекса самого высокого уровня — формула (7):

$$I_{ij}^T = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^T W_{ijk}^T \right)}{\sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^6 W_{ijk}^6 \right)}; \quad (5)$$

$$I_i^T = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^T W_{ijk}^T \right)}{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^6 W_{ijk}^6 \right)}; \quad (6)$$

$$I^T = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^T W_{ijk}^T \right)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk}^6 W_{ijk}^6 \right)}. \quad (7)$$

Для выбора критерия «взвешивания» секторов фрахтового рынка следует рассмотреть факторы, определяющие различия в значениях «весовых» коэффициентов ($W_{ijk}^{T/6}$), используемых при расчете индексов [11].

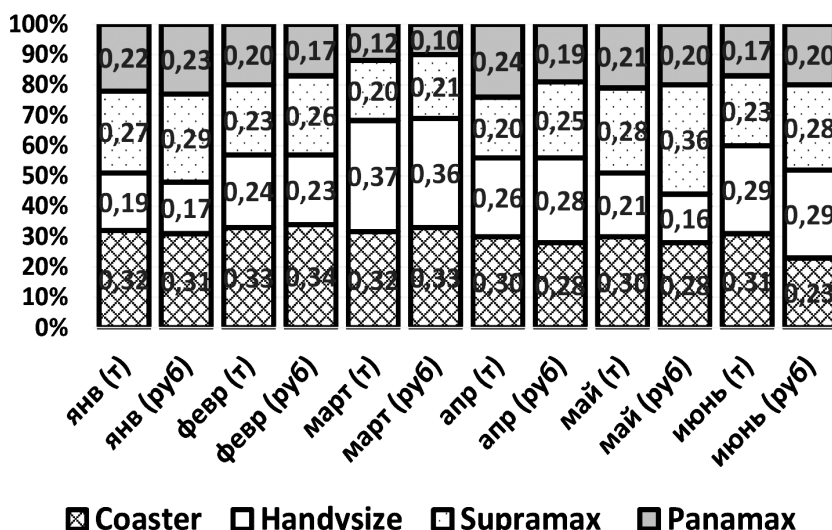


Рис. 3. Удельный вес различных типоразмеров используемых судов по объему перевозок и доходам при перевозке из РФ в первом полугодии 2024 г.

Удельный вес любого отдельного сектора фрахтового рынка, в котором перевозится i -й тип груза с использованием тоннажа j -го типоразмера на k -м направлении, определяемый по критерию общей величины фрахтовых доходов, следует рассчитывать по следующей формуле:

$$W_{ijk} = \frac{\overline{FR}_{ijk} DWCC_{jk} \frac{SF_i}{U_j}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(\overline{FR}_{ijk} DWCC_{jk} \frac{SF_i}{U_j} \right)}. \quad (8)$$

Очевидно, что общая сумма всех удельных весов равна единице. При «взвешивании» секторов рынка по объему перевозок формула для определения «весов» выглядит следующим образом:

$$W_{ijk} = \frac{DWCC_{jk} \frac{SF_i}{U_j}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left(DWCC_{jk} \frac{SF_i}{U_j} \right)}. \quad (9)$$

Формулы (8) и (9) позволяют «взвесить» сектора фрахтового рынка и могут быть использованы на практике, при этом именно формула (8) существенно повышает объективность расчета рыночных долей за счет рассмотрения факторов, определяющих величину средней фрахтовой ставки.

Результаты (Results)

Для наглядной демонстрации сделанных выводов, авторами исследования выполнен расчет фрахтовых индексов по предложенной ранее методике на примере перевозки зерновых грузов в первой половине 2024 г. из Черноморско-Азовского бассейна (рис. 4).

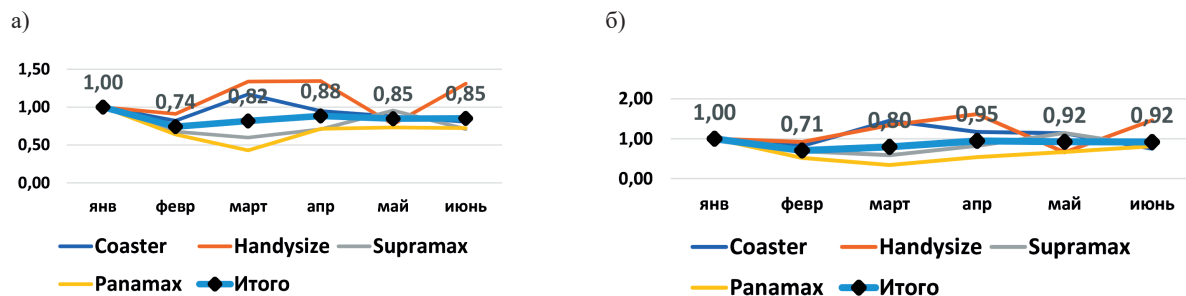


Рис. 4. Индексы фраховых ставок различных типоразмеров судов при «взвешивании» секторов рынка:
а — по объему перевозок; б — по величине фрахта

Представленные на рис. 4 кривые, соответствующие применению различных критериев для «взвешивания» отдельных долей рынка (объем перевозок и сумма фраховых платежей), имеют схожие тенденции изменения. Следует отметить, что «итоговые» кривые для сумм четырех различных рыночных долей, соответствующих различным типоразмерам судов, практически совпадают, т. е. происходит усреднение результатов, в то время как формы кривых для отдельных секторов фрахового рынка могут существенно различаться.

Выводы (Summary)

На основе выполненного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Значения рыночных долей отдельных секторов фрахового рынка, определенные по формуле (8), зависят от целой совокупности эксплуатационно-экономических показателей, в то время как доли, рассчитанные по формуле (9), зависят лишь от единственного показателя — объема перевозок. Таким образом, «взвешивание» долей по величине дохода (фрахта) позволяет получить более объективную картину динамики рынка.
2. Рыночные доли величины непостоянные, они изменяются во времени. Очевидно, что возможен их непрерывный расчет, что неизбежно приведет к значительным трудозатратам при определении индексов. Подобный расчет, конечно, повысит степень их объективности, но будет экономически неэффективным, поэтому пересмотр весовых коэффициентов следует выполнять с целесообразной регулярностью (например, ежеквартально).
3. Анализ конъюнктуры фрахового рынка необходим всем участникам транспортного процесса, так как он позволяет прогнозировать возможные рыночные изменения, предвидеть скачки и спады активности, разрабатывать и корректировать стратегии и тактики поведения компаний и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слицан А. Е. Структура системы «Рынок продукции морского транспорта» / А. Е. Слицан, С. А. Слицан // Эксплуатация морского транспорта. — 2006. — № 2(46). — С. 3–6. — EDN HVPJFH.
2. Тимченко Т. Н. Методические основы исследований рынка услуг морского транспорта / Т. Н. Тимченко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1(63). — С. 14–18. — EDN NYDLNP.
3. Петлина Ю. А. Современные тенденции развития отечественного рынка транспортных услуг в условиях санкционного воздействия / Ю. А. Петлина, О. А. Немчинов // Научные исследования современных проблем развития России: тенденции развития в условиях неопределенности: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции молодых ученых Санкт-Петербургского государственного экономического университета. Санкт-Петербург, 16 мая 2023 года: В 2 ч. — СПб., 2024. — С. 14–18. — EDN XHGECA.
4. Бабурина О. Н. Мировая торговля и международные морские перевозки в условиях новых геоэкономических рисков / О. Н. Бабурина, Г. В. Кузнецова, Г. В. Подбиралина, Е. В. Хекерт // Общественные науки и современность. — 2022. — № 3. — С. 50–66. DOI: 10.31857/S0869049922030042. — EDN EWNTXM.

5. Слицан А. Е. Методы оценки интенсивности конкуренции на рынке продукции морского транспорта : монография / А. Е. Слицан ; М-во транспорта РФ, Федер. гос. образоват. учрежд. Государственная морская акад. имени адмирала С. О. Макарова, каф. экономики и основ упр., каф. орг. и технологии перевозок. — СПб: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — 106 с. — EDN QQQGJL.
6. Орлов О. В. Фрахтовый рынок / О. В. Орлов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2022. — Т. 12. — № 4–1. — С. 401–405. DOI: 10.34670/AR.2022.11.33.004. — EDN LADNFB.
7. Акимова О. В. Анализ фрахтового рынка морских перевозок и способы его регулирования / О. В. Акимова, И. И. Тихонина // Научные труды SWorld. — 2015. — Т. 1. — № 4. — С. 35–39. — EDN VINFGV.
8. Березин А. О. Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом / А. О. Березин, Я. А. Сперанская, К. В. Прозоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699. — EDN FJOTBH.
9. Сперанская Я. А. Тенденции изменения фрахтовых ставок при перевозке массовых сухих грузов / Я. А. Сперанская, А. Н. Ситов, А. Е. Слицан, К. В. Прозоров // Транспортное дело России. — 2024. — № 6. — С. 169–171. — EDN QALAVM.
10. Скотченко А. С. Плоские и многомерные экономические модели прогнозирования / А. С. Скотченко // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13. — № 5–1. — С. 35–44. DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069. — EDN XRMGAI.
11. Ершов, Э. Б. Ситуационная теория индексов цен и количеств: дис. ... д-ра экон. наук / Ершов Эмиль Борисович, 2011. — 250 с. — EDN MPGMIP.

REFERENCES

1. Slitsan, A. E. and S. A. Slitsan “Struktura sistemy “Rynek produktii morskogo transporta.”” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(46) (2006): 3–6.
2. Timchenko, T. N. “Metodicheskie osnovy issledovaniy rynka uslug morskogo transporta.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 14–18.
3. Petlina, Yu. A. and O. A. Nemchinov “Sovremennye tendentsii razvitiya otechestvennogo rynka transportnykh uslug v usloviyakh sanktsionnogo vozdejstviya.” *Nauchnye issledovaniya sovremennykh problem razvitiya Rossii: tendentsii razvitiya v usloviyakh neopredelennosti. Sbornik nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. V 2-kh chastyakh, Sankt-Peterburg, 16 maya 2023 goda.* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, 2024: 14–18.
4. Baburina, O. N., G. V. Kuznetsova, G. V. Podbiralina and E. V. Khekert “Mirovaya trgovlya i mezhdunarodnye morskoe perevozki v usloviyakh novykh geoeconomicheskikh riskov.” *Obshchestvennye nauki i sovremennost* 3 (2022): 50–66. DOI: 10.31857/S0869049922030042.
5. Slitsan, A. E. , Feder. gos. obrazovat. uchrezhdenie Gos. mor. akad. im. admirala S. O. Makarova, Kaf. ekonomiki i osnov upr. and Kaf. org. i tekhnologii perevozok. *Metody otsenki intensivnosti konkurentsii na rynke produktii morskogo transporta : monografiya* SPb: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2005: 106.
6. Orlov, O. V. “Frakhtovyj rynek.” *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* 12.4–1 (2022): 401–405. DOI: 10.34670/AR.2022.11.33.004.
7. Akimova, O. V. and I. I. Tikhonina “Analiz frakhtovogo rynka morskikh perevozok i sposoby ego regulirovaniya.” *Nauchnye trudy SWorld* 1.4 (2015): 35–39.
8. Berezin, A. O., Ya. A. Speranskaya and K. V. Prozorov “Zakonomernosti razvitiya eksporta zernovykh kultur iz yuzhnykh regionov Rossii vodnym transportom.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699.
9. Speranskaya, Ya. A., A. N. Sitov, A. E. Slitsan and K. V. Prozorov “Tendentsii izmeneniya frakhtovykh stavok pri perevozke massovykh sukhikh грузов.” *Transportnoe delo Rossii* 6 (2024): 169–171.
10. Skotchenko, A. S. “Ploskie i mnogomernye ekonomicheskie modeli prognozirovaniya.” *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* 13.5–1 (2023): 35–44. DOI: 10.34670/AR.2023.52.74.069.
11. Ershov, E. B. *Situatsionnaya teoriya indeksov tsen i kolichestv* Grand PhD diss. 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ситов Александр Николаевич —

кандидат экономических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Сперанская Яна Андреевна — специалист

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Дворцовая набережная, д. 8

e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Слицан Андрей Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: slicanae@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sitov, Aleksandr N. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Speranskaya, Yana A. — Specialist,

FAI «Russian Maritime Register of Shipping»

8 Palace Emb., St. Petersburg, 191186,

Russian Federation

e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Slican, Andrey E. —

PhD, Docent

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: slicanae@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2024 г.

Received: Nov. 18, 2024

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963

MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR REBUILDING SHIP PROPELLERS BLADES DAMAGED UNDER CAVITATION ATTACK: HISTORY AND CURRENT STATE

Y. N. Tsvetkov, S. G. Baranov, Ya. O. Fiaktistov

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

Materials used for manufacturing ship propellers were listed, and classification of technologies of repairing ship propellers with cavitation wear spots was cited. The characteristics of materials used in the technologies were given. The advantages and disadvantages of the repair through deposition by welding as main technology at present time were listed. Alloys most resistant to cavitation wear were considered: dispersion-hardening alloys and alloys, in which the phase transformation occurs in cavitation impacts. The low manufacturability of mentioned alloys was pointed to, that is the principal cause of the fact that these alloys did not have a wide distribution in ship propellers repair. In modern practice of deposition by welding, the filler materials close by composition to the propeller alloys are used, and priority is given to regular recovery of surface quality and not to the rise in the surface wear-resistance. Improvement of the welding technology is now directed at the development of technological methods to raise the wear resistance, that is the methods, not based on the using the filler materials different from ship propellers materials. The advantage of the use of polymeric materials to repair the cavitation wear spots on the blades is noted. All the repair compounds are made of thermosetting resins, the most widespread of which are epoxy compounds. The peculiarities of cavitation attack on the blade surface in service are analyzed. It was mentioned that polymeric compounds being used nowadays are developed without taking into account these peculiarities. One has to draw attention to that the longevity of polymeric compound under propeller cavitation is determined in many respects by the adhesion of polymer to propeller material. A solution for the problem of the low adhesion of the polymer compounds to the propellers alloys will displace the repair technology based on the deposition by welding in future.

Key words: ship propellers blade, cavitation wear, incubation period, cavitation wear spot, repair, spraying, deposition by welding, polymeric repair composition, wear-resistance, manufacturability, adhesion.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., S. G. Baranov and Ya. O. Fiaktistov "Materials and technologies for rebuilding ship propellers blades damaged under cavitation attack: history and current state." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.6 (2024): 946–963. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963.

УДК 629.12.037.1

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПРИ КАВИТАЦИИ ЛОПАСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ю. Н. Цветков, С. Г. Баранов, Я. О. Фиактистов

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

Выполнен обзор материалов, используемых для изготовления гребных винтов и приведена классификация технологий ремонта винтов с очагами кавитационного износа. Дана характеристика применяемых

в этих технологиях материалов. Указаны достоинства и недостатки наплавки как основной в настоящее время технологии ремонта. Рассмотрены сплавы, наиболее износостойкие в условиях кавитации: дисперсионно-твердеющие сплавы и сплавы, испытывающие фазовые превращения при ударном нагружении. Отмечается, что ввиду низкой технологичности указанные сплавы не получили распространение в судоремонте, в современной практике ремонта изношенных при кавитации винтов используют материалы, близкие по составу к материалу судового движителя, фокусируя внимание на регулярном восстановлении качества поверхности, а не повышении ее износостойкости. Совершенствование технологии наплавки направлено в настоящее время на развитие технологических методов повышения износостойкости, т. е. методов, не предполагающих применение для повышения кавитационной износостойкости присадочных материалов, отличных от материала, используемого для изготовления гребных винтов. Отмечается перспективность использования полимерных составов для ремонта очагов кавитационного износа на лопастях. Обращается внимание на то, что все ремонтные составы изготавливаются на основе термореактивных смол, из которых наибольшее распространение получили эпоксидные компаунды. Указаны особенности кавитационного воздействия на поверхность лопастей в эксплуатации. Подчеркивается, что используемые в настоящее время полимерные составы и технологии разрабатываются без учета этих особенностей. Акцентируется внимание на том, что долговечность полимерного состава в условиях кавитации гребного винта определяется во многом адгезией полимера к материалу винта. Сделан вывод о том, что решение проблемы низкой адгезии полимерных ремонтных составов к материалу ГВ позволит в будущем вытеснить технологию ремонта ГВ, основанную на наплавке.

Ключевые слова: лопасть гребного винта, кавитационное изнашивание, инкубационный период, очаг кавитационного износа, ремонт, напыление, наплавка, полимерный ремонтный состав, износостойкость, технологичность, адгезия.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Материалы и технологии для восстановления изношенных при кавитации лопастей гребных винтов: история и современное состояние / Ю. Н. Цветков, С. Г. Баранов, Я. О. Фиактистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 946–963. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963.

Введение (Introduction)

Гребной винт (ГВ) относится к одним из наиболее дорогостоящих и ответственных изделий в составе судовой энергетической установки. От состояния ГВ зависит не только безопасность плавания, но и эффективность эксплуатации СЭУ. В процессе эксплуатации ГВ он подвергается коррозионному и кавитационному воздействию, что отражается на качестве поверхности его лопастей и, как следствие, на КПД судового движителя. Поэтому на состояние поверхности лопастей ГВ обращают серьезное внимание как в процессе эксплуатации¹, так и в результате проведения технологических операций при их изготовлении [1].

Кавитационное изнашивание ГВ — распространенное явление на водном транспорте. На современных судах ГВ изготавливают из сплавов, отличающихся сравнительно высокой коррозионной стойкостью, поэтому очаги кавитационного износа на лопастях имеют локальный характер и очень грубую рваную поверхность в отличие от коррозионно-нестойких углеродистых сталей и чугунов, широко применявшихся до середины XX в. для литья ГВ морских судов. На движителях из углеродистых сталей и чугунов кавитационное разрушение имело характер коррозионно-кавитационного с выраженным увеличением износа лопасти в направлении от оси вращения к концу лопасти.

Кавитационный износ обнаруживается на ГВ практически всех быстроходных судов, в частности судов на подводных крыльях. Как правило, на ГВ этих судов износ возникает в корневых районах лопастей, что снижает прочность лопасти и повышает вероятность аварийной ситуации из-за ее обрыва. На движителях больших транспортных судов от кавитационного износа страдают главным образом концевые районы лопастей, — в этом случае снижается КПД движителя.

Особенностью кавитационного изнашивания металлических [2] и полимерных [3] материалов является наличие инкубационного периода, в течение которого потери материала с поверхности практически отсутствуют, а значит, нет существенного ухудшения качества поверхности.

¹ Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 223 с.

Поэтому оценивать кавитационную износостойкость материалов ГВ важно именно по продолжительности инкубационного периода, а не по скорости потери массы (объема) материала с поверхности. В связи с этим ГВ сразу подлежит ремонту, заключающемуся в восстановлении качества поверхности при обнаружении кавитационного износа в процессе очередного докования судна.

Цель работы — на основе аналитического обзора материалов и технологий, применяемых для ремонта лопастей ГВ, изношенных при кавитации, определить перспективные направления совершенствования ремонта ГВ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Материалы, применяемые для изготовления гребных винтов. В подавляющем большинстве случаев ГВ современных судов изготавливают из металлических сплавов. Несмотря на все большее распространение полимерных материалов в технике, включая судостроение, использование их для изготовления ГВ даже с учетом технологичности полимеров пока находится под вопросом. Очевидно, что применение термопластичных полимеров для изготовления крупных ГВ (для морских транспортных судов) нецелесообразно по причине их малой жесткости и склонности к ползучести, а применение в качестве материала ГВ термореактивных полимеров невозможно по причине их склонности к хрупкому разрушению. Перспективным для производства крупных ГВ является применение композитных материалов, однако в направлении их создания для ГВ необходимо провести большой объем исследований по выбору оптимального сочетания связующего и наполнителя. Например, опыты на кавитационную износостойкость композита, состоящего из эпоксидной матрицы и упрочняющих волокон (углеродных, стеклянных или арамидных) [4], показали, что кавитационное изнашивание композита происходит путем шелушения эпоксидного связующего, при этом обнажаются волокна наполнителя, и повреждение распространяется в глубь материала.

Отраслевой стандарт ОСТ 5.9437–84 «Винты гребные металлические. Марки и назначение материалов» рекомендует для литья металлических ГВ применять следующие материалы: медные сплавы: латунь ЛЦ40МцЗЖ; бронзы: БрА9Ж4Н4Л, БрА7Мц14ЖЗН2Л; углеродистую сталь 25Л; нержавеющие стали: 08Х14НДЛ; 08Х15Н4ДМЛ.

До середины XX в. наиболее распространенными материалами для литья ГВ были чугуны, углеродистые стали и латуни. Чугуны уже более полувека не применяются в качестве материала ГВ, а применение углеродистой стали запрещено для изготовления движителей морских судов. Латунь для литья ГВ, ввиду ее более высокого удельного веса и низкой коррозионной стойкости в морской воде, в настоящее время практически не применяется, ее вытеснили алюминиевые бронзы. В XXI в. алюминиевые бронзы являются основным материалом для производства ГВ морских транспортных судов, реже используется нержавеющая сталь (для некоторых типов судов: ледоколов, лесовозов и т. п.).

Для изготовления движителей судов внутреннего плавания применяются углеродистая сталь 25Л и нержавеющая сталь 08Х14НДЛ. Применение стали для ГВ судов внутреннего плавания обусловлено ее лучшими показателями прочности по сравнению с медными сплавами, так как при эксплуатации речных судов возможны удары лопастей о плавающие предметы. На практике для речных судов помимо ранее указанных сплавов применяются специальные сплавы, сталь 20ХГНДЛ, углеродистые стали 30Л, 35Л и др.

Следует отметить, что несмотря на опыт изготовления ГВ из титановых сплавов, распространения в гражданском судостроении титановые сплавы в качестве материала ГВ не получили. По мере изменения номенклатуры сплавов, применяемых для литья ГВ, изменялись также и технологии их ремонта.

Классификация технологий ремонта лопастей, изношенных при кавитации. Кавитация ГВ отличается высокой эрозионной способностью. Это обусловлено нестационарным характером кавитации ввиду того, что ГВ работают в неравномерном поле скоростей. Все технологии восстановления поврежденных при кавитации ГВ можно условно разбить на две группы:

1-я группа — без применения дополнительного материала — шлифованием.

2-я группа — восстановление с применением дополнительного материала:

- с применением металлического материала;
- с применением полимерного материала.

Очевидно, что эффективность указанных методов восстановления изношенных участков лопастей во многом зависит от материала ГВ и величины износа.

Шлифованием ремонтируют лопасти с небольшими по глубине очагами кавитационного износа. В этом случае можно шлифованием снять поврежденный поверхностный слой материала без нарушения геометрии сечения лопасти.

Технологии ремонта, основанные на применении полимеров, находят все большее применение при ремонте ГВ водоизмещающих судов. В отличие от скоростных судов, в частности судов на подводных крыльях, на водоизмещающих судах неравномерность поля скорости в диске ГВ обусловлена неравномерностью попутного потока — движитель располагается за корпусом судна, при этом в потоке наибольшей неравномерности работают концевые сечения лопастей, поэтому очаги кавитационного износа на ГВ водоизмещающих судов возникают в концевых сечениях лопастей. При ремонте лопастей в этих районах приоритетным является восстановление качества поверхности, а вопросы прочности лопасти отходят на второй план.

В технологиях ремонта ГВ с применением металлического материала на основе публикаций, появившихся с середины XX в., можно выделить пять направлений, применяемых по мере развития технологии для восстановления изношенных при кавитации районов лопастей ГВ:

- покрытие ГВ листами более стойкого материала;
- электролитическое нанесение износостойких покрытий ГВ;
- химико-термические способы упрочнения поверхности ГВ;
- напыление изношенных лопастей движителей;
- наплавка изношенных участков лопастей и др.

Следует отметить, что первые четыре направления ремонта ГВ в настоящее время полностью вытеснены наплавкой. Причина заключается в том, что ГВ является массивной деталью и его диаметр на транспортных судах составляет несколько метров. При этом реализация первых четырех из них предполагает, что в технологии задействована вся поверхность ГВ, что является нерациональным ввиду не только финансовых затрат, но и того, что термическое воздействие, являющееся неотъемлемой частью всех этих технологий, будет оказано на материал всего винта, что нежелательно. Кавитационный износ имеет очаговый характер, т. е. представляет собой локальные зоны площадью в несколько сотен квадратных сантиметров, и технологические решения должны реализовываться на этих ограниченных участках. Когда основным материалом для лопастей ГВ являлись углеродистые стали, имеющие низкую коррозионную стойкость, при эксплуатации в морской воде скорость кавитационного изнашивания существенно увеличивалась из-за влияния электрохимической коррозии. Поэтому нанесение любого подходящего с точки зрения технологии коррозионно-стойкого материала повышало стойкость ГВ из углеродистой стали к кавитационному воздействию, так как влияние коррозионного фактора исключалось. В современных условиях, когда основным материалом для изготовления ГВ являются бронзы и нержавеющие стали, указанные технологии не могут дать положительного эффекта.

В последние десятилетия XX в. наблюдался рост исследований по газотермическому напылению ГВ. Однако газотермические покрытия имеют пористость 5–25 % в зависимости от способа напыления, т. е. они не только не будут защищать ГВ от коррозионного воздействия морской воды, но и являются принципиально непригодными для эксплуатации в условиях кавитационного воздействия, в которых работают лопасти ГВ, без дополнительной обработки (например, оплавления самофлюсующихся сплавов или термодиффузионного легирования поверхности хромом и т. п.). Положительный опыт восстановления плазменным напылением существует именно для ГВ из углеродистых сталей небольшого размера самофлюсующимися сплавами серии

ПГ-СР и смесями системы Ni-Ti-Al, а также газопламенным напылением смесью железного порошка, феррохрома и ферромарганца. В то же время если ГВ изготовлен из бронзы или другого медного сплава — более износостойкого материала в условиях кавитации по сравнению с углеродистой сталью, то в этом случае напылением положительного эффекта достичь чрезвычайно трудно, так как стойкость определяется когезионной прочностью покрытия.

Заслуживает внимания технология холодного газодинамического напыления. При холодном газодинамическом напылении образование покрытия происходит при столкновении частиц металла с очень высокой скоростью с подложкой. При ударе частицы пластически деформируются возникает высокая адгезия к подложке: образуются покрытия практически с нулевой пористостью [5], при этом кавитационная износостойкость полученных холодным газодинамическим напылением покрытий превышает износостойкость исходного материала (в компактном состоянии) [6]. Возможно применение холодного газодинамического напыления в сочетании с другими видами обработки [7]. В разное время высказывались идеи о применении холодного газодинамического напыления для ремонта ГВ, однако пока данные о таком применении отсутствуют.

Ремонт лопастей, изношенных при кавитации, наплавкой. Анализ многочисленных актов освидетельствования состояния движительно-рулевых комплексов транспортных судов показывает, что ремонт изношенных участков ведется электродуговой наплавкой. ОСТ5Р.9782–2004² регламентирует зоны ГВ, в которых можно осуществлять ремонт, химический состав наплавочных материалов, режимы наплавки, последующую термообработку и контроль геометрии лопастей. Согласно положениям данного ОСТа, ГВ с небольшой откидкой лопастей можно ремонтировать наплавкой, если очаги кавитационного износа возникают в зонах В и С (рис. 1 а, б). Если кавитационный износ возникает в зоне А, то ремонт этих зон можно осуществлять механической обработкой (шлифованием), а разрешение на применение наплавки нужно согласовывать в установленном порядке. Особые требования к зоне А обусловлены тем, что корневые сечения лопасти относятся к наиболее нагруженным, при этом на нагнетательной стороне материал лопасти работает на растяжение. Расчет напряжений в статической постановке показывает, что напряжения в корне лопасти достигают 60–70 МПа (рис. 1, в). Очаг кавитационного износа служит концентратором напряжения, при коэффициенте концентрации, равном 3,0–4,0, напряжения в зоне очага износа могут достигать предела текучести лопасти. Поэтому для ликвидации очага износа в корне лопасти наплавка является, пожалуй, единственным приемлемым способом, так как восстановить прочность лопасти, что в данном случае является приоритетом, другим способом не удастся.

Практика показывает, что наплавленные участки при последующем доковании обнаруживают появление новых зон кавитационного износа и это неслучайно, поскольку наплавку изношенных бронзовых ГВ ведут прутками такого же состава, как и основной металл, или по крайней мере близкого к нему. ОСТ5Р.9782–2004 рекомендует для наплавки ГВ из латуни применять прутки марки ЛЖМц59–1–1 или БрАМц9–2, для наплавки ГВ из бронзы БрА9Ж4Н4Л — прутки марки БрАЖНМц8,5–4–5–1,5, для наплавки ГВ из бронзы БрА7Мц14ЖЗН2Л — прутки марки БрМцАЖН12–8–3–2. То есть рекомендации данного стандарта соответствуют многолетнему опыту наплавки в судоремонте. Целью их является не повышение кавитационной износостойкости отремонтированных участков, а качественное восстановление геометрии изношенных лопастей, исключаяющее появление дефектов при наплавке. Такая же практика существует и за рубежом, — наплавку изношенных участков бронзовых ГВ ведут прутками из сплава такого же типа, как и сплав винта.

² ОСТ5Р.9782–2004. Винты гребные из сплавов на медной основе. Исправление дефектов и повреждений. Типовой технологический процесс. Принят и введ. в действие Распоряжение Тех. комитета по стандартизации ТК «Судостроение» от 18.01.2004 № ТК-9782–1. Взамен РД5Р.9782–79.

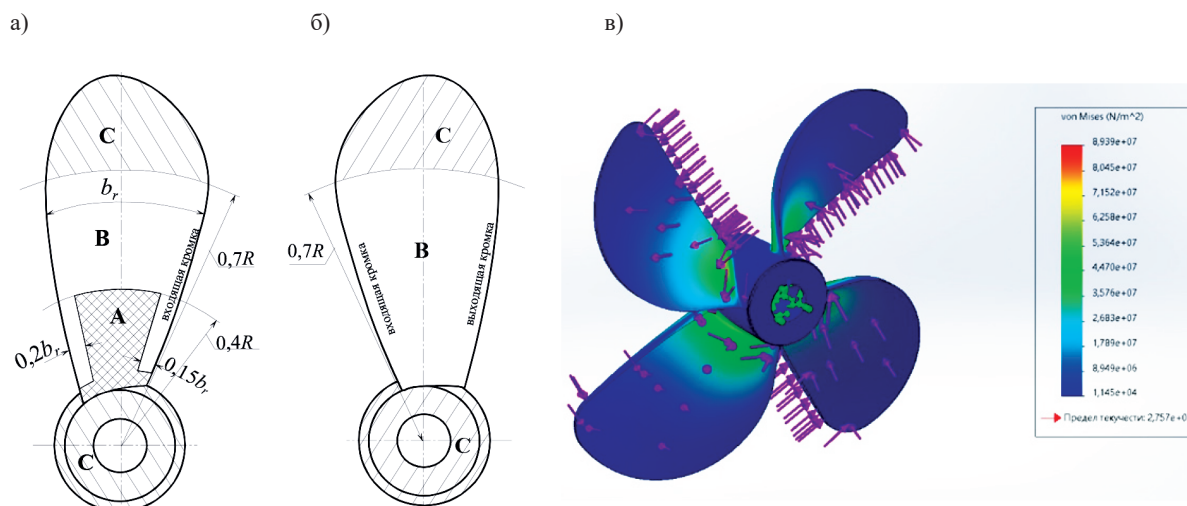


Рис. 1. Ремонтные зоны ГВ судна проекта Atlantic Project II:

a — на нагнетательной поверхности лопасти; *б* — на засасывающей поверхности лопасти;
в — распределение напряжений в лопастях работающего бронзового ГВ диаметром 6,8 м

Наплавка материалами, близкими по составу к материалу ГВ, не позволяет получить покрытия, обеспечивающие более высокую кавитационную износостойкость по сравнению с исходным материалом ГВ. Разработка технологии наплавки упрочняющих составов предполагает прежде всего выбор соответствующего материала, который в наплавленном состоянии превышает по износостойкости исходный материал ГВ в условиях кавитационного воздействия в коррозионно-активной жидкости, т. е. в условиях эксплуатации. Так как наплавленный участок небольшой по площади и окружен материалом винта, необходимо, чтобы нанесенное покрытие являлось по отношению к материалу винта в морской воде катодом. В этом случае, как показали исследования Ю. Е. Зобачева, если отношение площади анода к катоду больше чем 4: 1, коррозией основного металла можно пренебречь. Таким образом, нанесенный материал должен по кавитационной износостойкости превосходить материал-основу, а его стационарный потенциал в морской воде быть больше, чем потенциал материала ГВ.

Известно, что наибольшей кавитационной износостойкостью обладают металлические сплавы, дисперсионно-твердеющие после соответствующей термической обработки, и сплавы, испытывающие фазовые превращения при микроударном нагружении. Из дисперсионно-твердеющих медных сплавов зарубежными исследователями в разное время предлагались бериллиевая бронза и алюминиевая бронза, легированная кобальтом. Бериллиевую бронзу, по всей видимости, целесообразно применять для судов на подводных крыльях, на движителях которых процессы кавитационного разрушения протекают особенно интенсивно. Натурные испытания ГВ из этой бронзы на судне на подводных крыльях дали положительные результаты. Однако можно предположить, что в условиях эксплуатации ГВ транспортных судов преимущество бериллиевой бронзы для кавитационной стойкости утрачивается из-за ее более низкой коррозионной стойкости по сравнению с алюминиевой бронзой. Преимущество бронзы, легированной кобальтом, по сравнению с бериллиевой бронзой состоит в том, что она значительно превышает ее по сопротивлению коррозии.

Главный недостаток дисперсионно-твердеющих сплавов в том, что они требуют проведения специальной термической обработки для дисперсионного выделения твердой фазы. Такую обработку очень сложно провести для локального наплавленного участка лопасти, а тем более без снятия ГВ с гребного вала, так как для этого требуется наличие больших печей. Поэтому предпочтительным является использование структурно нестабильных сплавов, упрочняющихся не только при пластической деформации, но и в результате фазовых превращений. В этом случае часть энергии внешнего воздействия идет на распад высокотемпературной фазы

с образованием стойких мартенситных структур и лишь оставшаяся часть — на микроударное разрушение сплава:

$$E = A_{\text{фаз.пр}} + A_{\text{разр}}, \quad (1)$$

где E — энергия ударов при кавитационном воздействии;

$A_{\text{фаз.пр}}$ — работа фазовых превращений в сплаве при кавитационных ударах;

$A_{\text{разр}}$ — работа разрушения образовавшейся новой фазы.

Такие нестабильные структуры можно получить в высокоалюминиевых бронзах (содержание алюминия 11,0–14,5 %) и в сталях с нестабильным аустенитом.

Общепринято, что стойкость металла при микроударном нагружении определяется прочностью его микрообъемов. Микроструктура двухфазного сплава Cu-Al при температуре выше 565 °С состоит из больших «островков» твердого раствора α -фазы и β -фазы — электронного соединения переменного состава. В зависимости от термической обработки β -фаза либо распадается на эвтектоидную смесь ($\alpha + \gamma_2$), где γ_2 — соединение электронного типа, либо превращается в бейнитную или мартенситную структуру. При этом стойкость этих сплавов, согласно К. М. Прис, довольно значительно различается друг от друга. Как показали исследования И. Н. Богачева, Р. И. Минца и Т. М. Петуховой, кавитационное разрушение начинается с менее стойкой α -фазы: ее глобулярные частицы повышают кавитационную стойкость, а вытянутые, пластинчатые — снижают. Эвтектоидные участки подвергаются обезалюминиванию (коррозии) в морской воде³. Это объясняется тем, что γ_2 -фаза, богатая алюминием, является анодной по отношению к α -фазе. Сопротивление коррозии у алюминиевой бронзы будет хорошим, если исключить расположение γ_2 -фазы в виде непрерывной сетки по границам α -фазы⁴, обеспечив мелкодисперсную глобулярную форму γ_2 - и α -фазы.

При содержании в бронзе более 9 % алюминия высокотемпературная β -фаза способна не распадаться полностью на ($\alpha + \gamma_2$)-эвтектоид и испытывать мартенситное превращение при микроударном нагружении. Например, Т. М. Петухова предложила кавитационно-стойкую бронзу, испытывающую фазовые превращения при кавитационном воздействии для изготовления деталей гидрооборудования следующего состава: 12,5–14,5 % Al, 1–6 % Ni, 1–4 % Co, 1–3 % Mn, остальное Cu.

Для обеспечения высокой кавитационной износостойкости необходимо получить в наносимом покрытии как можно больше метастабильной β -фазы. При этом мартенситная фаза в Al-бронзах не столь прочна при кавитационном воздействии, как аналогичная фаза в железоуглеродистых сплавах, поэтому для повышения ее кавитационной износостойкости, т. е. увеличения $A_{\text{разр}}$ в выражении (1), необходимо дополнительное легирование. Например, в работе [8] предложено легировать высокоалюминиевую бронзу малыми количествами титана, так как титан образует высокодисперсные интерметаллиды, упрочняющие мартенситную матрицу.

Впервые медный мартенсит в практике восстановления изношенных кавитацией ГВ был использован О. Г. Быковским⁵ при восстановлении латунных ГВ судов на подводных крыльях бронзами БрАН14–3 и БрАЖН14–4–6 с применением ручной дуговой наплавки покрытыми электродами и аргоно-дуговой наплавки вольфрамовым электродом. Натурные испытания показали, что износостойкость наплавленных зон более чем в 2 раза превышает этот показатель для материалов движителей судов на подводных крыльях, однако это не приводит к кардинальному улучшению ситуации: существенной разницы нет, будет глубина кавитационного износа после 200 ч составлять 10 мм на латунных ГВ или за то же время — 5 мм на наплавленной бронзе. Данное обстоя-

³ Зимнева Е. М. Морская коррозия медных сплавов / Е. М. Зимнева, Л. И. Шибалова, В. П. Шеманова [и др.]. Л.: Изд. — во судостроительной промышленности, 1963. 88 с.

⁴ Соколов Н. Н. Гребные винты из алюминиевой бронзы / Н. Н. Соколов, С. П. Лазаренко, В. И. Журавлев. Л.: Судостроение, 1971. 288 с.

⁵ Быковский О. Г. Исследование кавитационной эрозии, разработка электродных материалов и технологий наплавки гребных винтов СПК: автореф. дис... канд. техн. наук. Киев, 1969.

ятельство еще раз подтверждает низкую эффективность борьбы с кавитационным износом заменой материала в жестких условиях кавитационного воздействия. Известно, что интенсивность кавитационного изнашивания ГВ судов на подводных крыльях, работающих в скошенном потоке, чрезвычайно велика. Неизвестно, как себя поведет медный мартенсит в условиях малоинтенсивного кавитационного изнашивания ГВ морских транспортных судов; представляется, что для достижения эффекта в этом случае необходимо будет обеспечить соответствующую коррозионную стойкость метастабильных сплавов. Для этого необходимо обеспечить как можно более полное подавление распада высокотемпературной β -фазы на эвтектоид с выделением анодной γ_2 -фазы.

Одной из особенностей наплавки алюминиевых бронз, содержащих 10–14 % Al, является образование тугоплавкой и труднорастворимой оксидной пленки Al_2O_3 . Присадочных прутков из высокоалюминиевых бронз отечественная промышленность не производит. Как показали исследования О. Г. Быковского, в качестве электродного стержня весьма эффективным оказалось использование композитной проволоки, получаемой путем совместной протяжки медной ленты и алюминиевой проволоки соответствующих размеров через твердосплавную фильеру.

Метастабильные структуры можно получить и на железоуглеродистых сплавах. Таковыми сплавами являются сталь 30X10Г10, разработанная более полувека назад И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем, и сталь 25X14Г8Т, разработанная А. В. Картышовым. Несмотря на то, что сталь 30X10Г10 была рекомендована ГОСТ 10543–75⁶ для наплавки кавитационно-стойких слоев, для условий малоинтенсивного кавитационного изнашивания она не подходит, так как не обладает достаточной коррозионной стойкостью из-за низкого содержания в ней хрома (менее 13 %). Сталь 25X14Г8Т является коррозионно-стойкой, но промышленностью также не выпускаются прутки из стали 25X14Г8Т. Необходимо отметить, что стали с нестабильным аустенитом нетехнологичны, а повышенное содержание в них марганца требует хорошей защиты сварщика при проведении наплавочных работ. По всей видимости, применение сплавов с метастабильной структурой требует тщательного выбора режимов последующей после наплавки механической обработки наплавленного участка, так как пластическая деформация при резании может приводить к преждевременным фазовым превращениям, что снижает кавитационную износостойкость наплавленного слоя.

За последние 30 лет количество работ, темой которых является создание кавитационно-износостойких сплавов, резко сократилось. Отчасти это вызвано тем, что не удалось создать сплав, обладающий комплексом необходимых свойств: высокой кавитационной износостойкостью, высокой коррозионной стойкостью и высокой технологичностью. Именно низкая технологичность предлагаемых износостойких сплавов привела к тому, что в современной практике ремонта изношенных при кавитации ГВ используют материалы, близкие по составу материалу ГВ, т. е. приоритет отдают именно регулярному восстановлению качества поверхности, а не повышению ее износостойкости. В настоящее время исследовательские работы в основном направлены на технологические методы повышения износостойкости, т. е. методы, не предполагающие использование для повышения кавитационной износостойкости присадочных материалов, принципиально отличных от материала ГВ. Далее рассмотрены несколько направлений развития технологических методов повышения износостойкости зон кавитационного износа на ГВ при ремонте.

Представляет интерес возможность получения высокой кавитационной износостойкости наплавленного металла в процессе его плавления и охлаждения. В статье [9] рассмотрены исследования кавитационной износостойкости наплавленного металла на пластину из литой алюминиево-марганцевистой бронзы. Состав бронзы следующий: Cu — основа; 11–14 % Mn, 7–11 % Al, 2,5–6 % Fe и 1,5–3 % Ni. В пластине из этой бронзы была сделана U-образная канавка, заполняемая сваркой с использованием присадочного прутка того же состава. При этом отмечалось, что в зоне сварки (в наплавленном металле) образовалось очень мелкое зерно вследствие очень быстрого охлаждения и кристаллизации. Быстрое охлаждение не задержало выделение κ_{II} -фазы, но задержало рост α -фазы, которая выделилась по границе и внутри β -фазы, т. е. микроструктура наплавленного металла состояла из α -, β - и κ_{II} -фазы. Такая структура обеспечила кратное уменьшение потери

⁶ ГОСТ 10543–75. Проволока стальная наплавочная. Изд. офиц. Введ. 01.07.83.

массы при кавитационном воздействии (рис. 2, а), однако при этом продолжительность инкубационного периода практически не увеличилась. По всей видимости, в действительности кавитационный износ уменьшается за счет измельчения зерна и, как следствие, уменьшения размера частиц износа.

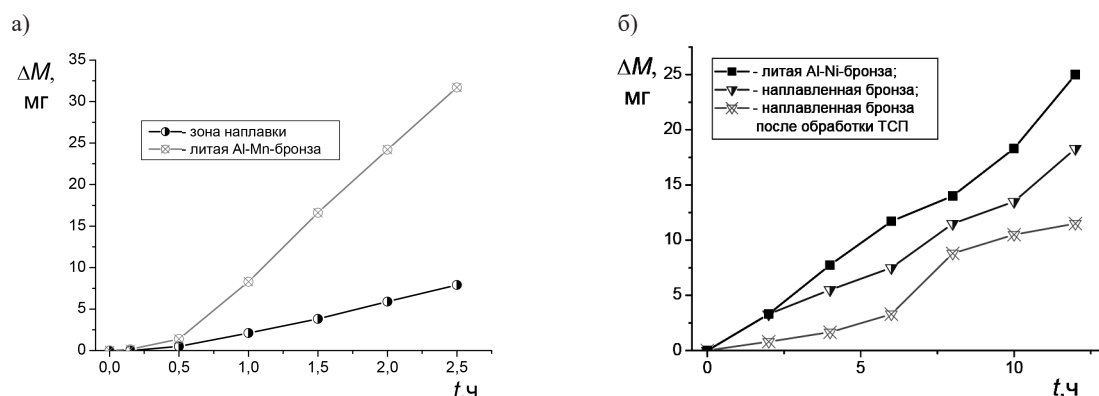


Рис. 2. Кинетические кривые кавитационного изнашивания в пресной воде литой Al-Mn-бронзы и зоны наплавки (а) [9], а также в 3,5%-м водном растворе NaCl литой Al-Ni-бронзы, зоны наплавки и зоны наплавки после обработки ТСП (б) [11]

Следует отметить, что испытания на кавитационную износостойкость проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе, что позволило реализовать ударное воздействие микроструй, диаметр которых составлял десять и более микрометров [10]. В этих условиях измельчение зерна, по всей видимости, не оказывает влияния на продолжительность инкубационного периода, так как пластичность металла в микрообъемах не изменяется. Вероятно, при испытании на струеударном стенде, при диаметре струи, равном нескольким миллиметрам, наряду с уменьшением скорости изнашивания было бы зарегистрировано также и увеличение инкубационного периода. Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть сконцентрированы на оптимальном выборе режимов наплавки для получения максимально возможной износостойкости наплавленного металла.

В работе [11] предлагается осуществлять наплавку ГВ из алюминиево-никелевой бронзы в сочетании с обработкой трением с перемешиванием (ТСП). В отличие от традиционного способа сварки ТСП [12] в статье [11] предлагается сначала производить традиционную наплавку изношенных при кавитации районов ГВ с применением присадочного прутка аналогичного по составу материалу ГВ, а затем — обработку ТСП. При этом использовалась существенно большая скорость вращения инструмента-шпинделя и более низкая скорость прижима торца шпинделя к бронзе. Материал наплавки при трении размягчается, торец вращающегося шпинделя частично погружается в бронзу и при поперечном движении шпинделя происходит перемешивание наплавленного материала и измельчение его зерна. Дополнительное преимущество такой обработки заключается в ликвидации дефектов (пор) в наплавленном металле. Испытания в 3,5%-м водном растворе NaCl показали, что обработка ТСП существенно увеличивает кавитационную износостойкость наплавленной бронзы (рис. 2, б), при этом и скорость коррозии после обработки ТСП снижается более чем в два раза. Необходимо отметить, что бронза в наплавленном состоянии на рис. 2, б, так же, как и на рис. 2, а, показала более высокую износостойкость по сравнению с исходным (литым) состоянием.

В качестве одного из возможных способов повышения кавитационной износостойкости металлов традиционно рассматривался наклеп. При этом до сих пор нет единого мнения об эффективности предварительной холодной пластической деформации на износостойкость металла. Ранее в работе [8] отмечалось, что предварительная пластическая деформация уменьшает продолжительность инкубационного периода кавитационного изнашивания. Тем не менее данные по предварительной обкатке шариком аустенитных сталей [13] показывают, что их кавитацион-

ная износостойкость заметно увеличилась. Положительное влияние предварительной пластической деформации на увеличение кавитационной износостойкости подтверждается также опытами на аустенитно-ферритной азотированной стали [14] (рис. 3, а) и на наплавленном слое из аустенитной стали [15] (рис. 3, б).

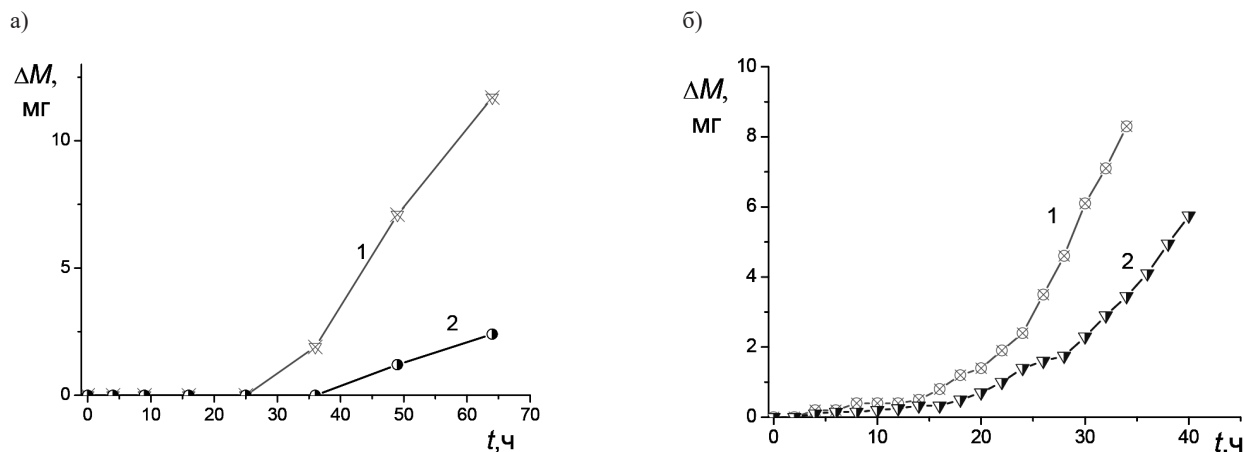


Рис. 3. Кавитационное изнашивание азотированной аустенитно-ферритной стали (а) до 1 и после 2 поверхностного пластического деформирования обкаткой шариком [14] и наплавки из аустенитной Cr-Mn-стали (б) с недеформированной 1 и пластически деформированной 2 в результате фрезерования поверхностью [15] при испытании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в пресной воде

При кавитационном воздействии металл испытывает большие пластические деформации, которые накапливаются от цикла к циклу (от удара к удару). В результате разрушение носит квазистатический характер, а предварительная пластическая деформация приводит к расходу запаса пластичности, что должно сокращать продолжительность инкубационного периода. Однако предварительная пластическая деформация приводит также к повышению твердости поверхности, что, в свою очередь, ведет к снижению жесткости схемы напряженного состояния при кавитационных ударах [8], что, наоборот, увеличивает продолжительность инкубационного периода. По всей видимости, окажет ли предварительная пластическая деформация металла положительный эффект на его кавитационную износостойкость, будет зависеть от того, какой из указанных факторов является доминирующим. В любом случае ответ на вопрос, является ли положительное влияние предварительного наклепа на износостойкость особенностью только аустенитной стали, требует дальнейшего исследования и анализа.

Ремонт лопастей, изношенных при кавитации, с применением полимерных материалов. Совершенствование технологии ремонта изношенных при кавитации лопастей ГВ водоизмещающих судов, основанной на нанесении полимерных составов, является перспективным направлением. Преимущества указанной технологии: трудоемкость существенно ниже трудоемкости ремонта с применением наплавки, перечень подготовительных работ сведен к минимуму и часто не требуется демонтаж ГВ.

Сравнительный анализ стойкости к кавитационному воздействию разных полимеров: термопластичных (полиэтилена высокой плотности, полипропилена, полиамида) и терморективных (на основе эпоксидной смолы) показал, что самую низкую износостойкость в условиях вибрационной кавитации имеет эпоксидный полимер, а самую высокую — термопластичные полимеры: полиэтилен высокой плотности и полиамид [3]. Это подтверждается также экспериментами авторов данной статьи, проведенными на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равными около 22 кГц и 30 мкм соответственно (рис. 4). Видно, что продолжительность инкубационного периода полиэтилена и капролона (рис. 4, а) существенно превосходит таковую для сплавов ГВ (рис. 4, б).

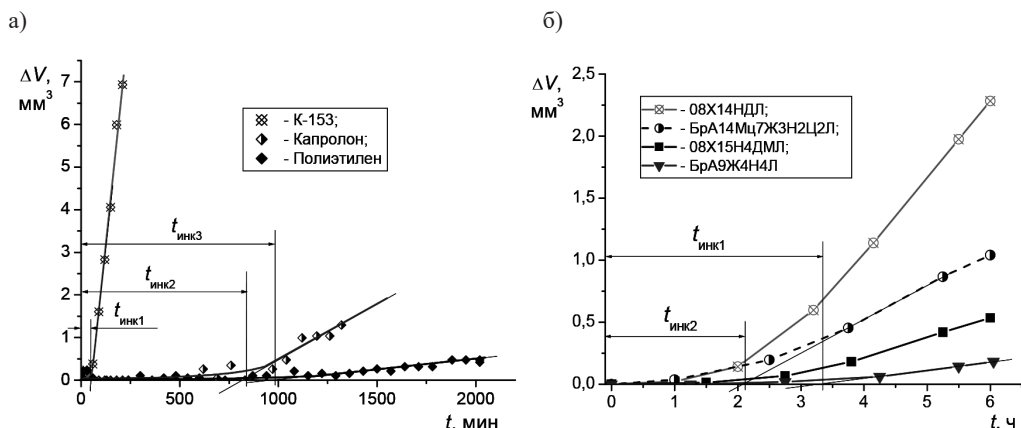


Рис. 4. Кинетические кривые кавитационного изнашивания полимеров (а) и винтовых сплавов (б) при испытании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в пресной воде

Тем не менее в практике судоремонта, принимая во внимание технологичность термореактивных смол, а также чрезвычайно низкую адгезию термопластичных полимеров к металлам, полимерные композиции для ремонта оборудования в подавляющем большинстве случаев составляются с применением в качестве связующего именно термореактивных смол (эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых). Прежде всего, это обусловлено их высокой технологичностью, так как в исходном (низкомолекулярном) состоянии они представляют собой вязкие жидкости, что позволяет заполнять ими полости любой формы, которая фиксируется после отверждения с применением различных дополнительных реагентов. В судоремонте нашли широкое применение зарубежные и отечественные полимерные составы. Основные характеристики некоторых из них приведены в следующей таблице.

Примеры полимерных составов, используемых в судоремонте, и их характеристики

Марка состава	Состояние состава	Наполнитель	Минимальная температура применения, °С	Время затвердевания, ч	Прочность*(МПа) на сдвиг / сжатие, не менее
Belzona 1121 (Супер XL-Металл)	Жидкость	Стальной порошок	5	24	14/93,8
Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer)	Жидкость	Нет	5	12	—
Chester Metal Ceramic FSL	Жидкость	Металлический порошок, керамический порошок, волокно	5	7	24/120
Devcon Brushable Ceramic	Паста	Керамический порошок	15	24	22/105
Devcon Titanium Putty	Паста	Порошок титана	15	24	17/130
Devcon Bronze Putty (BR)	Паста	Порошок бронзы	15	24	18,5/58,9
Diamant Moglice	Паста	Нет	–10	18	66/120
Weicon BR	Паста	Порошок бронзы	5	24	18/82
УП-5-177	Жидкость	Порошки оксида алюминия и кремнезема, сажа, стеклянные и синтетические волокна	0	24	18/148
УП-5-177-1	Жидкость	Порошки никеля, ванадия, бериллия или цинка	0	24	13/132
К-153	Жидкость	Нет	15	24	13/160
Спрут-9М	Жидкость	Нет	–5	24	90/260

*При слое 0,2–0,5 мм.

Из приведенных в таблице только составы «Спрут-9М» и Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer) созданы не на основе эпоксидных смол. Состав «Спрут-9М» готовят на основе полиэфирной смолы ПН-609–21М с ускорителем полимеризации НК-1, модифицирующей добавкой и добавкой инициатора полимеризации. Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer) является двухкомпонентным и состоит из полиуретановой смолы с отвердителем. Остальные составы: Belzona Супер XI–Металл, Chester Metal Ceramic FSL, Devcon⁷, K-15, УП-5–177, УП-5–177–1, Diamant Moglice, Weicon BR, имеют эпоксидную основу. Эпоксидные полимеры находят наиболее широкое применение при ремонте ГВ, так как обладают многими достоинствами [16]: низким значением усадки, сравнительно хорошей адгезией к металлам, сравнительно высокой прочностью, хорошей стойкостью к воде, высокой технологичностью, не выделяют вредных веществ. В этом отношении составы на основе полиэфирных смол уступают эпоксидным составам.

Из трех видов составов (на основе эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых смол) наиболее перспективным для ремонта лопастей ГВ с очагами кавитационного износа являются полиуретановые составы. По адгезии к металлам полиуретановые составы не только не уступают эпоксидным компаундам, но даже несколько превосходят их, а опыты на кавитационный износ показали, что кавитационная износостойкость состава Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer)кратно превосходит износостойкость низкоуглеродистой стали [17], т. е. она сопоставима с износостойкостью винтовых металлических сплавов. Тем не менее в настоящее время в практике ремонта ГВ полиуретановые составы применяются существенно реже эпоксидных.

Возможность использования полимерных составов при ремонте ГВ отмечается также в п. 11.2.7 методических рекомендаций⁸, где указано, что устранение язв, вызванных коррозией или эрозией, должно производиться по возможности без заварки. В первую очередь должны быть устранены источники концентрации напряжений, т. е. острые края и углы язв путем вырубки и фрезерования абразивным инструментом. Шлифование после вырубки является обязательным. Вместо механической обработки, по согласованию с Российским морским регистром судоходства, дефекты могут быть устранены полимерными ремонтными составами. В прил. 6 данных методических рекомендаций указано, что эпоксидные композиты, используемые в судоремонте, которые получают путем смешения модифицированной эпоксидной диановой смолы (основы) и отвердителя, могут дополнительно содержать наполнители, растворитель (разбавитель) и армирующий материал. Свойства эпоксидного компаунда определяются сочетанием основы и отвердителя, которые выбираются в зависимости от назначения композиции и условий нанесения.

При выборе эпоксидных композиций рекомендуется руководствоваться положениями «Руководства по ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных (композиционных) и полимерных материалов⁹, в соответствии с которыми устранение кавитационного износа лопастей рекомендуется осуществлять созданием многослойного покрытия (рис. 5). После очистки и подготовки поверхности сначала наносят ремонтный эпоксидный состав 4 с металлическим наполнителем для заполнения основного объема очага износа, затем — слой грунтовки 3 толщиной 20–30 мкм, затем — демпфирующий слой 2 из эластичного компаунда суммарной толщиной 0,5 мм, сверху — слой износостойкой эпоксидной краски толщиной 0,25 мм.

Трудно оценить долговечность такого многослойного покрытия (рис. 5), так как данные с результатами эксплуатации ГВ, отремонтированных по изложенной технологии, недоступны. Следует отметить, что технические решения по применению полимерных составов для ремонта ГВ, изношенных при кавитации, в настоящее время не всегда представляются обоснованными. Это

⁷ Под маркой Devcon выпускается линейка ремонтных составов, включая перечень продуктов с наполнителями в виде металлических порошков (бронзовых, титановых, стальных, алюминиевых).

⁸ Методические рекомендации по техническому наблюдению за ремонтом морских судов. СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2020. 221 с.

⁹ СТО ЯКУТ.21.52–2017. Руководство по ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных (композиционных) и полимерных материалов. Типовые технологические процессы. СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. С. 73–74.

связано с тем, что рекомендации по применению не основываются на реальных условиях кавитационного воздействия на лопасти ГВ в эксплуатации.

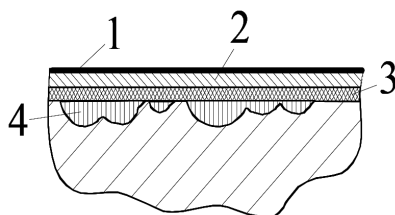
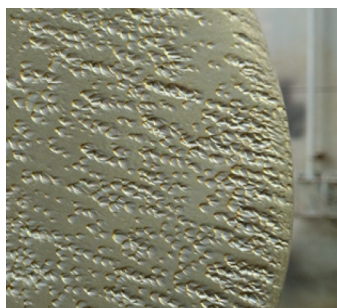


Рис. 5. Устранение кавитационной эрозии гребных винтов в случае мелких язвин (а) и крупных полостей (б):
1 — износостойкий слой; 2 — демпфирующий слой;
3 — грунтовка; 4 — ремонтный эпоксидный состав

Исследования очагов кавитационного износа на ГВ, проведенные на кафедре технологии судоремонта ГУМРФ [18], [19], показали, что основной механизм кавитационного воздействия на поверхность лопастей ГВ — удары струй (рис. 6), причем направленные под углом к поверхности лопасти ГВ. Диаметр струй составляет несколько миллиметров, а скорость достигает 600 м/с [19]. Ввиду таких больших диаметров и скоростей ударных струй маловероятно, что многослойная конструкция, приведенная на рис. 5, покажет хорошую долговечность в условиях эксплуатации ГВ: тонкий сравнительно жесткий слой 1, расположенный на существенно более податливом слое 2, не выдержит таких ударов. К таким необоснованным решениям можно отнести также применение наполнителей в составах, предназначенных для ремонта лопастей ГВ с очагами кавитационного износа.

а)



б)

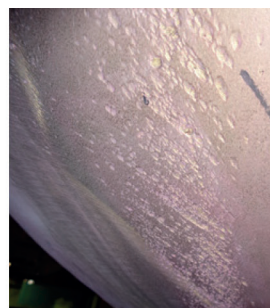


Рис. 6. Вмятины от кавитационных ударов на лопастях ГВ теплоходов Atlantic Runner (а) и «Ангара» (б)

Очевидно, что применение длиноволокнистых или листовых наполнителей делает ремонтный состав нетехнологичным, поэтому в составы для ремонта ГВ вводят только порошковые наполнители или наполнители в виде рубленого волокна. Например, из составов, указанных в таблице (с. 956), порошковый наполнитель (как правило, металлический) содержат: Belzona «Супер XI–Металл», Chester Metal Ceramic FSL, Devcon, Diamant Moglice и Weicon BR. Следствием того, что удар струй по поверхности лопасти при схлопывании кавитационной каверны происходит под углом к поверхности, скорость растекания струи $v_{рас}$ существенно превосходит скорость удара $v_{стр}^{10}$, при этом $v_{рас} = 2v_{стр} \dots 3v_{стр}$ (рис. 7).

Такие большие скорости позволяют за время существования парогазовой фазы, отсчитываемое от «вспышки» кавитации в момент прохождения лопасти в верхнем положении пика ахтерштевня до схлопывания кавитационной каверны при приближении лопасти к горизонтальному

¹⁰ Bowden, F. P. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds / F. P. Bowden, J. H. Brunton // Proceedings of the Royal Society, Series A. 1961. Vol. 263. Pp. 433–450.

положению, пройти расстояние S , составляющее нескольких сантиметров и более. Растекающиеся струи создают большие касательные напряжения на поверхности, а все дефекты на поверхности становятся потенциальными очагами кавитационного разрушения. К таким дефектам относятся не только границы A и B между материалом лопасти и ремонтным составом (см. рис. 7), но и границы между частицами порошкового наполнителя и полимерной матрицей, выходящие на поверхность.

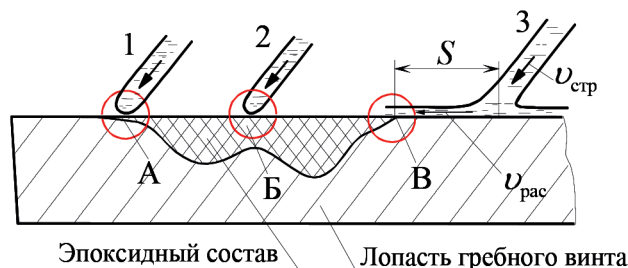


Рис. 7. Схема кавитационного воздействия на границу между полимером и металлом лопасти: 1, 2, 3 — ударные струи, образующиеся при схлопывании кавитационной каверны

Испытания составов Devcon Titanium Putty и Devcon Bronze Putty [20], содержащих титановый и бронзовый порошок, показали, что кавитационное разрушение происходит путем разрушения границ раздела и выламывания металлических частиц из полимерной матрицы. Аналогичный механизм разрушения зарегистрирован при испытании эпоксидного компаунда К-153 с добавкой порошка из алюминиевой бронзы [21]. Такое влияние порошкового наполнителя приводит к тому, что на кинетических кривых изнашивания эпоксидных составов с порошковым наполнителем отсутствует инкубационный период (рис. 8), который является важнейшим показателем кавитационной износостойкости применительно к материалам ГВ. Тот же состав К-153, но без добавления порошкового наполнителя изнашивается с выраженным инкубационным периодом (см. рис. 8).

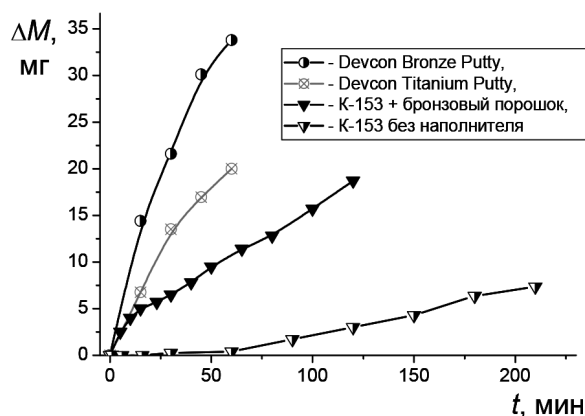


Рис. 8. Кинетические кривые кавитационного изнашивания эпоксидных компаундов с порошковым наполнителем и без него

Проведенный анализ показал, что не менее важное влияние, чем кавитационная износостойкость, на долговечность полимерного ремонтного состава в условиях эксплуатации ГВ оказывает адгезия полимера к материалу лопасти. Удовлетворительная кавитационная износостойкость ремонтного состава обеспечит его долговечность в районе B (см. рис. 7), однако при недостаточной адгезии разрушение начнется быстрее в районах A и B , и прежде, чем появится кавитационный износ в центральной части заделки, может произойти ее отслаивание в результате разрушения границ A и B и попадание воды между поверхностью лопасти и полимерной заделкой.

Разрушение покрытий отслаиванием подтверждается также опытом эксплуатации ГВ, отремонтированных с помощью эпоксидных компаундов, и это не случайно, так как эксперименты на адгезию показали, что предел прочности эпоксидного компаунда превышает прочность на отрыв компаунда от бронзовой поверхности практически в 30 раз [22]. Поэтому дальнейшие исследования по разработке технологии ремонта ГВ с применением полимерных составов должны быть направлены в первую очередь на обеспечение стойкости к кавитационному воздействию границ сопряжения ремонтного состава с лопастью, выходящих на поверхность, и повышению адгезии ремонтных составов к материалу ГВ. Если удастся решить эту проблему, то технология ремонта с применением полимерных составов будет постепенно вытеснять наплавку из практики ремонта ГВ.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Начиная с середины XX в. произошли кардинальные изменения в номенклатуре сплавов, применяемых для изготовления ГВ: на смену углеродистым сталям и латуням пришли алюминиевые бронзы и нержавеющие стали, что повлекло за собой изменение характера кавитационных повреждений лопастей и подходов к ремонту ГВ.

2. Очаги кавитационного износа на ГВ из алюминиевых бронз и нержавеющих сталей носят выраженный локальный характер, поэтому основной технологией ремонта в настоящее время является наплавка, позволяющая обеспечить локальное восстановление лопастей.

3. Несмотря на большой объем исследовательских работ, проведенных начиная с середины XX в. по разработке износостойких материалов для ремонта поврежденных при кавитации ГВ, не удалось создать износостойкий сплав, обладающий высокой технологичностью и коррозионной стойкостью.

4. Технологичность ремонтных материалов является в настоящее время основным критерием выбора ремонтного материала. В практике судоремонта приоритет отдают регулярному восстановлению качества поверхности лопастей, а не повышению ее износостойкости, поэтому наплавку производят, как правило, с использованием присадочных прутков, схожих по составу с материалом ГВ. Усилия в настоящее время направлены на разработку технологических методов повышения износостойкости наплавленного металла, таких как обработка трением с перемешиванием, обработка поверхностным пластическим деформированием и др.

5. На транспортных судах очаги повреждения ГВ возникают в основном в концевых сечениях лопастей, поэтому можно считать, что ремонт таких винтов путем нанесения полимерных составов является перспективным. Трудоемкость ремонта с использованием полимеров существенно ниже трудоемкости ремонта с применением наплавки; перечень подготовительных работ сведен к минимуму, и часто не требуется демонтаж ГВ.

6. Применяемые в настоящее время полимерные ремонтные составы и технологии разрабатываются без учета особенностей кавитационного воздействия на лопасти ГВ в эксплуатации. Поэтому некоторые решения представляются необоснованными, в частности это касается введения порошкового наполнителя в полимерные составы для ремонта ГВ.

7. Долговечность полимерного ремонтного состава в условиях кавитации ГВ определяется не только собственно кавитационной износостойкостью состава, но в не меньшей мере его адгезией к материалу лопасти. Из-за локального характера кавитационных повреждений на лопастях ГВ невозможно избежать появления на поверхности лопасти границы между полимерным составом, которым отремонтирован очаг кавитационного износа, и материалом лопасти. Эта граница является наиболее слабым местом, так как адгезия полимера к металлу более, чем на порядок ниже прочности самого полимера. По этой же причине использование порошкового наполнителя в полимерной матрице приводит к выходу границ между частицами наполнителя и полимерной матрицей на поверхность. Эти границы являются очагами кавитационного разрушения: изнашивание происходит путем выламывания частиц из полимерной матрицы, при этом процесс изнашивания идет без инкубационного периода. В то же время использование гомогенного полимерного

состава позволяет кардинально изменить кинетику изнашивания: появляется инкубационный период — важнейший показатель кавитационной износостойкости материалов ГВ.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают глубокую благодарность генеральному директору ЗАО «Канонерский судоремонтный завод» (Санкт-Петербург) Н. М. Вихрову и главному технологу ЗАО «Канонерский судоремонтный завод» Е. О. Горбаченко за возможность осмотра и анализа кавитационных повреждений гребных винтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустошный А. В. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / А. В. Пустошный, А. В. Сверчков, С. П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4(390). — С. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26. — EDN РТРСТР.
2. Gao, G. Cavitation erosion mechanism of 2Cr13 stainless steel / G. Gao, Zh. Zhang. // Wear. — 2022. — Vol. 488. — Pp. 204137. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204137.
3. Hattori S. Cavitation erosion resistance of plastics / S. Hattori, T. Itoh // Wear. — 2011. — Vol. 271. — Pp. 1103–1108. DOI:10.1016/j.wear.2011.05.012.
4. Yamatogi T. Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller / T. Yamatogi, H. Murayama, K. Uzawa, K. Kageyama, N. Watanabe // 17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland, 2009. — 10 p.
5. Koivuluoto H. High-pressure cold sprayed Ni and Ni-Cu coatings: improved structures and corrosion properties / H. Koivuluoto, A. Milanti, G. Bolelli, L. Lusvarghi, P. Vuoristo // Journal of Thermal Spray Technology. — 2014. — Vol. 23. — Is. 1–2. — Pp. 98–103. DOI: 10.1007/s11666-013-0016-7.
6. Jiang X. Microstructure, hardness and cavitation erosion resistance of different cold spray coatings on stainless steel 316 for hydropower applications / X. Jiang, N. Overman, C. Smith, K. Ross. // Materials Today Communications. — 2020. — Is. 25. — Pp. 1–27. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101305.
7. Bray M. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization / M. Bray, A. Cockburn, W. O'Neil // Surface and Coatings Technology. — 2009. — Vol. 203. — Pp. 2851–2857. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.135.
8. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
9. Li X. Y. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper–manganese–aluminum alloy weldment / X. Y. Li, Y. G. Yan, L. Ma, Z. M. Xu, J. G. Li // Materials Science and Engineering A. — 2004. — Vol. 382. — Pp.82–89. DOI:10.1016/j.msea.2004.04.032.
10. Lu X. An equivalent method of jet impact loading from collapsing near-wall acoustic bubbles: A preliminary study / X. Lu, Ch. Chen, K. Dong, Z. Li, J. Chen // Ultrasonics Sonochemistry. — 2021. — Vol. 79. — Pp. 105760. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105760.
11. Ahmad A. Refurbishing damaged surfaces of nickelaluminum bronze propellers: A robotic approach using gas metal arc welding and friction stir processing / A. Ahmad // Proceedings of 8th International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2020) AIP Conf. Proc. — 2021. — Vol. 2347. — Is. 1. — Pp. 020156–1–020156–10. DOI: 10.1063/5.0053484.
12. Bakshi D. A. Detailed Study on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing — A Review Paper / D. Bakshi, Ch. Prakash, S. Singh, R. Kumar, D. Ashri // International Journal of Industrial Engineering and Technology — 2014. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 1–22.
13. Muñoz-Cubillos J. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels / J. Muñoz-Cubillos, J. J. Coronado, S. A. Rodríguez // Wear. — 2019. — Vol. 428–429. — Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
14. Mesaa D. H. Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels / D. H. Mesaa, C. M. Garzón, A. P. Tschiptschin // Wear. — 2011. — Vol. 271. — Pp. 1372–1377. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.063.
15. da Cruz J. R. Effect of Cold Work on Cavitation Resistance of an Austenitic Stainless Steel Coating / J. R. da Cruz, S. L. Henkeb, A. S. Clímaco Monteiro d'Oliveir // Materials Research. — 2016. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1033–1041. DOI: 10.1590/1980–5373-MR-2015-0442.

16. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители. Модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2020. — 576 с.
17. Bolewski L. Cavitation erosion degradation of belzona coating / L. Bolewski, M. Szkodo, M. Kmiec's // *Advances in materials science*. — 2017. — Vol. 17. — Is. 1 (51). — Pp. 22–33. DOI: 10.1515/adms-2017-0002.
18. Цветков Ю. Н. Оценка диаметра струй воды, воздействующих на поверхность лопастей гребных винтов при кавитационном изнашивании / Ю. Н. Цветков, Я. О. Фиактистов, Е. О. Горбаченко // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2021. — № 1. — С. 54–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64. — EDN FZQUIH.
19. Tsvetkov Y. N. Analysis of the Geometry of Dents on a Propeller Blade Surface during Cavitation Wear / Y. N. Tsvetkov, E. O. Gorbachenko, Ya. O. Fiaktistov // *Journal of Friction and Wear*. — 2021. — Vol. 42. — Is. 1. — Pp. 17–22. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41.
20. Фиактистов Я. О. Кавитационная износостойкость полимерных составов с металлическим наполнителем / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков // 65-я международная научная конференция Астраханского государственного технического университета: материалы конференции, Астрахань, 26–30 апреля 2021 года. — Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2021. — С. 857–862. — EDN UFKKXH.
21. Фиактистов Я. О. Механизм разрушения эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем при кавитационном воздействии / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72. — EDN XAFIJI.
22. Цветков Ю. Н. Влияние добавки бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе / Ю. Н. Цветков, Н. М. Вихров, Я. О. Фиактистов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289. — EDN HOXLZE.

REFERENCES

1. Pustoshnyj, A. V., A. V. Sverchkov and S. P. Shevtsov “Vliyanie sherokhovatosti poverkhnosti grebnogo vinta na ego propulsivnye kharakteristiki.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 4(390) (2019): 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.
2. Gao, G and Zh. Zhang. “Cavitation erosion mechanism of 2Cr13 stainless steel” *Wear*. 488–489 (2022): 204137. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204137.
3. Hattori, S., T. Itoh “Cavitation erosion resistance of plastics”. *Wear* 271(2011): 1103–1108. DOI:10.1016/j.wear.2011.05.012.
4. Yamatogi, T., H. Murayama, K. Uzawa, K. Kageyama and N. Watanabe “Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller”. *17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, Scotland (2009):10.
5. Koivuluoto, H., A. Milanti, G. Bolelli, L. Lusvarghi, P. Vuoristo. “High-pressure cold sprayed Ni and Ni-Cu coatings: improved structures and corrosion properties”. *Journal of Thermal Spray TRechnology*. 23.1–2 (2014): 98–103. DOI: 10.1007/s11666-013-0016-7.
6. Jiang, X., N. Overman, C. Smith and K. Ross. “Microstructure, hardness and cavitation erosion resistance of different cold spray coatings on stainless steel 316 for hydropower applications” *Materials Today Communications*. 25 (2020): 1–27. DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.101305.
7. Bray, M., A. Cockburn and W. O’Neil. “The laser-assisted cold spray process and deposit characterization”. *Surface and Coatings Technology*. 203 (2009): 2851–2857. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.135.
8. Tsvetkov, Y. N. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
9. Li X. Y. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper–manganese–aluminum alloy weldment / X. Y. Li, Y. G. Yan, L. Ma, Z. M. Xu, J. G. Li // *Materials Science and Engineering A*. — 2004. — Vol. 382. — Pp. 82–89. DOI:10.1016/j.msea.2004.04.032.
10. Lu, X., Ch. Chen, K. Dong, Z. Li and J. Chen. “An equivalent method of jet impact loading from collapsing near-wall acoustic bubbles: A preliminary study”. *Ultrasonics Sonochemistry*. 79 (2021): 105760. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105760.
11. Ahmad, A. “Refurbishing damaged surfaces of nickelaluminum bronze propellers: A robotic approach using gas metal arc welding and friction stir processing”. *Proceedings of 8th International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2020) AIP Conf. Proc.* 2347 (2021): 020156–1–020156–10. DOI: 10.1063/5.0053484.

12. Bakshi, D., Ch. Prakash, S. Singh, R. Kumar and D. Ashri. “A Detailed Study on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing — A Review Paper”. *International Journal of Industrial Engineering and Technology* 4.1 (2014): 1–2.
13. Muñoz-Cubillos, J., J. J. Coronado and S. A. Rodríguez. “On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels”. *Wear* 428–429 (2019): 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
14. Mesaa, D. H., C. M. Garzón and A. P. Tschiptschin. “Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels”. *Wear* 271 (2011): 1372–1377. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.063.
15. da Cruza, J. R., S. L. Henkeb and A. S. Climaco Monteiro d’Oliveir “Effect of Cold Work on Cavitation Resistance of an Austenitic Stainless Steel Coating”. *Materials Research*. 19.5 (2016): 1033–1041. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0442.
16. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebneva and I. Y Kutergina. *Epoksidniye smoly, otverditeli. Modifikatory i svyazuyushiye na ih osnove*. SPb.: TsOP “Professiya”, 2020.
17. Bolewski, Ł., M. Szkodo and M. Kmiec. “Cavitation erosion degradation of belzona coating”. *Advances in materials science* 17.1(51) (2017): 22–33. DOI: 10.1515/adms-2017-0002.
18. Tsvetkov, Y. N., Y. O. Fiaktistov and E. O. Gorbachenko. “Otsenka diametra struy vody, vozdeystviy shih na poverhnost’ lopastey grebnyh vintov pri kavitatsionnom iznashivanii”. *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya* 1 (2021): 54–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64.
19. Tsvetkov, Y. N., E. O. Gorbachenko and Ya. O. Fiaktistov “Analysis of the Geometry of Dents on a Propeller Blade Surface during Cavitation Wear”. *Journal of Friction and Wear* 42.1 (2021): 17–22. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41.
20. Fiaktistov, Ya. O. and Yu. N. Tsvetkov Kavitatsionnaya iznosostojkost polimernykh sostavov s metallicheskim napolnitelem. Astrakhan: Astrakhanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021: 857–862.
21. Fiaktistov, Y. O., Y. N. Tsvetkov and N. S. Zaytseva. “Mehanizn razrusheniya epoksidnyh kompozitov s metallicheskim poroshkovym napolnitelem pri kavitatsionnom vozdeystvii” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.
22. Tsvetkov, Y. N., N. M. Vihrov and Y. O. Fiaktistov. “Vliyanie dobavki bronzovogo poroshka na adgeziyu epoksidnogo kompaunda k alyuminievoy bronzе” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289.

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, д. 5/7,
e-mail: yuritsvet@mail.ru
Баранов Сергей Геннадьевич —
старший преподаватель,
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: baranovsg@gumrf.ru
Фиактистов Ярослав Олегович —
старший преподаватель,
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

Information about the authors

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
doctor of science, professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping (SUMIS),
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yuritsvet@mail.ru
Baranov Sergey Genadiyevich —
senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: baranovsg@gumrf.ru
Fiaktistov Yaroslav Olegovich —
senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 октября 2024 г.
Received: Oct. 9, 2024.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE PROPERTIES OF MOTOR OILS ON THE LEVEL OF TORSIONAL VIBRATIONS OF THE SHAFT LINE OF THE YAROSLAVETS TYPE VESSEL

M. M. Gorbachev¹, V. G. Bukin¹, A. V. Vasiliev².

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation,

²Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

The article presents the results of an experimental study of the influence of motor oil properties on the level of torsional vibrations of the propeller shaft of a Yaroslavets-type vessel. The tests were carried out on mooring lines to create the maximum load on the 3D6 main engine using standard MS-20 motor oil and oil with copper additives. Torsional vibrations were measured using a certified verified strain gauge complex "Astech Electronics" (Great Britain) installed on the propeller shaft. The study found that the use of oil with copper additives and MS-20 oil does not significantly affect the amplitudes of torsional vibrations of the ship's propeller shaft in the range of crankshaft speeds of the 3D6 main engine from the minimum stable to nominal. It was found that during the start-up of the main engine with oil with copper additives, the level of torsional vibrations decreases, which requires research on more powerful marine diesel engines and an assessment of this effect. When using oil with copper additives, a reduction in the overall spectrum of harmonic component amplitude oscillations is achieved, which leads to a positive effect of reducing stress in the crankshaft and gearbox. Torsional vibrations in the elements of the machine-propulsion complex of a Yaroslavets-type vessel when used as a tug do not exceed the permissible values calculated according to the RCO rules, so additional measures to reduce them are not required. Additional experimental studies are needed to assess the effect of lubricating oil with copper additives on the vibroacoustic characteristics of marine diesel engines — vibration level and external noise.

Keywords: torsional vibrations, marine propulsion systems, marine propeller shaft, copper-added oil, strain gauge, diesel

For citation:

Gorbachev, Maksim M., V. G. Bukin and A. V. Vasiliev "Experimental study of the effect of the properties of motor oils on the level of torsional vibrations of the shaft line of the Yaroslavets type vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 964–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-964-973.

УДК 629.12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА УРОВЕНЬ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА СУДНА ТИПА «ЯРОСЛАВЕЦ»

М. М. Горбачев¹, В. Г. Букин¹, А. В. Васильев²

¹Астраханский государственный технический университет,

²Волгоградский государственный университет

В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния свойств моторных масел на уровень крутильных колебаний валопровода судна типа «Ярославец». Испытания производились на швартовах для создания максимальной нагрузки на главный двигатель 3Дб при использовании стандартного моторного масла МС-20 и масла с присадками меди. Измерение крутильных колебаний выполнялось при помощи сертифицированного поверенного тензометрического комплекса Astech Electronics (Великобритания), установленного на гребном валу. В результате исследования установлено, что применение масла с присадками меди и масла МС-20 не оказывает существенного влияния на амплитуды крутильных колебаний судового валопровода в диапазоне частот вращения коленчатого вала главного двигателя 3Дб от минимальной устойчивой до номинальной. Установлено, что в период пуска главного двигателя с маслом с присадками меди уровень крутильных колебаний снижается, что требует проведения исследований

на более мощных судовых дизелях и оценки данного эффекта. Отмечается, что при использовании масла с присадками меди достигается снижение в общем спектре колебаний амплитуд гармонических составляющих, что приводит к положительному эффекту снижения напряжений в коленчатом валу и редукторе. Крутильные колебания в элементах машинно-двигательного комплекса судна типа «Ярославец» при использовании его в качестве буксира не превышают допустимых значений, рассчитанных согласно правилам РКО, поэтому дополнительные меры для их снижения не требуются. Необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния смазочного масла с присадками меди на виброакустические характеристики судовых дизелей: уровень вибрации и внешний шум.

Ключевые слова: крутильные колебания, судовые машинно-двигательные комплексы, судовой валопровод, масло с присадками меди, тензометрирование, дизель.

Для цитирования:

Горбачев М. М. Экспериментальное исследование влияния свойств моторных масел на уровень крутильных колебаний валопровода судна типа «Ярославец» / М. М. Горбачев, В. Г. Букин, А. В. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 964–973. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-964-973.

Введение (Introduction)

Моторные масла в судовых дизелях выполняют несколько важных функций: снижают трение в трущихся деталях, охлаждают и очищают их от продуктов износа. На выполнение основных функций большое влияние оказывают качество масла и его состав, что в свою очередь отражается на решении дополнительных задач, таких как демпфирование колебаний (поперечных, продольных и крутильных). Для судовых дизелей наибольшую опасность представляют крутильные колебания, длительное воздействие которых приводит к усталостным разрушениям элементов судового машинно-двигательного комплекса: коленчатых, промежуточных и гребных валов, упругих муфт и т. д. Несмотря на предпринимаемые усилия со стороны инженеров и ученых, поломки гребных, промежуточных и коленчатых валов продолжают происходить, что приводит к большим затратам судовладельцев из-за незапланированного ремонта и простоя судов.

Снижение амплитуд крутильных колебаний осуществляется в судовом валопроводе по причине демпфирующих сопротивлений в виде работы трения в дизеле, демпфере крутильных колебаний, потоке воды при работе гребного винта, подшипниках валопровода и т. д. Одним из видов демпфирования крутильных колебаний в дизеле является жидкостное трение в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала и цилиндро-поршневой группе, которое обеспечивается в том числе смазочным маслом. Оценка влияния характеристик смазочного масла на снижение крутильных колебаний в установках с ДВС расчетными методами является достаточно сложной задачей. Поэтому как в ранних в данной области работах (Истомин П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС. — Л.: Судостроение, 1968. — 303 с., Бухарина Г. И. Демпфирование в поршневых двигателях при резонансных крутильных колебаниях. — Л.: Машиностроение, 1965), так и в современных изданиях (Гоц А. Н. Крутильные колебания коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие. — Владимир: Владимирский. гос. ун-т, 2008. — 199 с.), а также в исследованиях других специалистов отмечается, что демпфирование в трущихся парах ДВС с жидкостным трением зависит в большей степени от скорости перемещения деталей, при этом свойства смазочного масла не учитываются. Кроме того, можно выделить неоднозначность результатов исследований влияния смазочных масел на уровень крутильных колебаний в различных механизмах. Например, в исследовании [1] указано, что смазочное масло оказывает слабое влияние на снижение амплитуд крутильных колебаний в редукторных передачах. В результаты данные, приведенные в работе [2], свидетельствуют о существенном влиянии характеристик смазочных масел на уровень крутильных колебаний в червячных передачах.

В настоящее время моторные масла отличаются большим разнообразием присадок, включая инновационные на базе меди, которые, согласно ряду исследований, оказывают положительное влияние на работу двигателей внутреннего сгорания [3], [4], что приводит к необходимости проведения исследований влияния свойств масел на крутильные колебания в судовых дизелях.

Следует отметить, что практически все коэффициенты, учитывающие различные факторы, влияющие на уровень крутильных колебаний в двигательных установках, являются эмпирическими или полумпирическими [5]–[7], поэтому исследование было основано на ряде экспериментов, проведенных в натурных условиях на судне. Для исследований было использовано масло, рекомендованное техническим паспортом МС-20 и масло с присадками меди, по своим основным характеристикам соответствующее требованиям производителем дизеля 3Дб.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния свойств самозочного масла на крутильные колебания в энергетической установке судна «Ярославец».

Методы и материалы (Methods and Materials)

Судно типа «Ярославец» было выбрано в качестве объекта для исследований ввиду следующих причин:

- катера типа «Ярославец» с дизелями типа 3Дб до сих пор находятся в эксплуатации в качестве обслуживающих, снабжающих и прогулочных судов на внутренних путях в России;
- доступность установки на валовой линии элементов тензометрического комплекса «Астеч Электроникс» для измерения напряжений в валопроводе без необходимости перерасчета угловых перемещений вала и возникновения дополнительных погрешностей;
- повышенная оборотность дизеля 3Дб (до 1500 мин⁻¹) и работа в широком диапазоне частоты вращения с возможностью охвата большого количества режимов работы судна;
- отсутствие в составе валопровода устройств, снижающих крутильные колебания — демпфера и муфты, что приводит к росту влияния внутренних демпфирующих моментов и сопротивлений;
- на внутренних водных путях России имеется опыт и тенденция использования данных судов в качестве тяговых буксиров для паромных переправ и транспортировки барж, что приводит к изменению характера работы судового валопровода и действующих на него динамических нагрузок, включая крутильные колебания;
- авторский опыт исследования крутильных колебаний на данном судне [8].

В состав машинно-двигательного комплекса судна «РК-2091» входят: дизель 3Дб; реверс-редуктор; гребной вал; гребной винт фиксированного шага.

Дизель 3Дб имеет следующие технические характеристики:

- номинальная мощность 110 кВт (150 л. с.);
- число цилиндров — 6 шт.;
- номинальная частота вращения КВ — 1500 мин⁻¹;
- минимально-устойчивая частота вращения КВ — 500 мин⁻¹;
- диаметр цилиндра: 150 мм;
- ход поршня — 180 мм;
- удельный эффективный расход топлива — 240 г/(кВт·ч) ± 5 %.

Исследование производилось в несколько этапов:

Этап 1 — *расчет свободных крутильных колебаний*. Был выполнен расчет свободных крутильных колебаний валопровода судна «РК-2091» в последней модификации в соответствии с требованиями РКО и общепринятой методикой В. П. Терских и получены параметры основных форм колебаний: одноузловая валопроводная с частотой 1528 кол./мин (кол. — колебаний) и двухузловая моторная с частотой 9391 кол./мин. Далее были определены резонансные частоты вращения коленчатого вала главного двигателя для основных форм и гармонических порядков крутильных колебаний. Одноузловая форма (валопроводная форма): резонанс 3-го порядка — 510 мин⁻¹. Двухузловая форма (моторная форма): резонанс 9-го порядка — 1045 мин⁻¹; резонанс 12-го порядка — 785 мин⁻¹.

Этап 2 — *расчет допустимых напряжений от крутильных колебаний*. Допустимые напряжения от крутильных колебаний рассчитывались согласно Правилам Российского классификационного общества (РКО)¹. С учетом применения судна в качестве тягового буксира допустимые напряжения для гребного вала составляют 28,42 МПа, а для коленчатого вала дизеля — 28,31 МПа во всем диапазоне частот вращения.

¹ Российское классификационное общество. Правила классификации и постройки судов. М., 2019. — 1685 с.

Этап 3 — *измерение напряжений от суммарных крутильных колебаний*. Измерения крутильных колебаний производились при использовании двух видов моторного масла: с присадками меди и марки МС-20 (рекомендованного техническим паспортом дизеля 3Д6). Оценка амплитуд крутильных колебаний осуществлялась при помощи поверенного сертифицированного тензометрического комплекса Astech Electronics (Великобритания), используемого специалистами испытательного центра «MTS» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» при оценке крутильных колебаний на реальных судах [9], [10]. Переводной коэффициент для расчета напряжений в гребном валу для тензометрических резисторов 2ФКП5-400 был определен при помощи тарировки на стандартной балке равных перемещений СМ-25 и равен 0,023872 у. е./МПа. Трансмиттер с измерительными датчиками 1 был размещен на гребном валу, данные передавались при помощи радиосигнала на измерительный блок 3 и в ноутбук 2 с программным обеспечением Astech C-Range Logging Version 2.5.0.1825, размещенные на палубе (рис. 1).

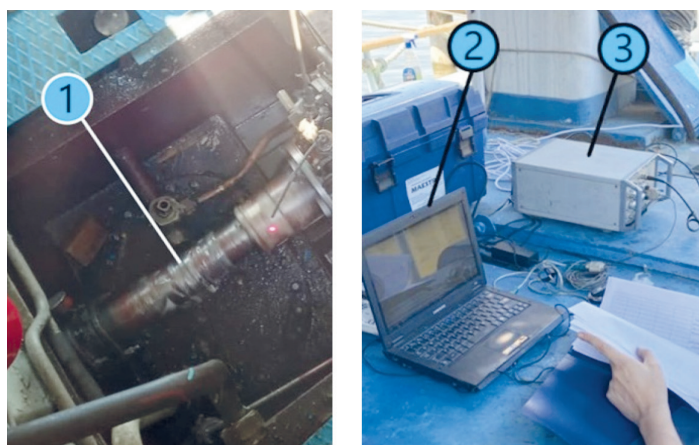


Рис. 1. Размещение оборудования для измерения крутильных колебаний

Измерения производились при испытаниях судна на швартовах для достижения максимальной нагрузки со ступенчатым повышением частоты вращения коленчатого вала дизеля от минимальной устойчивой до максимальной и дальнейшим постепенным снижением частоты вращения до минимальной.

Результаты (Results)

В итоге были получены тензограммы при использовании в дизеле масла МС-20 (рис. 2) и масла с присадками меди. Следует отметить рост амплитуд крутильных колебаний в начальной части тензограммы, поэтому на рис. 3 приведены участки с увеличенным масштабом графика при пуске.

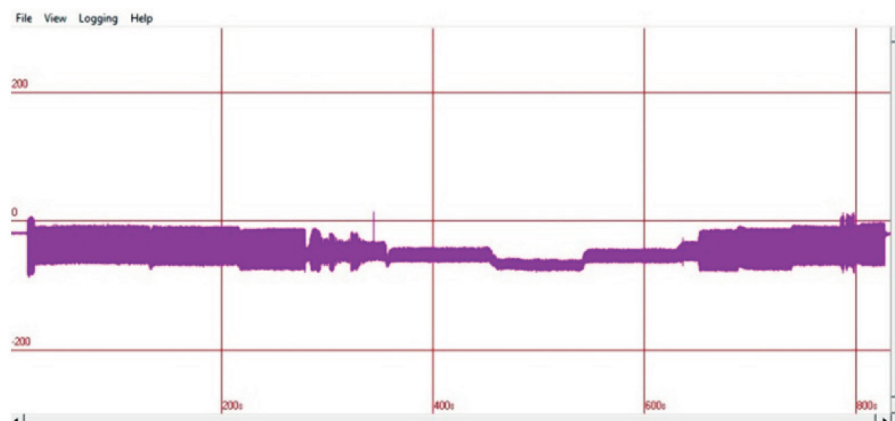


Рис. 2. Тензограмма при использовании в главном двигателе моторного масла МС-20

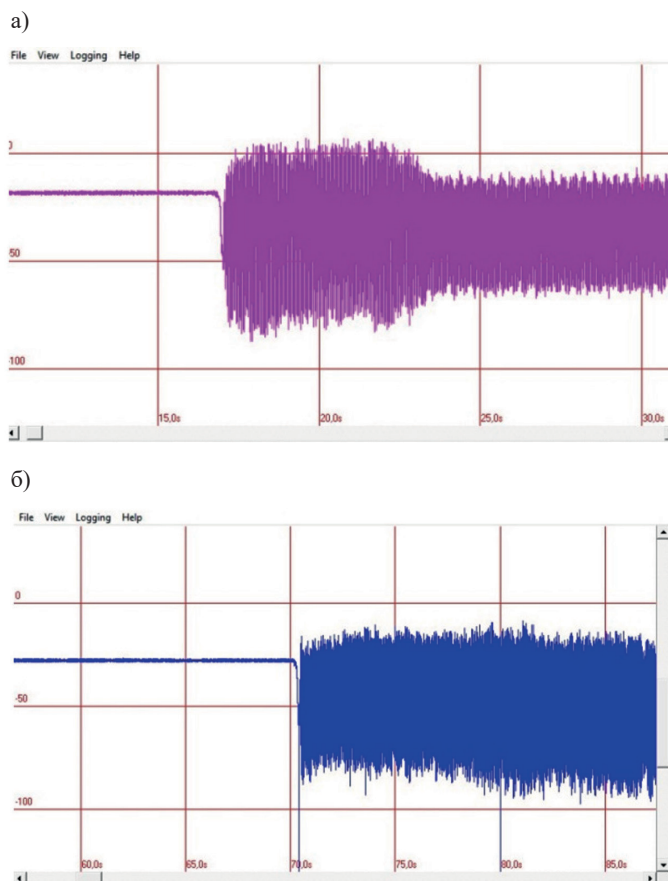


Рис. 3. Графики амплитуд крутильных колебаний при пуске дизеля:
а — на моторном масле МС-20; б — на моторном масле с присадками меди

Из рис. 3 видно, что при пуске дизеля на масле МС-20 (рис. 3, а) замечен скачок амплитуды крутильных колебаний, что требует дополнительного анализа тензограмм.

Обсуждение (Discussion)

Анализ напряжений, возникающих в гребном валу от крутильных колебаний. Для оценки влияния свойств смазочного масла на крутильные колебания был проведен анализ тензограммы с шагом частоты вращения 100 мин^{-1} с момента пуска до достижения максимальной частоты вращения коленчатого вала дизеля при швартовых испытаниях. В результате был получен график изменения напряжений в гребном валу от суммарных гармонических крутильных колебаний, возникающих при работе валопровода (рис. 4).

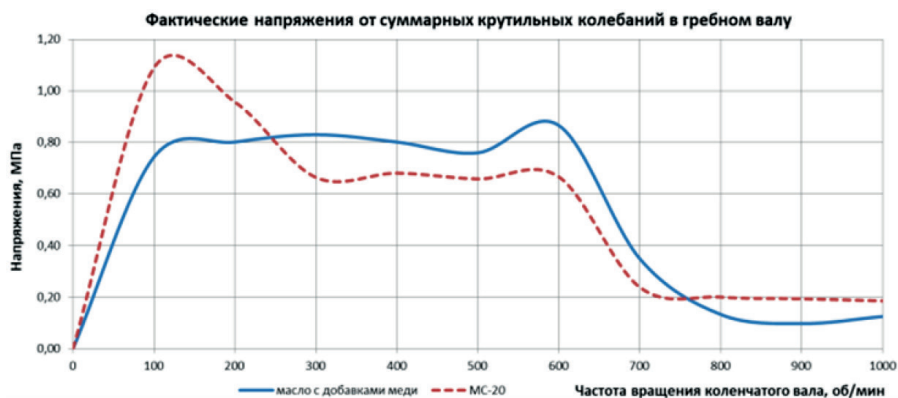


Рис. 4. График развития фактических напряжений от крутильных колебаний в гребном валу

Резонансные напряжения в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 500 до 600 мин⁻¹, хорошо заметные на графике (см. рис. 4), вызваны резонансом от валопроводной формы крутильных колебаний 3-го порядка. На резонансных частотах вращения коленчатого вала дизеля 785 и 1045 мин⁻¹ резонансные напряжения от моторной формы крутильных колебаний в гребном валу не проявляются. Характер развития крутильных колебаний и вызванных ими напряжений в гребном валу позволяет сделать вывод об идентичности как при работе на масле МС-20, так и на масле с присадками меди. Различие напряжений от крутильных колебаний можно отметить фактически только на первоначальном этапе набора частоты вращения, что, вероятно, связано с более легким пуском дизеля при работе на масле с присадками меди и требует проведения дальнейших исследований. Уровень крутильных колебаний в гребном валу ниже, чем нормы, рассчитанные по правилам РКО, даже с учетом работы разъездного катера в режиме тягового буксира на паромных переправах.

Анализ развития напряжений, возникающих в коленчатом валу дизеля от крутильных колебаний. Поскольку напряжения в гребном валу существенно ниже допустимых норм, необходимо выполнить анализ напряжений, возникающих в коленчатом валу дизеля. Для этого используется масштаб напряжений, определенный при расчете свободных колебаний. В результате для моторной формы колебаний 12-го порядка напряжения в коленчатом валу при использовании масла с присадками меди составили 17,73 МПа, а при использовании масла МС-20 — 17,26 МПа. Отличия незначительные, поэтому влияние смазочного масла с присадками меди на крутильные колебания заметно только в части их снижения при пуске дизеля.

Вейвлет-анализ тензограммы на этапе пуска дизеля. Поскольку в ранее проведенном анализе рассматривались только напряжения от суммарных крутильных колебаний, необходимо дополнительная оценка характера гармонических составляющих, которые влияют на развитие напряжений в отдельных составляющих машинно-двигательного комплекса: коленчатый вал, валы редукторной передачи, промежуточный вал и т. д. Был выполнен вейвлет-анализ тензограмм (на участке 1-го оборота), полученных на резонансной частоте вращения 510 мин⁻¹ валопроводной формы крутильных колебаний.

Вейвлет-анализ выполнялся при помощи материнской функции вейвлета Морле, как наиболее соответствующий поведению функции крутильных колебаний. Непрерывное вейвлет-преобразование функции сигнала $f(t)$ будет выражаться в виде представления сигнала в частотно-временной области по системе базисных функций:

$$W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где $W_{a,b}$ — матрица вейвлет-коэффициентов;

$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ — производные вейвлеты, полученные из материнского вейвлета $\psi(t)$ при помо-

щи изменения масштаба a и временного сдвига b .

Комплексный вейвлет Морле описывается формулой

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2)$$

где ω_0 — параметр, позволяющий манипулировать избирательностью базиса вейвлета.

Результаты анализа, выполненного в программном продукте Wolfram Mathematica, приведены на рис. 5 (соответственно при использовании масла МС-20 (рис. 5, а) и масла с присадками меди (рис. 5, б)). В верхней части рис. 5 приведены тензограммы (синий график) за один оборот и соответствующий график при обратном преобразовании вейвлет-функции (оранжевый график).

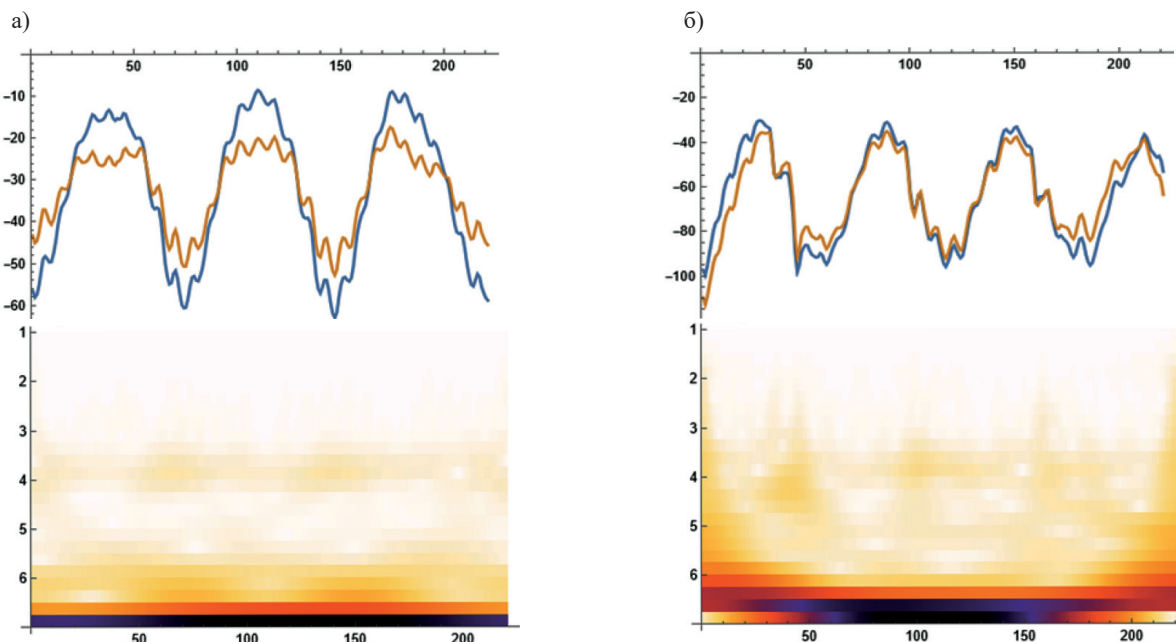


Рис. 5. Графики крутильных колебаний и скалограммы вейвлет-анализа тензограмм при частоте вращения 510 мин^{-1} : а — при использовании масла МС-20; б — при использовании масла с присадками меди

Как видно из рис. 6, при использовании масла МС-20 отклик функции крутильных колебаний является более равномерным, чем при использовании масла с присадками меди. Темные цвета соответствуют максимальным откликам функции, т. е. высокой интенсивности роста амплитуд крутильных колебаний. При использовании масла с присадками меди высокая интенсивность отклика сосредоточена в средней части тензограммы, что свидетельствует о проявлении гармонических составляющих крутильных колебаний в средней части в большей степени, чем на крайних участках торсиограмм. Тот же самый эффект, но уже с ослаблением гармонических амплитуд в средней части тензограммы при использовании масла с присадками меди проявляется при вейвлет-анализе торсиограммы на частоте вращения 785 мин^{-1} моторной формы (рис. 6).

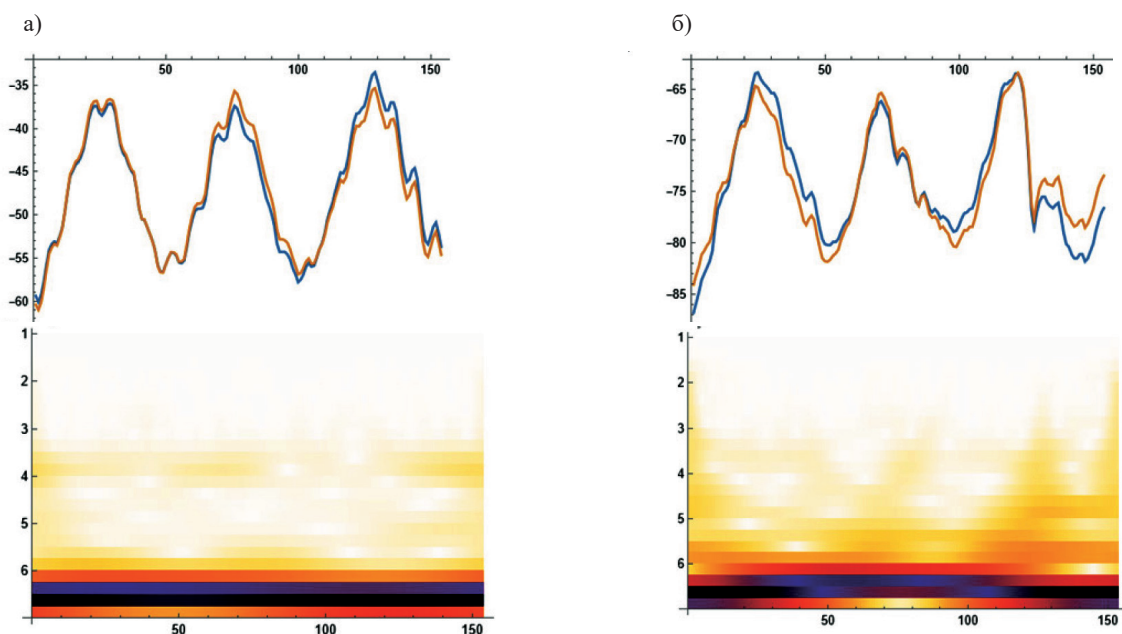


Рис. 6. Графики крутильных колебаний и скалограммы вейвлет-анализа тензограмм при частоте вращения 785 мин^{-1} : а — при использовании масла МС-20; б — при использовании масла с присадками меди

Таким образом, можно сделать вывод о снижении гармонических амплитуд крутильных колебаний при использовании масла с присадками меди, что положительно отразится на крутильных колебаниях в коленчатом валу и редукторе судовой установки.

Следует отметить, что применение смазочных масел различных видов может привести к снижению общего уровня вибрации и связанных колебаний судовой энергетической установки, проблема которых рассматривается в работах [11], [12].

Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение масел с присадками меди не оказывает существенного влияния на амплитуды крутильных колебаний судового валопровода в диапазоне частот вращения от минимальной устойчивой до номинальных. При пуске масло с присадками меди снижает уровень крутильных колебаний, что требует проведения исследований на более мощных судовых дизелях и количественной оценки данного эффекта.

2. При использовании масла с присадками меди достигается эффект снижения в общем спектре колебаний амплитуд гармонических составляющих, что приведет к положительному эффекту снижения напряжений в коленчатом валу и редукторе.

3. Крутильные колебания в элементах машинно-двигательного комплекса судна типа «Ярославец» не превышают допустимых значений, рассчитанных согласно Правилам РКО, поэтому дополнительные меры для их снижения не требуются.

4. Необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния смазочного масла с присадками меди на виброакустические характеристики судовых дизелей: уровень вибрации и внешний шум.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Д. В. Анализ влияния сил трения в зацеплении на динамические нагрузки в зубчатых передачах / Д. В. Калинин, Ю. М. Темис // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2018. — № 6(699). — С. 32–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43. — EDN XTUMUX.

2. Поляков С. А. Учет пленкообразующих и демпфирующих свойств смазочных материалов при проектировании червячных передач / С. А. Поляков, М. Н. Захаров, В. В. Лычагин [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2014. — № 12. — С. 96–106. DOI: 10.7463/1214.0747386. — EDN TEVFZR.

3. Ким С. Ч. Применение наночастиц меди в качестве добавки к смазочному маслу / С. Ч. Ким, В. П. Рева // Computational nanotechnology — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 23–25. — EDN ZBUCAX.

4. Якунина К. А. Механизм действия и повышение эффективности маслорастворимых противоизносных присадок: дис. ... канд. техн. наук / К. А. Якунина. — Челябинск, 2022. — 129 с. — EDN GZMBPB.

5. Ефремов Л. В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с. — EDN UBASSH.

6. Чистяков В. К. Динамика поршневых и комбинированных ДВС / В. К. Чистяков. — М.: Машиностроение, 1989. — 256 с.

7. Лашко В. А. Использование компьютерных технологий при расчетах крутильных колебаний в установках с двигателем внутреннего сгорания / В. А. Лашко, М. В. Лейбович // Математическое моделирование: сб. науч. тр. НИИ КТ. — Вып. 9. — Хабаровск: Хабар. гос. техн. ун-т, 1999. — С. 36–45.

8. Покусаев М. Н. Исследование крутильных колебаний машинно-двигательного комплекса развездного речного судна «РК-2091» пр. 376 / М. Н. Покусаев, В. А. Мамонтов, А. Р. Рубан [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–4(43). — С. 88–92. — EDN XCKQLH.

9. Мамонтов В. А. Экспериментальное исследование поперечных и крутильных колебаний валопроводов буксира типа ОТ-2400 / В. А. Мамонтов, А. Н. Глухов, М. М. Горбачев, Г. А. Кушнер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 46–47. — С. 86–88. — EDN WHMGOQ.

10. Сибряев К. О. Оценка технического состояния силиконовых демпферов крутильных колебаний машинно-двигательных комплексов судов / К. О. Сибряев, М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев, А. Д. Ибдуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 4. — С. 67–72. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-67-72. — EDN IELNHS.

11. Мартянов В. В. Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 / В. В. Мартянов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368. — EDN XPFCJV.

12. Мартянов В. В. Условия работы и возможные причины вибрации на прогулочных пассажирских судах под действием крутильных колебаний и поперечных колебаний / В. В. Мартянов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы 5-й межвузовской научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — С. 131–135.

REFERENCES

1. Kalinin, D. V. and Yu. M. Temis “Analiz vliyaniya sil treniya v zatseplenii na dinamicheskie nagruzki v zubchatykh peredachakh.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* 6(699) (2018): 32–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43.

2. Polyakov, S. A., M. N. Zakharov, V. V. Lychagin et al. “Uchet plenkoobrazuyushchikh i dempfiruyushchikh svoystv smazochnykh materialov pri proektirovanii chervyachnykh peredach.” *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman* 12 (2014): 96–106. DOI: 10.7463/1214.0747386.

3. Kim, S. Ch. and V. P. Reva “Primenenie nanochastits medi v kachestve dobavki k smazochnomu maslu.” *Computational nanotechnology* 6.1 (2019): 23–25.

4. Yakunina K. A. Mekhanizm deystviya i povyshenie effektivnosti maslorastvorimyykh protivoznosnykh prisadok. PhD diss. CHelyabinsk: 2022.

5. Efremov, L. V. *Teoriya i praktika issledovaniy krutilnykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem kompyuternykh tekhnologiy*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskaya izdatelsko-knigotorgovaya firma “Nauka”, 2007.

6. Chistyakov, V. K. *Dinamika porshnevnykh i kombinirovannykh DVS*. M: Mashinostroenie, 1989.

7. Lashko V. A., Lejbovich M. V. “Ispol’zovanie komp’yuternykh tekhnologiy pri raschetah krutil’nykh kolebaniy v ustanovkakh s dvigatelem vnutrennego sgoraniya.” *Matematicheskoe modelirovanie 9 Sb. nauch. tr. NII KT. Habar.*: Habar. gos. tekhn. un-t, 1999: 36–45.

8. Pokusaev, M. N., V. A. Mamontov and A. R. Ruban i dr. “Issledovanie krutilnykh kolebaniy mashinno-dvizhitelnogo kompleksa razezdnogo rechnogo sudna “RK-2091” proekta 376.” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 1–4(43) (2019): 88–92.

9. Mamontov, V. A., A. N. Glukhov, M. M. Gorbachev and G. A. Kushner “Eksperimentalnoe issledovanie poperechnykh i krutilnykh kolebaniy valoprovodov buksira tipa OT-2400.” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 46–47 (2017): 86–88.

10. Sibryaev, K. O., M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev and A. D. Ibadullaev “Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya silikonovykh dempferov krutilnykh kolebaniy mashinno-dvizhitelnykh kompleksov sudov.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 4 (2022): 67–72. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-67-72.

11. Martyanov, V. V. “Otsenka ugrozy vozniknoveniya rezonansnykh kolebaniy na primere rascheta krutilnykh kolebaniy sudovogo valoprovoda passazhirskogo teplokhoda pr. R118.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.

12. Mart’yanov, V. V. “Usloviya raboty i vozmozhnye prichiny vibratsii na progulochnykh passazhirskikh sudakh pod deistviem krutil’nykh kolebaniy i poperechnykh kolebaniy.” *Materialy 5-i mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF, 2014: 131–135.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбачев Максим Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16 e-mail: max9999_9@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorbachev, Maksim M. — assistant professor of the Department «Operation of Water Transport and Industrial Fishing», FSBEI HE «Astrakhan State Technical University», 414056, Russian Federation, Astrakhan, Tatishcheva, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

Букин Владимир Григорьевич —
доктор технических наук, профессор кафедры
«Теплоэнергетика и холодильные машины»,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,
414025, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: bukinvg@mail.ru

Васильев Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор кафедры
Информационной безопасности Волгоградский
государственный университет 400062,
Российская Федерация, г. Волгоград,
пр-т Университетский, 100
e-mail: vasilyev_a_v_59@mail.ru

Bukin, Vladimir G. —
Dr. Sci. (Eng)
Professor of the Department of Heat Power
Engineering and Refrigerating Machines
FSBEI HE «Astrakhan State
Technical University», 414056, Russian Federation,
Astrakhan, Tatishcheva, 16,
e-mail: bukinvg@mail.ru

Vasiliev, Aleksander V. —
Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of
Information Security,
Volgograd State University 400062,
Russian Federation, Volgograd,
Universitetskiy Avenue, 100,
e-mail: vasilyev_a_v_59@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2024 г.
Received: Nov. 14, 2024.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-974-982

DEVELOPMENT OF A TRAINING AND LABORATORY BENCH WITH A MARINE WATER HEATER

N. E. Stepanov, E. P. Karlina, T. V. Khomenko

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The article deals with the issues of design and construction of a laboratory stand of a ship boiler plant based on Kiturami TURBO-17 boiler, located in the laboratory "Ship Boiler and Steam Generating Plants" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State Technical University". The laboratory stand considered in the paper, made in accordance with the requirements of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW 78), was developed for scientific research and training of students. The article presents a comparative analysis of the laboratories of higher educational institutions, graduating specialists in the specialty 26.05.06 "Operation of ship power plants". The description of the main components of the stand including its circuit diagram is given. It is noted the importance of laboratory stands, which are close to the ship's performance, for the training of specialists. It is emphasized that this laboratory installation allows to conduct laboratory and practical classes aimed at providing students with theoretical knowledge and practical skills. It is noted that graduates should know the basic principles of operation and design elements of ship power plants, including boiler plants and their servicing systems, as well as have theoretical knowledge of thermodynamics, hydromechanics, be able to carry out calculations in thermal cycles, heat transfer processes, heat balance. The developed laboratory test bench can be used in the study of disciplines "Ship Boiler and Steam Generating Units", "Operation of Ship Boiler and Steam Generating Units", "Ship Auxiliary Mechanisms, Systems and Devices", "Automated Control Systems of Ship Power Plants", as well as for scientific research. The project on creation of the laboratory stand can be implemented for training of specialists in other specialized universities of the country.

Keywords: laboratory test bench, shipboard boiler plant, VLAP 78 competencies

For citation:

Stepanov, Nikita E., E. P. Karlina and T. V. Khomenko. "Development of a test laboratory stand with a marine hot-water boiler." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 974–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-974-982.

УДК 629.12

РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА С СУДОВЫМ ВОДОГРЕЙНЫМ КОТЛОМ

Н. Е. Степанов, Е. П. Карлина, Т. В. Хоменко

Астраханский государственный технический университет,
г. Астрахань, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы проектирования и конструирования лабораторного стенда судовой котельной установки на базе котла Kiturami TURBO-17, установленного в лаборатории «Судовые котельные и паропроизводящие установки» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Рассматриваемый в работе лабораторный стенд, выполненный согласно требованиям Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты ПДНВ-78¹, разра-

¹ Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несению вахты 1978 г. (с поправками 2011 года).

ботан для проведения научных исследований и обучения студентов. В статье приведен сравнительный анализ лабораторий высших учебных заведений, выпускающих специалистов по специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок». Приведено описание основных компонентов стенда, включая его принципиальную схему. Отмечается важное значение, которое имеют для подготовки специалистов лабораторные стенды, приближенные к судовому исполнению. Подчеркивается, что данная лабораторная установка позволяет проводить лабораторные и практические занятия, направленные на получение студентами теоретических знаний и практических навыков. Отмечается, что выпускники должны изучить основные принципы работы и элементы конструкции судовых энергетических установок, включая котельные установки и обслуживающие их системы, а также иметь теоретические знания по термодинамике, гидромеханике, уметь проводить расчеты в тепловых циклах, процессов теплоотдачи, теплового баланса. Разработанный испытательный лабораторный стенд может использоваться при изучении дисциплин «Судовые котельные и паропроизводящие установки», «Эксплуатация судовых котельных и паропроизводящих установок», «Судовые вспомогательные механизмы, системы и устройства», «Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками», а также для проведения научно-исследовательских работ. Проект по созданию лабораторного стенда может быть реализован для подготовки специалистов в других профильных вузах страны.

Ключевые слова: лабораторный испытательный стенд, судовая котельная установка, компетенции ПДНВ 78.

Для цитирования:

Степанов Н. Е. Разработка испытательного лабораторного стенда с судовым водогрейным котлом / Н. Е. Степанов, Е. П. Карлина, Т. В. Хоменко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 974–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-974-982.

Введение (Introduction)

Подготовка высококвалифицированных кадров, имеющих теоретическую базу знаний и практических навыков, является важнейшим звеном образовательной сферы. На основании требований Международной конвенции ПДНВ «О подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года с поправками» кандидат на получение диплома вахтенного механика должен обладать компетенциями в области технического использования судовых котельных установок, включая их эксплуатацию, обслуживание и ремонт. Для этого необходимо улучшение материально-технического обеспечения высших учебных заведений, создание лабораторий, стендов и установок. Лабораторные работы, проводимые на стендах, позволяют не только закрепить полученные знания в рамках изучения дисциплин, но и получить практический опыт по конструированию, запуску и возможным неисправностям котельных установок [1].

Студенты в лице будущих судомехаников, согласно требованиям изучаемых компетенций, должны обладать знаниями по подготовке, эксплуатации, обнаружению неисправностей и мер их предотвращения в судовых котельных установках и связанных с ними устройствах. Для этого в процессе освоения дисциплин «Судовые котельные и паропроизводящие установки» и «Эксплуатация судовых и паропроизводящих установок» конструкцию судовых котлов и их систем, выполняют расчет теплового баланса, а также изучают термодинамические процессы, наглядное изучение которых возможно при проведении лабораторных работ на испытательных лабораторных стендах.

Учебно-лабораторный стенд представляет собой натуральную модель объекта эксплуатации судового исполнения. К параметрам, подлежащим регулировке и контролю нормальной работы котельной установки, можно отнести: расход, температуру, давление, уровень. Основной целью работы является создание экспериментального стенда, приближенного к судовому исполнению. В лаборатории «Судовые котельные установки и автоматика» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (далее — ФГБОУ ВО «АГТУ») был разработан лабораторный стенд с котлом корейского производства Kiturami TURBO-17. Дизельный конвекционный котел серии Kiturami нашел широкое применение на флоте, в том числе в Каспийском бассейне. Данный котел имеет одобрение со стороны Российского Квалификационного Общества (РКО), полученное на основании результатов проверок и испытаний (Сертификат № 0508-8.1-0275-20).

Методы и материалы (Methods and Materials)

При разработке лабораторного стенда были изучены лаборатории котельных установок высших учебных заведений: ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», «Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского» и ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. В результате осмотра во время рабочей командировки 11 апреля 2024 г. в лаборатории ФГБОУ ВО «ВГУВТ» котельной установки на базе котлоагрегата КВС-200 (рис. 1) был сделан вывод о том, что данный лабораторный стенд является достаточно мощным, его КПД равен 90 %, однако запуск котла возможен в течение короткого промежутка времени ввиду отсутствия нагрузочного устройства.



Рис. 1. Экспериментальный стенд с котлоагрегатом КВС-200

В учебно-лабораторном комплексе кафедры «Судовые котельные, турбинные установки и вспомогательное энергетическое оборудование» «МГУ им. адм. Г. И. Невельского» установлен судовой автоматизированный паровой котел типа КАВ 1,6/5 с блоком автоматического управления БАУ. Для обеспечения эффективной работы котла применяются следующие системы: топливная, автоматического регулирования и подготовки питательной воды. В лаборатории «Судовые вспомогательные механизмы и котельные установки» ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова размещен имитатор судовой установки, а также топочные устройства типа «Монарх» и «Ойлон». Данные стенды предназначены для проведения испытаний студентами.

Для обучения студентов в ФГБОУ ВО «АГТУ» имеется уникальный тренажерный центр с имитацией машинного отделения ERS 5000 TechSim в составе e-Tutor 5000. Данное оборудование позволяет студентам отрабатывать навыки эксплуатации судовой энергетической установки и оценивать компетентность команды машинного отделения в соответствии с требованиями современных стандартов конвенционной подготовки [2].

Разработанный лабораторный стенд на кафедре «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство» ФГБОУ ВО «АГТУ» с судовым водогрейным котлом серии Kiturami позволяет получить студентам опыт по подготовке систем и выполнить запуск котла. Для получения практических навыков по эксплуатации и обслуживанию, а также изучения необходимых материалов по оснащению систем был выполнен осмотр судовых энергетических установок судов «СРБ1» (рис. 2) и «Абескун» (рис. 3), на которых применяются котлы Kiturami.



Рис. 2. Судно «СРБ1» Tanker IMO: 7036723²



Рис. 3. Судно «Абескун» Oil Products Tanker MMSI: 273383310³

Материалы, полученные при посещении судов, и изучение опыта других учебных заведений способствовали формированию конструкции разрабатываемого лабораторного стенда. Сборка стенда выполнена в соответствии с техническим заданием на рабочий проект лаборатории, разработанного проектным бюро ООО «КБ «Флотпроект» № ФП.ЛКУ.360000.001 ТЗ от 23.05.2019 г. Разработанный стенд представляет котельную установку, в основу которого входит судовой водогрейный котел Kiturami TURBO-17 (весогабаритные показатели 352 × 602 × 815 мм, масса 79 кг). КПД котла составляет 92,9 %, теплопроизводительность 19,7 кВт, рабочее давление создаваемое в системе питательной воды 2,5 бар с температурой на выходе 40 °С. Расход топлива данного котла составляет 2,15 кг/ч.

Котел располагается на фундаменте, в его состав входят: верхняя, нижняя крышка и передняя панель, образующие корпус котла. В конструкции котла предусмотрены входы и выходы двух контуров, один из которых предназначен для подачи теплоносителя в систему отопления, второй —

² СРБ-1. Проект 698, 698П, ПК698СКО. Водный транспорт.

³ Vessel Characteristics: Детали судна: ABESKUN (Oil Products Tanker). IMO 7036723MMSI 7036723Call Sign UETL. Зарегистрировано в Russia | AIS Marine Traffic.

для подогрева воды хозяйственно-бытовых нужд [3]. На передней панели котла расположен блок управления, к которому подключены датчики температуры, перегрева, низкого уровня воды. При появлении неисправностей во время эксплуатации котла: срыва пламени, температуры внутри котла, уровня воды в котле [4], сигнал с датчиков поступает в блок автоматической системы управления, которая останавливает котел. Общий вид лабораторного стенда приведен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид лабораторного стенда с котлом Kiturami TURBO-17

Процесс горения осуществляется с помощью турбоциклонной горелки, работающей на дизельном топливе. Конструкция топливной горелки подразумевает двойной дожиг топлива, что способствует процессу полного сгорания топлива.

Результаты (Results)

Подготовка студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» должна проводиться в соответствии с требованиями Международной конвенции ПДНВ-78. Тренажерное оборудование машинного отделения должно быть способно имитировать систему главных и вспомогательных механизмов и включать устройство котла. Студенты должны знать конструкцию котла и связанные с ним системы, а также вспомогательные механизмы. Так, на лабораторном стенде эффективность и безопасность работы котла осуществляется посредством обслуживающих его систем [5]. Принципиальная схема, выполненная согласно ГОСТ Р 58881–2020, приведена на рис. 5.

Основным элементом данного стенда является котел, работающий на дизельном топливе. Топливная система предназначена для подготовки и подачи топлива непосредственно в топку котла. Конструкция топливной системы предусматривает два варианта подачи топлива: топливо заполняется в цистерну основного запаса 3 за счет создания разрежения топливным насосом 10, топливо подается через топливный фильтр 9 к форсунке 1 или передачи топлива из цистерны основного запаса в расходную цистерну 2 и затем к форсунке котла через топливный фильтр. Дыхательный клапан 5 предназначен для уменьшения объемов испарения топлива в процессе хранения. Теплоноситель через трубопровод 10Т за счет циркуляционного насоса 8 поступает из цистерны питательной воды 4 на тепловодяной вентилятор 6, система замкнута. Для предотвращения разрыва трубопровода из-за создаваемого в контуре давления в системе находится расширительный бак 7.

Контур горячей воды, поступающей по трубопроводу 1Г, проходит через теплообменник, и горячая вода направляется к потребителям. На стенде данный контур не используется. Отработавшие газы, полученные в результате сгорания топлива, направляются через трубопровод 29 в атмосферу. В системе газовыпускного тракта установлен штатный термометр, предназначенный для измерения температура газов на выходе [6].

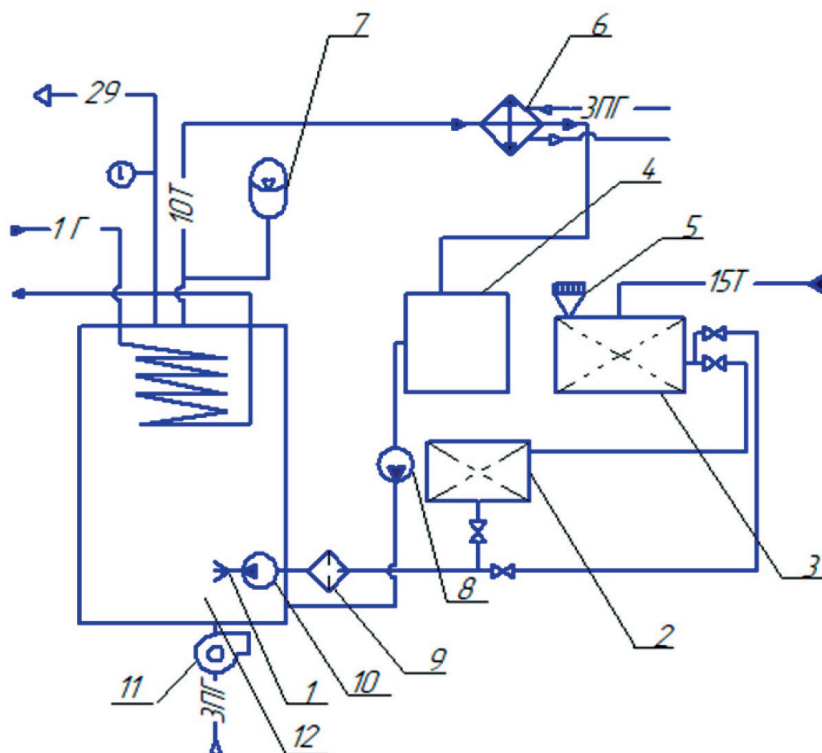


Рис. 5. Принципиальная схема испытательного лабораторного стенда⁴:
1 — топливная форсунка; 2 — расходная топливная цистерна;
3 — цистерна основного запаса топлива; 4 — цистерна питательной воды;
5 — дыхательный клапан; 6 — тепловодяной вентилятор;
7 — расширительный бак; 8 — насос питательной воды;
9 — топливный фильтр; 10 — топливный плунжерный насос;
11 — вентилятор; 12 — котел Kiturami TURBO-17

В качестве нагрузочного устройства был выбран тепловентилятор Ballu BHP-W4-15-S HC, предназначенный для отбора тепла водяного контура котла. Теплоноситель охлаждается в радиаторе тепловентилятора за счет создаваемого потока воздуха со стороны вентилятора охлаждения [7].

На сегодняшний день, готовы материалы к лабораторной работе для студентов направления подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» на тему «Изучение конструкции судового котла KITURAMI TURBO 17⁵ и его эксплуатация» по дисциплине «Эксплуатация судовых котельных и паропроизводящих установок». Для проведения лабораторной работы «Тепловой расчет судового котла KITURAMI TURBO 17» стенд оснащен датчиками давления, температуры, расхода [8].

Также для получения студентами навыков, связанных с подготовкой котловой и питательной воды, система контроля качества питательной воды с определением параметров: водородный показатель pH, прозрачность, щелочность, температура [9].

⁴ ГОСТ Р 58881–2020. Обозначения условные графические в схемах судовых систем и систем энергетических установках. Изд. офиц. М.: Стандартинформ, 2020.

⁵ Паспорт котла. Судовой водогрейный котел двухконтурный для дизельного топлива. https://kiturami.nt-rt.ru/images/manuals/2kiturami_turbo_rukovodstvo.pdf.

Обсуждение (Discussion)

Представленный в работе испытательный лабораторный стенд с судовым водогрейным котлом является перспективной формой приобретения практических навыков в процессе подготовки высококвалифицированных кадров в области эксплуатации и обслуживания судовых энергетических установок, а также вспомогательных механизмов, систем и устройств. Проведение лабораторных испытаний позволяет отработать со студентами ряд компетенций по изучению конструкции, порядка запуска судовой котельной установки, проведении теплового расчета. Дальнейшее развитие лабораторного стенда можно осуществлять за счет усовершенствования конструкции и оснащения его контрольно-измерительными приборами с выводением параметров на индикаторную панель управления [10]. В рамках проведения научно-исследовательских работ можно рассмотреть направление в области «зеленой повестки», подразумевающее модернизацию топливной системы и запуск котла на альтернативных видах топлива для приведения к нулевому выбросу углерода [11], [12].

Заключение (Conclusion)

Разработка испытательного лабораторного стенда с судовым водогрейным котлом представляет собой важный шаг в подготовке специалистов в области судовых энергетических установок. Данный стенд, в отличие от установленных в других вузах, имеет малые весогабаритные показатели, портативный, его можно переместить без затруднений в другую лабораторию. Данный лабораторный стенд позволяет студентам ознакомиться с конструкцией и эксплуатационными характеристиками, а также способствует углубленному пониманию термодинамических процессов и систем теплообмена. В дальнейшем планируется оснащение стенда современными датчиками контроля температуры, давления контура теплоносителя газовойпускного тракта. Кроме того, предполагается использование испытательного лабораторного стенда для исследования работы котла на альтернативных видах топлива, сравнение полученных характеристик и проведение оценки эмиссии состава отработавших газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суменков В. М.* Результаты оптимизационного проектирования судовых котельных установок / В. М. Суменков, Л. И. Сень // Судостроение. — 2010. — № 1(788). — С. 12–44. — EDN LABWDH.
2. *Бурков Д. Е.* Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования / Д. Е. Бурков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902. — EDN PTAFT.
3. *Ведрученко В. Р.* Разработка схем и выбор энергосберегающих технологий при проектировании и эксплуатации отопительных котельных / В. Р. Ведрученко, А. Ю. Финиченко, М. В. Глухова [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. — 2022. — № 5(139). — С. 19–22. — EDN GYXJJP.
4. *Чичурин А. Г.* Надежность котельной установки судна / А. Г. Чичурин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 37. — С. 179–183. — EDN TFYMFJ.
5. *Даниловский А. Г.* Анализ методов повышения эффективности судовой вспомогательной котельной установки / А. Г. Даниловский, А. А. Иванченко, Мью Чжо Ту // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 87–94. — EDN PCREIN.
6. *Бразновский В. К.* Анализ качества эксплуатации вспомогательных котельных установок судов флота рыбной промышленности / В. К. Бразновский, В. Т. Томилко // Балтийский морской форум: материалы VI Международного Балтийского морского форума, в 6 т., Калининград, 03–06 сентября 2018 года. — Т. 2. — Калининград, 2018 — С. 262–268. — EDN YWCKRN.
7. *Архипов Г. А.* Повышение тепловой экономичности судовой вспомогательной котельной установки / Г. А. Архипов, А. Г. Даниловский, П. А. Пьяэ // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, 11–15 апреля 2016 года. — СПб., 2016. — С. 21–30. — EDN WNMKQV.
8. *Вышегородский С. В.* Новая методология оперативного контроля водно-химического режима судовых котельных установок и средства его обеспечения / С. В. Вышегородский, В. М. Пчелинцев // Труды Цен-

трального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2005. — № 22(306). — С. 63–74. — EDN JKGWIJ.

9. Марков В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов, В. Г. Кислов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 376 с.

10. Беляев И. Г. Автоматизация процессов в судовой энергетике: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Н. Слесаренко / И. Г. Беляев, В. И. Седых, В. Н. Слесаренко. — М.: Транспорт, 2000. — 395 с.

11. Данилов В. С. Оценка эффективности различных схем утилизации тепла в судовых дизельных установках / В. С. Данилов // Двигателестроение. — 1984. — № 9. — С. 12–15.

12. Панасенко А. А. Повышение тепловой эффективности рабочих процессов в котельных установках / А. А. Панасенко, В. Н. Слесаренко // Повышение надежности судового оборудования: сб. науч. тр. / Отв. ред. Л. Б. Леонтьев. — Владивосток: МГУ, 2002. — С. 105–109.

REFERENCES

1. Sumenkov, V. M. and L. I. Sen «Rezultaty optimizatsionnogo proektirovaniya sudovykh kotelnykh ustanovok.» *Sudostroenie* 1(788) (2010): 12–44.

2. Burkov, D. E. “Primenenie sudovoy informatsionnoy sistemy dlya kontrolya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo oborudovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.5 (2023): 893–902. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902.

3. Vedruchenko, V. R., A. Yu. Finichenko and M. V. Glukhova et al. “Razrabotka skhem i vybor energosberegayushchikh tekhnologiy pri proektirovanii i ekspluatatsii otopitelnykh kotelnykh.” *Energoberezhenie i vodoraznaya podgotovka* 5(139) (2022): 19–22.

4. Chichurin, A. G. “Nadezhnost kotelnoy ustanovki sudna.” *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 37 (2013): 179–183.

5. Danilovskij, A. G., A. A. Ivanchenko and Mo Chzho Tu “Analiz metodov povysheniya effektivnosti sudovoy vspomogatelnoy kotelnoy ustanovki.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsij* 3 (2012): 87–94.

6. Braznovskij, V. K. and V. T. Tomilko “Analiz kachestva ekspluatatsii vspomogatelnykh kotelnykh ustanovok sudov flota rybnoj promyshlennosti.” *Baltiyskij morskoy forum: materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma, v 6 tomakh, Kaliningrad, 03–06 sentyabrya 2018 goda. Tom 2.* Kaliningrad: Kaliningradskij gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2018: 262–268.

7. Arkhipov, G. A., A. G. Danilovskij and P. A. Pyae «Povyshenie teplovoj ekonomichnosti sudovoy vspomogatelnoy kotelnoy ustanovki.» *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova: Sbornik nauchnykh statej, Sankt-Peterburg, 11–15 aprelya 2016 goda.* Sankt-Peterburg: Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2016: 21–30.

8. Vyshegorodskij, S. V. and V. M. Pchelintsev «Novaya metodologiya operativnogo kontrolya vodno-khimicheskogo rezhima sudovykh kotelnykh ustanovok i sredstva ego obespecheniya.» *Trudy Tsentralnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A. N. Krylova* 22(306) (2005): 63–74.

9. Markov, V. A. P. M. Bashirov, I. I. Gabitov and V. G. Kislov *Toxicity of diesel engines exhaust gases.* 2nd edition, revision and supplement. M.: Bauman MSTU Publishing House, 2002.

10. Belyaev, I. G., V. I. Sedykh and V. N. Slesarenko *Automation of processes in ship power engineering. Textbook for higher educational institutions.* Edited by Slesarenko V. N. Moscow: Transport, 2000.

11. Danilov, B. C. “Ocenka effektivnosti razlichnykh skhem utilizatsii tepla v sudovykh dizel'nykh ustanovkah.” *Engine-building* 9 (1984): 12–15.

12. Panasenko, A. A. and V. N. Slesarenko “Increase of thermal efficiency of working processes in boiler installations.” *Increase of ship equipment reliability: Collection of scientific articles. Marine State University* Edited by L. B. Leontiev. Vladivostok: MSU, 2002: 105–109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанов Никита Евгеньевич — ассистент кафедры «Эксплуатация водного транспорта и промышленное рыболовство», Астраханский государственный технический университет e-mail: nikita342.st@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepanov Nikita E. — Assistant of the Department “Operation of water transport and industrial fishery”, Astrakhan State Technical University. e-mail: nikita342.st@gmail.com

Карлина Елена Прокофьевна —

доктор экономических наук; профессор кафедры
«Производственный менеджмент», Астраханский
государственный технический университет
e-mail: e_karlina@list.ru

Хоменко Татьяна Владимировна —

доктор технических наук, профессор кафедры
«Высшая и прикладная математика»,
Астраханский государственный
технический университет
e-mail: t_v_khomenko@mail.ru

Karlina Elena Prokofievna —

Doctor of Economics; Professor of the Department
of Production Management,
Astrakhan State Technical University
e-mail: e_karlina@list.ru

Khomenko Tatyana Vladimirovna —

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Higher
and Applied Mathematics,
Astrakhan State Technical University.
e-mail: t_v_khomenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2024 г.

Received: Oct. 29, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-983-991

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE PROPERTIES OF MOTOR OILS ON THE VIBRATION AND NOISE LEVELS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

K. E. Khmel'nitsky, O. P. Kovalev, V. P. Bulgakov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of the effect of the properties of domestic engine oils with copper-based additives produced by Kupper on the vibration and noise levels of marine propulsion systems using the example of a 3D6 diesel engine. 3D6 diesels are representatives that widely cover both the transport and marine sectors of power plants, which explains their choice as an object of research. Increased noise and vibration levels on ships negatively affect crew members and passengers and lead to fatigue and distraction of the watchmen. The engine oil used was standard MS-20 oil, which is used for high-speed marine diesel engines and an innovative oil with copper-based additives. Comparative measurements of vibration and noise were carried out on a Yaroslavets-class vessel using an authorized vibration and noise meter of the first class Ecophysics-110A. As a result of the study, it was found that vibrations in the most vibro-active modes of operation of the 3D6 diesel engine are reduced by 30–50 % when using oil with copper-based additives. The use of oil with copper-based additives also has an effect on reducing noise in the engine room, but in the high-frequency spectrum with a frequency of more than 1000 Hz. More effectively, engine oil with copper-based additives affects the reduction of the overall noise level in the wheelhouse of the vessel and as a result, an effect of about 3 dB was achieved, which reduces the effect of noise by 1.4 times in terms of physical perception for humans.

Keywords: internal combustion engine, engine oil, copper additives, vibration, noise

For citation:

Khmel'nitsky, Konstantin, O. P. Kovalev and V. P. Bulgakov “Experimental study of the effect of the properties of motor oils on the vibration and noise levels of internal combustion engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 983–991. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-983-991.

УДК 629.12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА УРОВЕНЬ ВИБРАЦИИ И ШУМА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

К. Е. Хмельницкий, О. П. Ковалев, В. П. Булгаков

Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация

В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния свойств отечественных моторных масел с присадками на основе меди, выпускаемых компанией Куппер, на уровень вибрации и шума судовых двигательных установок на примере дизеля 3Д6. Выбор этих дизелей в качестве объекта исследования объясняется тем, что они являются частью транспортного и судового секторов энергетических установок. Отмечается, что повышенный уровень шума и вибрации на судах оказывает негативное влияние на членов экипажа и пассажиров и приводит к возникновению усталости и рассеиванию внимания вахтенных. В исследовании в качестве моторного масла использовалось стандартное масло МС-20, применяемое для высокооборотных судовых дизелей, и инновационное масло с присадками на основе меди. Сравнительные измерения вибрации и шума выполнялись на судне типа «Ярославец» при помощи поверенного вибромметра-шумомера первого класса «Экофизика-110А». В результате проведенного исследования было установлено, что вибрации на наиболее виброактивных режимах работы дизеля 3Д6 снижаются на 30–50 % при использовании масла с присадками на основе меди. Кроме того, использование масла с присадками на основе меди также оказывает влияние на снижение шума в машинном отделении,

но только в высокочастотном спектре с частотой более 1000 Гц. Результат наиболее эффективного влияния моторного масла с присадками на основе меди на снижение общего уровня шума в рулевой рубке судна составил порядка 3 дБ, что по физическому восприятию для человека снижает влияние шума в 1,4 раза.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, моторное масло, присадки меди, вибрация, шум, дизель-генераторы, ударные нагрузки.

Для цитирования:

Хмельницкий К. Е. Экспериментальное исследование влияния свойств моторных масел на уровень вибрации и шума двигателей внутреннего сгорания / К. Е. Хмельницкий, О. П. Ковалев, В. П. Булгаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 983–991. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-983-991.

Введение (Introduction)

Моторные масла в настоящее время выпускаются в широком ассортименте и в большинстве случаев отличаются набором присадок, которые оказывают влияние на антифрикционные, антипенные, окислительные, вязкостные и другие свойства масел. Немаловажную роль для транспортных дизелей играет способность масел снижать ударные нагрузки в деталях дизелей, а соответственно, вибрации и шум, которые определяют как технические, так и экологические характеристики судовых дизелей. Наиболее часто вопросы снижения шума и вибрации при помощи присадок для моторных масел исследуются для автомобильных двигателей [1]–[3], однако для судовых двигателей, на наш взгляд, проблема снижения шума и вибрации играет также большую роль.

Согласно проведенным исследованиям авторов [4], [5], шум в машинном отделении современных судов достигает 90 дБа, что выше допустимых норм 85 дБа и требует работы судовых механиков в защитных наушниках, что снижает внимание человека и оказывает влияние на принятие оперативных решений. Одним из направлений снижения вибрации и шума является применение смазочных масел, позволяющих уменьшить удары в сочленениях деталей цилиндро-поршневой группы дизелей. Проведенные авторами данной работы практические измерения уровней вибрации судовых дизелей отечественного и зарубежного производства MAN 12V175D (Германия, мощность 1740 кВт), MAN D2676 LE322 (Германия, 280 кВт), ЯМЗ-238Б (Россия, 220 кВт), Д-243 (Белоруссия, 57 кВт) и других показали, что уровень вибрации небольших по мощности и габаритам дизелей зачастую превышает нормы, установленные правилами классификационных обществ: Российского морского регистра судоходства (РМРС) и Российского классификационного общества (РКО) в большей степени, чем мощные двигатели. Также год производства дизелей оказывает незначительное влияние на уровень их вибрации и снижение вибрации — это задача непростая, связанная с разработкой технических мер, среди которых чаще всего применяется установка дизелей на амортизационных устройствах, центровка валопровода, балансировка и другие, которые снижают, но не устраняют вибрацию полностью.

В процессе работы были проведены исследования, связанные с влиянием характеристик смазочных масел на увеличение частоты вращения подвесных лодочных моторов маломерных судов [6], которые показали, что при использовании моторного масла с присадками меди уменьшается неравномерность частоты вращения коленчатого вала, что может свидетельствовать об уменьшении трения, возникающего в подвижных сочленениях двигателей и редукторов, что приводит к снижению уровня шума и вибрации.

Влияние различных факторов, включая свойства смазочных масел, на виброакустические характеристики энергетического оборудования рассматривалось в источниках [7]–[10], но разнообразие агрегатов и механизмов, применяемых в технике, не позволяет выявить общие зависимости параметров вибрации от видов масел, поэтому исследования проводятся для каждого вида энергетического оборудования индивидуально.

Был проведен ряд измерений вибрации модернизированных судовых дизель-генераторов с новыми дизелями Д-243, устанавливаемыми на плавкранах, речных буксирах типа РТ и других судах под надзором РКО вместо дизелей 4ЧН11/12.5. В результате было определено, что для новых

дизелей Д-243 характерны превышения норм по виброскорости (мм/с) в верхней части (на цилиндровой крышке) на частотах 25, 50, 100 Гц. Характерно, что нормы РКО для категории А (новое оборудование или после ремонта) превышены в среднем до 25 %. Можно предположить, что повышенные вибрации возникает от недостаточной приработанности деталей цилиндро-поршневой группы и газораспределительного механизма дизелей на стадии обкатки и могут быть снижены при помощи применения инновационных масел.

Необходимо отметить, что в настоящее время для проведения анализа результатов виброакустических исследований часто используются методы вейвлет-анализа и применение нейронных сетей, которые могут выявить особенности развития вибрации в ДВС при влиянии на них неучитываемых в традиционной виброакустике параметров, включая демпфирующие свойства масел [11], [12].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для оценки влияния сорта смазочного масла на вибрацию и шум стационарного судового двигателя был выбран дизель 3Д6 (6Ч15/18), являющийся главным двигателем на судне «РК-2091», в состав одновального машинно-двигательного комплекса которого входят: дизель 3Д6, реверс-редуктор, гребной вал, гребной винт фиксированного шага. Дизель 3Д6 имеет номинальную мощность 110 кВт (150 л. с.) при номинальной частоте вращения КВ 1500 мин⁻¹.

В качестве измерительного оборудования был использован поверенный шумомер-вибромметр первого класса «Экофизика-110А», занесенный в Госреестр СИ РФ и используемый при проведении виброакустических измерений в лаборатории и на реальных судах.

Характеристики вибромметра «Экофизика-110А»:

- трехканальный вибромметр, шумомер, анализатор спектра, предназначенный для оценки вибрации и шума;
- регистрационный номер в Госреестре средств измерения РФ: 48906–12;
- прибор соответствует требованиям ГОСТ ИСО 8041–2006, ГОСТ 12.1.012–2004, ГОСТ 31192.1–2004, ГОСТ 31191.1–2004, ГОСТ 31191.2–2004;
- изготовитель вибромметра: ООО «ПКФ Цифровые приборы» (г. Москва);
- заводской номер: БФ180629;

Для проверки необходимости дополнительной калибровки вибромметра использовано устройство воспроизведения вибрации КВ-160 и устройство для воспроизведения звука АК-1000. Также было использовано программное обеспечение для обработки вибросигналов Signal+ 3G Light (входит в комплект вибромметра «Экофизика-110А»). Измерительная аппаратура позволяет производить идентификацию каждого конкретного измерения.

Для оценки вибрации (виброскорости, мм/с) верхней части дизеля использовалась схема размещения измерительных точек (№ 1–4), приведенная на рис. 1 согласно Правилам РКО.

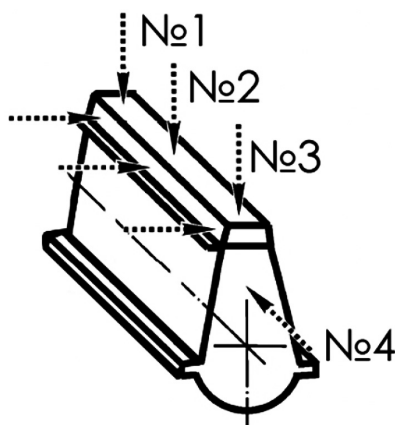


Рис. 1. Схема размещения измерительных точек на двигателе

Эксперимент выполнялся в следующем порядке:

1. Замер вибрации и шума при эксплуатации двигателя на стандартном моторном масле МС- 20, рекомендованного для использования инструкцией по эксплуатации дизеля 3Д6 [13].
2. Промывка масляной системы нейтральным маслом.
3. Замер вибрации и шума при эксплуатации двигателя на инновационном моторном масле с присадками меди отечественного производства (рис. 2).

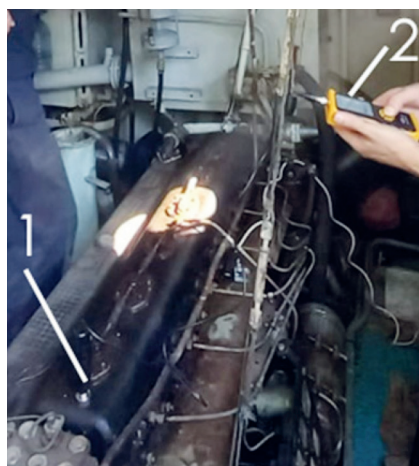


Рис. 2. Процедура измерения вибрации на судне «РК-2091»:
1 — дизель 3Д6; 2 — виброметр

Процедура измерения вибрации и шума производилась в соответствии с рекомендациями производителя виброметра-шумомера.

Результаты (Results)

Результаты измерений вибрации при использовании стандартного масла МС-20 и инновационного моторного масла с присадками меди приведены в табл. 1. Для оценки уровня шума двигателя при использовании «паспортного» масла и CUPPER измерялись как уровень звука (дБА), так и октавные уровни звукового давления (дБА) на стандартных звуковых частотах. Результаты измерения октавных уровней звукового давления (дБА) приведены в табл. 2–3.

Таблица 1

Результаты измерения вибрации дизеля 3Д6 при использовании разных сортов масел

Марка используемого масла	Частота вращения, об/мин	Измерительные точки и направление						
		1		2		3		4
		Верт.	Гориз.	Верт.	Гориз.	Верт.	Гориз.	Осевое
Масло М20	500 (холостой ход)	6,6	29,4	5,7	32,3	7,1	34,7	5,9
Масло с присадками меди		5,7	20,9	4	23	4,4	23,6	4,3
Разница, мм/с		0,9	8,5	1,7	9,3	2,7	11,1	1,6
Масло М20	703	14,1	36,9	7,6	42,4	15,3	45,4	15,9
Масло с присадками меди		13,3	46,3	9,3	46,5	12,2	44,2	13,1
Разница, мм/с		0,8	–9,4	–1,7	–4,1	3,1	1,2	2,8
Масло М20	882	12,8	39,6	7,8	47	10,1	49,1	13,8
Масло с присадками меди		12,5	41	7,7	45	9,8	49	13
Разница, мм/с		0,3	–1,4	0,1	2	0,3	0,1	0,8
Масло М20	1158	9,6	21	8,1	20,4	9,5	21,9	5,9
Масло с присадками меди		7,3	27,7	7,6	25,5	11	27,6	9
Разница, мм/с		2,3	–6,7	0,5	–5,1	–1,5	–5,7	–3,1
Масло М20	1494	9,1	20,7	8,4	17,5	14,4	15,5	9,3
Масло с присадками меди		6,7	21,7	5,6	21,2	10,2	21,6	8,5
Разница, мм/с		2,4	–1	2,8	–3,7	4,2	–6,1	0,8

Таблица 2

**Результаты измерения октавных уровней звукового давления (дБА)
в машинном отделении при использовании масла МС-20**

Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход, частота вращения гребного вала — 0 об/мин	45,8	62,8	73,2	75,7	83,4	90,6	88,5	82,4	75,9	59,5
Малый ход, частота вращения гребного вала — 343 об/мин	45	67,8	80,1	90,1	89,6	94,4	93,4	85,7	77,5	60,6
Средний ход, частота вращения гребного вала — 430 об/мин	50,1	69,5	78,1	88,8	91,1	95,3	94,1	86,6	79,5	63,1
Промежуточный ход, частота вращения гребного вала — 565 об/мин	58,7	69,3	77,7	86,8	91,2	95,3	94,8	89,2	83	67,5
Полный ход, частота вращения гребного вала — 729 об/мин	48,9	67,1	84,2	92	95,9	97,9	97,3	92,1	85,4	71

Таблица 3

**Результаты измерения октавных уровней звукового давления (дБА)
в машинном отделении при использовании масла с присадками меди**

Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход, частота вращения гребного вала — 0 об/мин	46,2	66,8	73,7	79,9	86,4	90,3	88,5	83,4	74,8	58,3
Малый ход, частота вращения гребного вала — 397 об/мин	56,5	71,5	81,8	89,5	93,5	96,8	95,1	88,3	79,8	63,6
Средний ход, частота вращения гребного вала — 450 об/мин	57,4	75,4	85,3	89,7	94,9	98	96,4	90,3	82,4	66,4
Промежуточный ход, частота вращения гребного вала — 585 об/мин	61,7	69,2	81,6	89,9	92	97,4	96,2	90,1	83,9	68,2
Полный ход, частота вращения гребного вала — 730 об/мин	45,9	68,8	89,6	91,7	94,5	98,7	98,2	91,9	84,2	69,3

Проведенная калибровка перед измерениями показала, что отклонения показаний шумомера «Экофизика-110» от уровня эталонного сигнала, генерируемого акустическим калибратором, составили не более 0,2 дБА, что не превышает допустимой величины 0,5 дБА. Это свидетельствует об идентичности настройки шумомера при проведении обоих испытаний.

Параметры шума в рулевой рубке судна измерялись для оценки его воздействия на рулевого, несущего постоянную вахту в рулевой рубке. Результаты измерений приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Результаты измерения уровня звука в рулевой рубке судна
при использовании масла МС-20**

Частота вращения гребного вала, об/мин	Уровень звука, дБА
0	64,1
343	68,9
430	72,7
565	64,3
729	67,0

Таблица 5

**Результаты измерения уровня звука в рулевой рубке судна
при использовании масла с присадками меди**

Частота вращения гребного вала, об/мин	Уровень звука, дБА
0	61,2
397	71,1
450	68,6
585	65,2
730	64,7

При сравнительных измерениях уровня шума в обеих сериях экспериментов частота вращения гребного вала не изменялась более чем на $\pm 10\%$ для отдельных режимов работы в целях обеспечения идентичности характера работы машинно-двигательного комплекса.

Обсуждение (Discussion)

Анализ табл. 1 показывает, что в большинстве случаев наблюдается снижение вибрации при использовании моторного масла с присадками меди. Максимальный эффект снижения вибрации при использовании масла с присадками меди составляет 11,1 мм/с, противоположный эффект увеличения вибрации — 9,4 мм/с. Очевидно, что эффект от применения смазочного масла с присадками меди будет по-разному проявляться при различных режимах работы, что видно по данным, приведенным в табл. 1, однако на наиболее виброактивных режимах: холостом ходу и долевых режимах, он достаточно большой — до 11,1 мм/м. На режиме среднего хода при использовании обоих видов масел уровни вибрации практически идентичные. При режимах работы, близких к номинальным, эффект от использования масла с присадками меди становится менее заметным. Это, вероятно, связано с влиянием других факторов, оказывающих влияние на развитие вибрации, а также снижением влияния ударных составляющих от работы систем и узлов двигателя.

Из табл. 2 и 3 видно, что масло с присадками меди снижает уровень шума на высоких частотах (от 1000 Гц и выше) в среднем на 2–3 дБ на полном ходу, на остальных режимах работах уровень шума практически не зависит от вида масла. Уровень шума в рулевой рубке практически на всех режимах работы энергетической установки при работе на масле с присадками меди снижается. Максимальный эффект достигается на холостом ходу и составляет 2,9 дБА.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Уровень звука в рулевой рубке практически на всех режимах работы энергетической установки при работе на масле с присадками меди снижается с максимальным эффектом 2,9 дБА на режиме холостого хода.
2. Максимальный зафиксированный уровень звука в диапазоне частоты вращения коленчатого вала дизеля от 400 до 440 об/мин при работе на масле с присадками меди составляет 71,1 дБА, при работе на масле МС-20 — 72,7 дБА, т. е. на 1,6 дБА выше.
3. Незначительное повышение уровня звука при использовании масла с присадками меди отмечено в диапазоне частоты вращения от 270 до 400 об/мин и от 530 до 610 об/мин с максимальным значением 2 дБА.
4. Октавные уровни звукового давления при использовании масла с присадками меди на некоторых режимах работы выше, чем при работе на масле МС-20.
5. Масло с присадками меди снижает уровень шума на высоких частотах (от 1000 Гц) до 3 дБ при работе дизеля на полном ходу, на остальных режимах работах уровень шума практически не зависит от сорта масла.

6. Для развития вибрации эффект от применения смазочного масла с присадками меди будет по-разному проявляться на различных режимах работы, но при работе в наиболее виброактивных режимах наблюдается снижение виброскорости на 30–40 %. На режиме среднего хода при использовании обоих видов масел параметры вибрации практически идентичны. При режимах работы, близких к номинальным, эффект от использования масла с присадками меди становится менее заметным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатров М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. — М.: Московский автомобильно-дорожный государственный техн. ун-т (МАДИ), 2014. — 68 с. — EDN SGBRUR.
2. Долотов А. А. Вероятностная оценка шумности легковых автомобилей: дис. ... канд. техн. наук: специальность 25.11.00 / Александр Александрович Долотов. — Волгоград: Волгоградский государственный техн. ун-т, 2022. — 169 с. — EDN IKWPNO.
3. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. — М.: Университетская книга; Логос, 2008. — 424 с. — EDN QMFTIT.
4. Покусаев М. Н. Разработка и Оценка эффективности глушителя шума газовыхлопной системы подвесного лодочного мотора SEA PRO 2.5 / М. Н. Покусаев, К. Е. Хмельницкий, А. А. Кадин, А. В. Сергеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-81-87. — EDN FFQNBA.
5. Покусаев М. Н. Методы и способы снижения шума маломерных судов с подвесными лодочными моторами / М. Н. Покусаев, К. Е. Хмельницкий // 65-я Междунар. научная конференция Астраханского государственного технического университета: материалы конференции. Астрахань, 26–30 апреля 2021 года. — Астрахань, 2021. — С. 826–830. — EDN RICGCR.
6. Покусаев М. Н. Влияние смазочных масел на частоту вращения коленчатого вала подвесных лодочных моторов / М. Н. Покусаев, К. Е. Хмельницкий, А. А. Хмельницкая [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 84–90. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-84-90. — EDN BOGGTP.
7. Яковенко А. Л. Исследование структурного шума дизеля с использованием современных технологий / А. Л. Яковенко, М. Г. Шатров, Л. Н. Голубков [и др.] // Двигателестроение. — 2022. — № 1(287). — С. 45–54. — EDN VVFQOA.
8. Мачнев В. А. Формирование вибрационных сигналов в коробке передач трактора / В. А. Мачнев, А. В. Мачнев, В. А. Комаров, В. В. Салмин // Нива Поволжья. — 2015. — № 1(34). — С. 50–55. — EDN SBBWLP.
9. Кузнецов Р. В. Особенности гидродинамического расчета высоконагруженных подшипников скольжения тяжелых судовых редукторных передач / Р. В. Кузнецов, В. Б. Чистов, Н. М. Вихров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 820–833. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-820-833. — EDN VEAQUK.
10. Тузов Л. В. Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания / Л. В. Тузов, О. К. Безюков, О. В. Афанасьева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Западный государственный заочный технический университет». — СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2012. — 348 с. — EDN QNYGXR.
11. Быков В. В. Диагностика двигателя внутреннего сгорания с использованием метода виброакустической эмиссии / В. В. Быков, Д. А. Мокрушин, А. И. Петров // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник трудов Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 31 января 2019 года. — М., 2019. — С. 526–537. — EDN ZHFHVR.
12. Щеглов В. А. О возможности диагностики цилиндро-поршневой группы ДВС методом частотно-амплитудного анализа сигнала вибрации с использованием вейвлет-анализа / В. А. Щеглов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. — 2015. — Т. 1. — № 3. — С. 49–56. — EDN VPIFWX.
13. Вершинина В. Ф. Судовые дизели типа 3Дб и 7Дб. Приложение к книге «Дизели типа Дб» / В. Ф. Вершинина, З. С. Трумуть. — М.: В/О «Судоимпорт», 1972. — 88 с.

REFERENCES

1. Shatrov, M. G., A. L. Yakovenko and T. Yu. Krichevskaya. *Shum avtomobilnykh dvigatelej vnutrennego sgoraniya: Uchebnoe posobie*. Moskva: Moskovskij avtomobilno-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI), 2014.
2. Al. Dolotov Al. Veroyatnostnaya otsenka shumnosti legkovykh avtomobilej: spetsialnost 25.11.00. PhD diss. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022.
3. Ivanov N. I. *Inzhenernaja akustika. Teorija i praktika bor'by s shumom: uchebnik*. M.: Universitetskaja kniga; Logos, 2008.
4. Pokusaev, M. N., K. E. Khmelnitskij, A. A. Kadin and A. V. Sergeev "Razrabotka i Otsenka effektivnosti glushitelya shuma gazovyxklopnj sistemy podvesnogo lodochnogo motora SEA PRO 2.5." *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 1 (2021): 81–87. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-81-87.
5. Pokusaev, M. N. and K. E. Khmelnitskij "Metody i sposoby snizheniya shuma malomernykh sudov s podvesnymi lodochnymi motorami." *65-ya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: materialy konferentsii, Astrakhan, 26–30 aprelya 2021 goda*. Astrakhan: Astrakhanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021: 826–830.
6. Pokusaev, M. N., K. E. Khmelnitskij and A. A. Khmelnitskaya et al. "Vliyanie smazochnykh masel na chastotu vrashcheniya kolenchatogo vala podvesnykh lodochnykh motorov." *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 4 (2021): 84–90. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-84-90.
7. Yakovenko, A. L., M. G. Shatrov and L. N. Golubkov et al. "Issledovanie strukturnogo shuma dizelya s ispolzovaniem sovremennykh tekhnologij." *Dvigatelistroenie* 1(287) (2022): 45–54.
8. Machnev, V. A., A. V. Machnev, V. A. Komarov and V. V. Salmin "Formirovanie vibratsionnykh signalov v korobke peredach traktora." *Niva Povolzhya* 1(34) (2015): 50–55.
9. Kuznetsov, R. V., V. B. Chistov and N. M. Vikhrov "Osobennosti gidrodinamicheskogo rascheta vysokonagruzhennykh podshipnikov skolzheniya tyazhelykh sudovykh reduktornykh peredach." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.5 (2023): 820–833. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-820-833.
10. Tuzov, L. V., O. K. Bezyukov, O. V. Afanaseva; Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federatsii and Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniya "Severo-Zapadnyj gosudarstvennyj zaochnyj tekhnicheskij universitet". *Vibratsiya sudovykh dvigatelej vnutrennego sgoraniya*. Sankt-Peterburg: Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo", 2012.
11. Bykov, V. V., D. A. Mokrushin and A. I. Petrov "Diagnostics dvigatelya vnutrennego sgoraniya s ispolzovaniem metoda vibroakusticheskoy emissii." *8-e Lukaninskie chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moskva, 31 yanvarya 2019 goda*. Moskva: Moskovskij avtomobilno-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI), 2019: 526–537.
12. Shcheglov, V. A. "O vozmozhnosti diagnostiki tsilindro-porshnevoj gruppy DVS metodom chastotno-amplitudnogo analiza signala vibratsii s ispolzovaniem vejvlet-analiza." *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* 1.3 (2015): 49–56.
13. Vershinina V. F. and Trumul' Z. S. *Sudovye dizeli tipa 3D6 i 7D6. Prilozhenie k knige «Dizeli tipa D6»*. M.: V/O «Sudoimport», 1972.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хмельницкий Константин Евгеньевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,
414025, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: chuchera80@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khmelnitsky, Konstantin E. —
PhD
FSBEI HE «Astrakhan State
Technical University»
414056, Russian Federation, Astrakhan,
Tatishcheva, 16
e-mail: chuchera80@mail.ru

Ковалев Олег Петрович —

доктор технических наук, профессор
Дмитровский рыбохозяйственный технический
институт (филиал) ФГБОУ ВО Астраханского
государственного технического университета
141821, Российская федерация, Московская область,
Дмитровский городской округ,
посёлок Рыбное, д. 36
e-mail: kovalev47@mail.ru

Булгаков Владимир Петрович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414025, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: mbulgak@mail.ru

Kovalev, Oleg P. —

Dr. Sci. (Eng), Professor
Dmitrov Fisheries Technical Institute (branch)
FSBEI HE Astrakhan State
Technical University
141821, Russian Federation, Moscow region,
Dmitrov city district,
Rybnoye settlement, 36,
e-mail: kovalev47@mail.ru

Bulgakov, Vladimir P. —

Dr. Sci. (Eng), Professor
FSBEI HE «Astrakhan State
Technical University»
414056, Russian Federation, Astrakhan,
Tatishcheva, 16
e-mail: mbulgak@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Received: Nov. 12, 2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-992-1002

AUTOMATING THE SEARCH FOR THE SHORTEST CLOSED PATH IN TRANSPORT NETWORK BY MEANS OF MATLAB

A. A. Chertkov, V. G. Nikiforov

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

The paper considers the problem of automating the search and construction of the shortest closed route for a group of merchant ships on a given set of transit nodes of the transport network with known coordinates. The goal is to find the shortest closed route that passes through all hosts only once and ends at the outgoing node. In general, a weighted graph can serve as a mathematical model of such a transport network, in which the criterion for the efficiency of the desired route can be, for example, the distance between cities or ports, time or operating costs. This allows you to identify time reserves that can be used to save fuel and energy, taking into account the load and cost of goods, travel costs and other factors. The work uses a combinatorial method using stochastic (probabilistic) programming, which is implemented using an annealing simulation algorithm supplemented by a recursive step-by-step optimization procedure. The problem belongs to the class of transcomputational even with a small network dimension, which makes it impossible to solve it by brute force on modern computers in a reasonable time. The proposed modification of the simulated annealing algorithm eliminates this limitation and allows not only to evaluate the shortest paths in the network, but also to build closed paths that pass through all the vertices of the network once. The use of an iterative strategy in the algorithm using a probabilistic scenario according to the Monte Carlo method allows you to avoid the solution falling into the local minimum and provides global optimization. The algorithm is implemented in MATLAB codes in the form of a recursive step-by-step optimization procedure with the construction of a curve of a closed route on the coordinate plane through the entire set of nodes of the transport network without mutual intersections of its sections. It is shown that the result of recursive optimization is to obtain a numerical estimate of the closed path of the minimum weight in the full weighted graph, which is a model of the transport network with the definition of an array of transit node numbers on this route. The developed algorithm and global optimization procedure can be used to automate the search for energy-efficient solutions in the control of robotic and unmanned objects, as well as ships in the performance of cargo transportation in water transport.

Keywords: search automation, transport network, circular closed route, Hamiltonian cycle, simulated annealing, control parameter, global optimization, energy state.

For citation:

Chertkov, Alexandr A. and V. G. Nikiforov, "Automating the search for the shortest closed path in transport network by means of MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 16.6 (2024): 992–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-992-1002.

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ЗАМКНУТОГО ПУТИ В ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СРЕДСТВАМИ MATLAB

А. А. Чертков, В. Г. Никифоров

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

В работе рассмотрена задача автоматизации поиска и построения кратчайшего замкнутого маршрута для группы судов торгового флота на заданном множестве транзитных узлов транспортной сети с известными координатами. Цель — найти самый короткий замкнутый маршрут, который проходит через все узлы сети только по одному разу и завершается в исходящем узле. В общем случае математической моделью такой транспортной сети может служить взвешенный граф, в котором критерием эффективности искомого маршрута может служить, например, расстояние между городами или портами, время или эксплуатационные расходы. Это позволяет определить резервы времени, которые можно использовать для экономии топлива и энергии с учетом загрузки и стоимости грузов, путевых расходов и других факторов. В работе применяется комбинаторный метод с использованием стохастического (вероятностного) программирования, который реализуется с помощью алгоритма имитации отжига, дополненного рекурсивной процедурой пошаговой оптимизации. Задача относится к классу трансконтинуальных даже при небольшой размерности сети, что делает невозможным ее решение методом перебора вариантов на современных компьютерах за разумное время. Предложенная модификация алгоритма имитации отжига устраняет это ограничение, позволяя не только оценивать кратчайшие пути в сети, но и строить замкнутые пути, проходящие через все вершины сети один раз. Применение в алгоритме итерационной стратегии с использованием вероятностного сценария по методу Монте-Карло позволяет избежать попадания решения в локальный минимум и обеспечивает глобальную оптимизацию. Алгоритм реализован в кодах MATLAB в виде рекурсивной процедуры пошаговой оптимизации с построением на координатной плоскости кривой замкнутого маршрута через все множество узлов транспортной сети без взаимных пересечений его участков. Показано, что результатом рекурсивной оптимизации является получение численной оценки замкнутого пути минимального веса в полном взвешенном графе, являющемся моделью транспортной сети с определением массива номеров транзитных узлов на этом маршруте. Разработанные алгоритм и процедура глобальной оптимизации могут быть использованы для автоматизации поиска энергоэффективных решений при управлении робототехническими и беспилотными объектами, а также судами при выполнении грузоперевозок на водном транспорте.

Ключевые слова: автоматизация поиска, транспортная сеть, кольцевой замкнутый маршрут, Гамильтонов цикл, имитация отжига, управляющий параметр, глобальная оптимизация, энергетическое состояние.

Для цитирования:

Чертков А. А. Автоматизация поиска кратчайшего замкнутого пути в транспортной сети средствами MATLAB / А. А. Чертков, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 992–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-992-1002.

Введение (Introduction)

В эпоху, когда экономика активно переходит на цифровые технологии, а беспилотные транспортные средства становятся неотъемлемой частью логистических процессов, особую актуальность приобретают вопросы энергоэффективности и оптимизации движения. Одним из ключевых аспектов этой проблемы является сбережение топливно-энергетических ресурсов на маршрутах движения судов. Поиск оптимальных маршрутов движения судов с учетом указанных факторов может быть осуществлен с помощью методов математического программирования и исследования операций. Для этого используются теории графов, позволяющие графически интерпретировать объекты и их модели. Существует множество алгоритмов поиска на графах кратчайших путей до конкретных целей, из которых наиболее известными являются алгоритмы линейного и динамического программирования Дейкстры, Беллмана – Форда, Флойда – Уоршелла, подробно рассмотренные в работах [1]–[5]. Однако они не адаптированы для поиска кратчайшего замкнутого пути, проходящего через все вершины сетевой модели и завершающегося в исходном пункте.

Подобную задачу оптимизации маршрута впервые сформулировал Карл Менгер в 1930 г. как задачу посыльного, которому нужно найти кратчайший путь, пройдя конечное множество мест с известным расстоянием между ними. По сути, эта задача сводилась к поиску самого выгодного маршрута с посещением (обходом) всех мест только по одному разу с возвращением в исходный пункт. Поэтому такая задача в научной общественности получила название *задачи коммивояжера*, которая впоследствии приобрела широкую известность как задача комбинаторной оптимизации.

С появлением мощных вычислительных средств, позволяющих реализовать методы дискретной оптимизации в задачах комбинаторики высокой размерности, группой исследователей из Англии (Дэвид Аплгейт, Роберт Биксби, Уильям Кук и др.), а затем из Германии (Герхард Райнелт) в рамках многоцелевого проекта «Конкорд» выполнялись работы по созданию различных вариаций решения задач коммивояжера для проведения сравнительного анализа эффективности полученных решений другими исследователями. Так, в марте 2005 г. ими была решена задача с 33810 узлами и вычислен путь длиной в 66048945 у.е., а в апреле 2006 г. получено решение для задачи с 85900 узлами. Результаты их работы подтверждают возможность получения решений задач методами декомпозиций с миллионами транзитных узлов, причем полученные оценки не превышают оптимальные более чем на 1 %.

Основными областями применения задачи коммивояжера являются:

- транспортная и дорожная сеть населенных пунктов, требующие оптимизации дорожного движения;
- организация, планирование и размещение логистических схем с минимальными эксплуатационными расходами на перевозку;
- телекоммуникационные узлы в сетях передачи данных и интернет-среде, осуществляющие локальную и глобальную маршрутизацию, от настройки которых зависит качество и скорость передачи данных и информационных потоков;
- обнаружение и распознавание различных визуальных объектов;
- разработка цифровых фильтров специального назначения.

Цифровизация технологических процессов за счет широкого использования технологий искусственного интеллекта, включая использование алгоритмов имитации отжига, генетических и других, позволит системно решать в отрасли вопросы робототехнического безэкипажного управления судами, а также вопросы оптимального планирования, организации и размещения логистических объектов, обеспечивая минимальные эксплуатационные расходы на погрузку и перевозку.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Решение задачи оптимизации замкнутого маршрута. Для решения сформулированной ранее задачи оптимизации замкнутого маршрута, которая относится к классу задач комбинаторной оптимизации, теоретически разработаны алгоритмы точных решений (полного перебора, метод ветвей и границ), эвристические (метод включения дальнего, BV-метод) и поисковые (генетический алгоритм, муравьиный алгоритм — ACS-Q). Сравнительный анализ алгоритмов (см. работы [6]–[11]) по качеству получаемых решений и их быстродействию показал следующее: эвристические относятся к «жадным» алгоритмам, которые не всегда дают наилучшее оптимальное решение, а только приближенное, точные алгоритмы малоприменимы для решения задач больших размерностей (неспособны решить задачу за разумное время), а алгоритмы поиска являются компромиссом между эвристическими и точными методами, требуя подбора параметров. Временные оценки работы алгоритмов позволяют оценить длительность решения задачи и выбрать наиболее подходящий метод, когда быстродействие является критичным параметром.

В связи с бурным развитием мощных вычислительных и программных средств появилась возможность исследовать один из поисковых алгоритмов, получивший широкую известность только в последнее десятилетие — алгоритм имитации отжига, автором которого считается В. Н. Метрополис благодаря известной работе [12], опубликованной в 1953 г. Анализ особенностей и практической реализации алгоритма имитации отжига для поиска кратчайшего замкнутого пути от любого узла сети, проходящего через все остальные узлы транспортной сети с возвращением к тому же начальному узлу, также рассматривались в работах [13]–[15]. При этом возникала сложность алгоритмического конструирования конфигурации замкнутого пути (без каких-либо пересечений между собой отдельных участков этого пути). Характерной особенностью алгоритма имитации отжига, позволяющей решать задачи глобальной оптимизации, является применение итерационной стратегии с использованием случайного сценария по методу Монте-Карло. Это

позволило автору обнаружить сходство между процессом кристаллизации твердых тел и общими стохастическими комбинаторными задачами, относящихся к NP классу (недетерминированных полиномиальных) задач. Отличительной особенностью данного алгоритма от других алгоритмов локального поиска, является его способность преодолевать состояния вычислительного процесса, когда целевая функция попадает в локальный минимум. Этому способствует возможность вероятностного выбора на некотором этапе процесса худшего решения, имеющего большее целевое значение в окрестности поиска.

Согласно данной стратегии предполагается, что активность атомов тем больше, чем выше температура, но с понижением температуры атомы выстраиваются в узлах кристаллической решетки, переходя в состояния с меньшим уровнем энергии. В результате повышается устойчивость кристаллической решетки, которая в устойчивом состоянии соответствует минимуму энергии. При этом вероятность переходов атомов в состояния с большей энергией уменьшается, но еще допустимы переходы отдельных атомов в эти состояния. В такой стратегии оптимизации целевая функция эквивалентна внутренней энергии металла, а комбинированное пространство энергетических состояний эквивалентно множеству значений независимой векторной переменной задачи оптимизации.

Основным управляющим параметром алгоритма имитации отжига является температура T , процесс уменьшения которой рассматривается как итерация алгоритма Метрополиса. На начальном этапе, когда значение T велико, существует большая вероятность принятия плохих из худших решений, но по мере снижения параметра T вероятность принятия лучших из худших решений возрастает и, наконец, когда параметр T стремится к нулю, никакие ухудшающиеся решения не могут быть приняты.

Таким образом, цель алгоритма имитации отжига состоит в том, чтобы обеспечить такое управление процессом снижения температуры, при котором задача достижения глобальной оптимизации будет решена на множестве из комбинированных состояний, для которого значение целевой функции будет минимальным.

Алгоритм поиска глобального минимума методом имитации отжига предполагает свободное задание следующих параметров:

- $s_0 \in S$ — начального состояния из множества всех состояний системы (решений) задачи. Тогда s_i — состояние системы на i -м шаге алгоритма;
- начального T_0 и конечного T_f значений управляющего параметра: температуры, представляющей собой убывающую с течением времени функцию от аргумента T ;
- параметра α затухания управляющего параметра T (для расчета понижающего ряда температур);
- длины L_k марковской цепи, определяющей количество итераций при любой температуре T ;
- функции E энергии, подлежащей оптимизации;
- функции F , генерирующей новое состояние «кандидат», которое либо принимается, либо не принимается.

Основные шаги алгоритма:

1. Принимаем температуру отжига T , равную начальной T_0 .
2. Генерируем случайным образом новое состояние s_c и вычисляем соответствующую ему энергию $E(s_c)$.
3. Уменьшаем параметр T до следующего значения T_i согласно расписанию охлаждения. Если $T_i > T_f$ то с помощью функции F генерируется новое состояние «кандидат»: $s_c = F(s_{i-1})$, соответствующее значению целевой функции $E(s_c)$.
4. Вычисляем приращение $\Delta E = E(s_c) - E(s_{i-1})$, для которого проверяются следующие условия:
 - если $\Delta E \leq 0$, то $s_i = s_c$, т. е. принимается новое состояние (решение);
 - если $\Delta E > 0$, то переход в новое состояние осуществляется с вероятностью $P(\Delta E) = e^{-\Delta E/T}$.

Таким образом, если энергия «кандидата» меньше, он становится новым состоянием, в противном случае переход будет вероятностным (поэтому метод относят к классу стохастических).

5. Понижаем температуру $T_{i+1} = T_i$.

6. Далее при параметре T_i процесс возмущения и приема решения о переходе в новое состояние (см. пп. 3 и 4 алгоритма) повторяется L_k раз.

7. При достижении температуры конечного значения T_f алгоритм останавливается, в противном случае выполняется дальнейшее охлаждение.

Покажем способ реализации на практике рассмотренного ранее метода имитации отжига для решения задачи коммивояжера — поиска кратчайшего замкнутого маршрута в сети.

Формальная постановка задачи и генерация исходных данных. Задана транспортная сеть с множеством транзитных узлов с известными координатами (рис. 1), для прохождения которых необходимо построить кратчайший замкнутый маршрут, который проходит через все транзитные узлы сети только по одному разу и завершается в исходящем узле. В общем случае необходимо решить задачу коммивояжера для транспортной сети, математической моделью которой является взвешенный граф. Пусть транзитные узлы случайным образом разбросаны в квадрате 100×100 км². Каждый узел сети представлен парой координат. Всего 50 узлов.

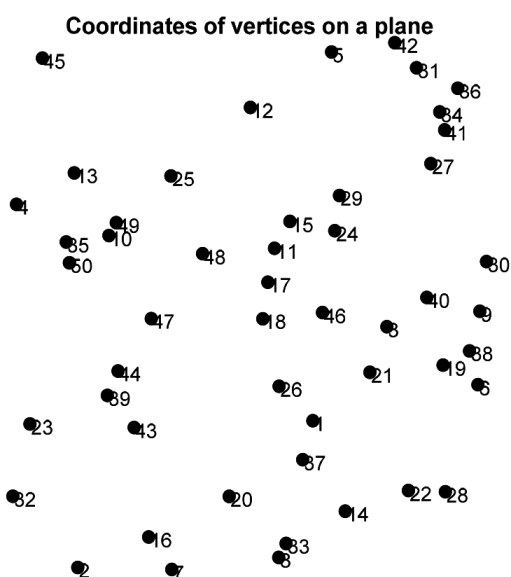


Рис. 1. Координатная плоскость для построения кратчайшего замкнутого пути между всеми узлами транспортной сети

Для получения исходных координат воспользуемся функцией `rand` из инструментария MATLAB и на ее основе построим следующий код:

```
>> N=50; % количество городов
>> cities = rand(N,2)*100; % генерация координат городов (x, y)
>> XY=cities(:,1:2); % вывод координат двумя столбцами X и Y
```

При этом генерируются N пар случайных чисел по закону равномерного распределения вероятностей, соответствующие координатам (x_i, y_i) узлов сети. Чтобы координаты находились в заданной плоскости, увеличиваем их значения в 100 раз. Каждый узел транспортной сети на плоскости представляется с соответствующим индексом (рис. 1). Решением оптимизационной задачи поиска является выбор кратчайшего из маршрутов, проходящих через каждый город только один раз. В этом случае множество состояний S представляет собой все возможные маршруты, проходящие через все узлы на графе, каждый из которых имеет свой порядковый номер в транспортной сети. Реализация задачи автоматизации поиска кратчайшего замкнутого пути методом имитации отжига требует выполнения следующих этапов.

На первом этапе для использования метода имитации отжига необходимо определить две функции, зависящие от каждой конкретной задачи: функцию энергии E (или «целевую функцию» в общепринятой терминологии) и функцию F , порождающую новое состояние. Так как необходимо минимизировать расстояние, оно и будет «энергией». Следовательно, целевая функция будет иметь следующий вид:

$$E(s_i) = E_i = \left[\sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \right] + \sqrt{(x_{|C|} - x_1)^2 + (y_{|C|} - y_1)^2}. \quad (1)$$

Первое слагаемое в формуле (1) означает не что иное, как сумму евклидовых расстояний между парами узлов, составляющих маршрут s_i . Так как маршрут замкнутый, эта формула дополняется вторым слагаемым: $\sqrt{(x_{|C|} - x_1)^2 + (y_{|C|} - y_1)^2}$, которое представляет собой расстояние между последним и исходными узлами. Евклидово расстояние между точками A и B на плоскости с координатами $A = (x_a, y_a)$, $B = (x_b, y_b)$ задается следующей формулой:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}. \quad (2)$$

В связи с этим необходимо найти по формуле (2) матрицу евклидовых расстояний между всеми возможными парами узлов, которую можно реализовать за один шаг путем алгебраических операций над векторами координат. Предлагаемый программный код:

```

coor_x_1 = cities(:,1)*ones(1,N);
coor_x_2 = coor_x_1';
coor_y_1 = cities(:,2)*ones(1,N);
coor_y_2 = coor_y_1';
Sd=sqrt((coor_x_1-coor_x_2).^2 + (coor_y_1-coor_y_2).^2); % матрица расстояний

```

На втором этапе необходимо получить новое состояние-кандидат. Самым простым решением в этом случае будет произвольная перестановка местами двух номеров узлов в списке их маршрута следования. Однако это может привести к непредсказуемому значению энергии E_i и в конечном итоге к заикливанию (зависанию) вычислительного алгоритма. Выходом из этой ситуации может быть инверсия пути между двумя случайно выбранными узлами на маршруте. К примеру, если по случайному закону произведен выбор двух чисел (3 и 8), на интервале из десяти номеров городов в порядке их перечисления, то новое состояние (маршрут) будет следующим: 1, 2, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 9, 10. Для реализации этой процедуры предлагается следующий фрагмент программы:

```

D=randi(N,L,2) %Предыдущее состояние (маршрут), являющееся состоянием-кандидат
i = randi(D,2); % Генерируем целое случайное число
j = randi(n,2); % Генерируем целое случайное число
if(i>j)
    D(j:i)=flipud(D(j:i)); % обращаем подпоследовательность
else
    D(i:j)=flipud(D(i:j)); % обращаем подпоследовательность
End

```

На третьем этапе начинаем процесс оптимизации. Для начала получим функцию энергии, соответствующую текущему состоянию цепи, или то, что оптимизируем, а именно длину замкнутого пути в транспортной сети: $E: S_{current} \rightarrow S_{opt}$. Приведем фрагмент кода программы с пояснениями в виде комментариев:

```

ROUTE=randperm(n); % %Задаём начальный (случайный) маршрут из номеров узлов
S_current=inf; %Текущее расстояние в цепи, являющееся текущим решением;
S_opt=0;% Оптимальное расстояние (решение)
% Оптимизация путем выполнения итераций
for k = 1:L % Задаем число итераций
    Dk = D(k,[1,2]); % Выбор двух случайных узлов на k-м шаге
    if Dk(1) < Dk(2)
        if Dk(1)~= 1 && Dk(2)~= N
            S_curent=Sd(ROUTE(Dk(1)-1),ROUTE(Dk(1))) + ...
                Sd(ROUTE(Dk(2)),ROUTE(Dk(2)+1));
        elseif Dk(1)~=1 && Dk(2)==N
            S_curent =Sd(ROUTE(Dk(1)-1),ROUTE(Dk(1))) + ...
                Sd(ROUTE(Dk(2)),ROUTE(1));
        elseif Dk(1)==1 && Dk(2)~=N
            S_curent=Sd(ROUTE(end),ROUTE(Dk(1))) + ...
                Sd(ROUTE(Dk(2)),ROUTE(Dk(2)+1));
        end
    end
end

```

Как видно из приведенного фрагмента, в нем циклически выполняются итерации вычисления текущего расстояния цепи путем выборки из матрицы Sd расстояний согласно построенному маршруту ROUTE из номеров узлов. Далее покажем, как на основе предыдущего состояния $S_current$ вычисляется новое расстояние в цепи (состояние-кандидат S_opt), в которое система может перейти, а может и отбросить. Способ получения «кандидата» полностью зависит от решаемой задачи на основе аналогичной процедуры, показанной ранее:

```

ROUTEp = ROUTE; % Задаем потенциальный (новый) маршрут
% Вычисляем новое расстояние в цепи (состояние - кандидат)
if Dk(1)<Dk(2)
    ROUTEp(Dk(1):Dk(2))=ROUTEp(Dk(2):-1:Dk(1));
    if Dk(1)~=1 && Dk(2)~=N
        Sopt=Sd(ROUTEp(Dk(1)-1),ROUTEp(Dk(1))) + ...
            Sd(ROUTEp(Dk(2)),ROUTEp(Dk(2)+1));
    elseif Dk(1)~=1 && Dk(2)==N
        Sopt=Sd(ROUTEp(Dk(1)-1),ROUTEp(Dk(1))) + ...
            Sd(ROUTEp(Dk(2)),ROUTEp(1));
    elseif Dk(1)==1 && Dk(2)~=N
        Sopt=Sd(ROUTEp(end),ROUTEp(Dk(1))) + ...
            Sd(ROUTEp(Dk(2)),ROUTEp(Dk(2)+1));
    end
end

```

В следующем фрагменте кода программы выполнено сравнение нового расстояния (состояния-кандидата) с текущим расстоянием (состоянием). Если расстояние «кандидата» меньше, то оно становится новым состоянием, в противном случае переход будет вероятностным, поэтому метод относят к классу стохастических. Далее приведен фрагмент программы, соответствующий этим операциям:

```

RANDONE = rand(L,1); % формируем заранее список вероятностей перехода
Sp<S
ROUTE=ROUTEp;

```

```

iter=k;
else
    P=exp(-(Sopt-S _ current))./t); % вычисляем вероятность перехода
    if RANDONE(k)<=P
        ROUTE=ROUTEp;
    end
end
% t = t.*a;% Управляющий параметр t (температура) уменьшается
t=t0/k; % уменьшаем температуру
end

```

Вероятностный переход обеспечивается функцией *rand* генерации равномерно распределенного случайного числа в MATLAB. Иллюстрация такого перехода демонстрируется с помощью шкалы вероятностей, распределенных по равномерному закону от нуля до единицы, где вероятность перехода к новому состоянию (расстоянию) обозначена символом P :



Если значение сгенерированной вероятности P попало в левую часть, то выполняем переход, если в правую — не делаем ничего. На этом завершается описание основных шагов алгоритма и можно перейти к его реализации на этапе моделирования алгоритма поиска кратчайшего замкнутого пути на заданной координатной плоскости (см. рис. 1).

Результаты (Results)

В результате пошаговой реализации алгоритма поиска оптимального замкнутого маршрута на транспортной сети получены численные значения кратчайшего пути S_p замкнутого маршрута и компонентов вектора ROUTE, соответствующих номерам вершин (узлов), лежащих на этом пути:

```

>> simotg4d
Sp =
    106.4496

ROUTE =

Columns 1 through 17
    1    14    22    28     6    38     9    40    30    27    41    34    36    31    42     5    12

Columns 18 through 34
   25    49    10    13    45     4    35    50    47    44    39    43    23    32     2    16     7

Columns 35 through 50
   20     8    33    37    26    18    48    11    15    29    24    17    46     3    19    21

Elapsed time is 0.455323 seconds.

>>

```

На рис. 2 средствами MATLAB показан замкнутый маршрут кратчайшего пути, проходящего через все вершины координатной плоскости (графа) и соответствующего виртуальной транспортной сети, сгенерированной по закону равномерного распределения вероятностей.

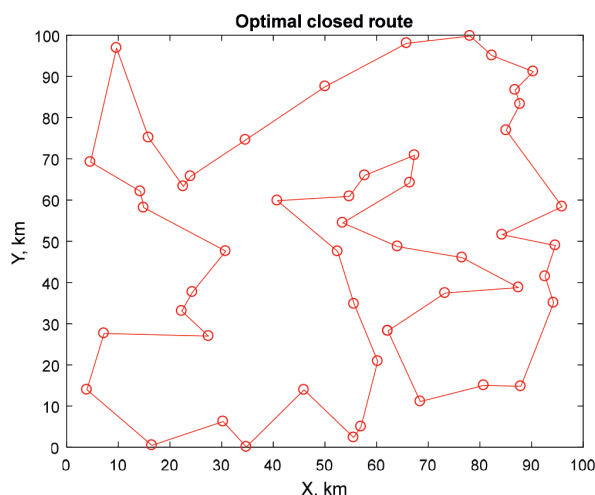


Рис. 2. Кратчайший замкнутый маршрут в транспортной сети

Как видно из полученных результатов, затраченное время на поиск решения составляет всего 0,45523 с. Особенностью построенного маршрута является то, что замкнутый путь может исходить из любой вершины полносвязного взвешенного графа (сетевой модели), проходить через все вершины графа только один раз (без пересечений ранее пройденных ребер графа) и возвращаться в ту же самую вершину. На интервале времени от $t_{\min} = 0,1$ до $t_{\max} = 10$ с программа выдает гарантированный результат. При этом необходимо всего L итераций (шагов), численно равных заданной длине марковской цепи. При меньшей длине цепи нет гарантии от застревания вычислительного процесса в локальном минимуме и его завершения оптимальной оценкой расстояния замкнутого пути.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный алгоритм автоматизации поиска является универсальным для любого множества транзитных узлов потоковой сети, от числа которых зависит лишь выбор длины марковской цепи, определяющей количество пошаговых итераций, необходимых для получения оптимального решения.
2. Алгоритм и построенная на его основе компьютерная модель применимы для оперативного сравнительного анализа предлагаемых маршрутов движения судов по критерию минимальных эксплуатационных расходов с учетом воздействия внешних факторов, а также для оптимального планирования и размещения логистических объектов в транспортной сети.
3. Предложена модификация алгоритма имитации отжига, предусматривающая возможность получения нового состояния (расстояния) не только за счет случайной перестановки местами номеров вершин сетевого графа, но и инверсии маршрута между ними при каждой последующей итерации.
4. Достоинствами предложенной модификации алгоритма имитации отжига является возможность программной реализации стохастической комбинаторной оптимизации, реализуемой с применением средств из Приложения Optimization Toolbox среды MATLAB.
5. Работоспособность и эффективность алгоритма оптимизации поиска кратчайшего замкнутого пути на множестве транзитных узлов подтверждена многократными испытаниями, при которых не было ни одного случая застревания алгоритма в локальном минимуме, которое могло вызвать «зависание» процедуры его поиска на сетевой транспортно-логистической модели и не дать гарантированного решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В. В. Автоматизация поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков в транспортных сетях средствами целочисленного линейного программирования / В. В. Сахаров, И. А. Сикарев, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3(49). — С. 647-657. DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657. — EDN UTPDIL.
2. Чертков А. А. Рекурсивный метод оптимизации логистических путей средствами MATLAB / А. А. Чертков, А. А. Вардомская, А. А. Дмитриев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6(34). — С. 196-204. — DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-196-204. — EDN VCKLFP.
3. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана-Форда / А. А. Чертков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113-1122. — DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122. — EDN ZSRYGJ.
4. Сахаров В. В. Маршрутизация сетей с отрицательными весами звеньев в пакете оптимизации MATLAB / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Л. Б. Очина // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 230-242. — DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-230-242. — EDN GFTRWW.
5. Sakharov V. V. Network routing method for ships and other moving objects using MATLAB / V. V. Sakharov, A. A. Chertkov, I. B. Ariefjew // Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin. — 2020. — Is. 62(134). — Pp. 61-68.
6. Hornik K. TSP – Infrastructure for the traveling salesperson problem / K. Hornik // Journal of statistical software. — 2007. — Is. 23 (2). — Pp. 1-21. DOI: 10.18637/jss.v023.i02.
7. Борознов В. О. Исследование решения задачи коммивояжера / В. О. Борознов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2009. — № 2. — С. 147-151. — EDN KWYPNF.
8. Stützle T. Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization / T. Stützle, M. López-Ibáñez, P. Pellegrini, M. Maur, M. de Oca, M. Birattari, Michael Maur, M. Dorigo // Technical Report — IRIDIA, Université Libre de Bruxelles 2010-002, 2010. — 26 p.
9. Кормен Т. Х. Алгоритмы. Построение и анализ. — 2 изд. / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Р. Ривест, К. Штайн — М.: Вильямс, 2012. — 1296 с.
10. Костюк Ю. Л. Эффективная реализация алгоритма решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ // Прикладная дискретная математика. — 2013. — № 2(20). — С. 78-90. — EDN QCAKVP.
11. Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов / М. Н. Кирсанов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2(36). — С. 183-190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190. — EDN VTNQHD.
12. Metropolis V. N. Equations of state calculations by fast computing machines / V. N. Metropolis., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, E. J. Teller // Chem. Phys. — 1953. — Vol. 21. — Pp. 1087-1092.
13. Winkler G. Image analysis, random fields and Markov chain Monte Carlo methods: a mathematical introduction — Vol. 27. — Springer Science and Business Media, 2012.
14. Ермаков С. М. К анализу метода имитации отжига в многоэкстремальном случае / С. М. Ермаков, Д. В. Куликов, С. Н. Леора // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 220-226. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.205. — EDN ZDJRWD.
15. Костин А. С. Исследование моделей и методов маршрутизации практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 524-536. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536. — EDN SBJQBU.

REFERENCES

1. Sakharov V, I. A. Sikarev and A. A. Chertkov “Avtomatizatsiya poiska optimal’nykh marshrutov i gruzovykh potokov v transportnykh setyakh sredstvami tselochislennogo lineynogo programmirovaniya.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 10.3 2018:647-657. — DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.

2. Chertkov A, A. A. Vardomskeya and A. A. Dmitriev “Rekursivnyy metod optimizatsii logisticheskikh putey sredstvami MATLAB.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 6(34). 2015:196–204. — DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-196-204.
3. Chertkov A “Avtomatizatsiya vybora krachayshikh marshrutov sudov na osnove modifitsirovannogo algoritma Bellmana-Forda.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 9.5 2017:1113–1122. — DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
4. Sakharov V, A. A. Chertkov and L. B. Ochina “Marshrutizatsiya setey s otritsatel’nymi vesami zven’ev v pakete optimizatsii MATLAB.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 11.2 2019:230–242. — DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-230-242.
5. Sakharov Vladimir. V., Alexandr. A. Chertkov, Igor. B. Ariefjew. “Network routing method for ships and other moving objects using MATLAB”. *Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin* 62(134) (2020): 61–68.
6. Hornik K. TSP – Infrastructure for the traveling salesperson problem *Journal of statistical software* 23 (2) (2007): 1–21. DOI: 10.18637/jss.v023.i02.
7. Boroznov V “Issledovanie resheniya zadachi kommivoyazhera.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel’naya tekhnika i informatika* 2. 2009:147–151.
8. T. Stützle, M. López-Ibáñez, P. Pellegrini, M. Maur, M. de Oca, M. Birattari, Michael Maur, M. Dorigo *Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization*. Technical Report. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2010.
9. Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L., Stein Clifford. *Algorithms: Postroenie i analiz*. 2 izd. M.: Vilyams, 2011.
10. Kostjuk. Ju. L. “Effektivnaya realizatsiya algoritma resheniya zadachi kommivoayzhera metodom vetvey i granits” // *Prikladnaya diskretnaya matematika, vychislitelnye metody v diskretnoy matematike*, 2 (20) (2010):78-90.
11. Kirsanov, M. N. “Analiz algoritmov vybora optimalnykh marshrutov gruppy sudov.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.
12. Metropolis V. N., Rosenbluth A. W., Rosenbluth M. N., Teller A. H., Teller E. “Equations of state calculations by fast computing machines.” *J. Chem. Phys.* 21 (1953): 1087–1092
13. Winkler, Gerhard. *Image analysis, random fields and Markov chain Monte Carlo methods: a mathematical introduction*. Vol. 27. Springer Science & Business Media, 2012.
14. Ermakov, S. M., D. V. Kulikov and S. N. Leora “K analizu metoda imitatsii otzhiga v mnogoekstremalnom sluchae.” *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya* 4.2 (2017): 220–226. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.205.
15. Kostin, A. S. and N. N. Majorov “Issledovanie modelej i metodov marshrutizatsiii prakticheskogo vypolneniya avtonomnogo dvizheniya bespilotnymi transportnymi sistemami dlya dostavki грузов.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 15.3 (2023): 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru
Никифоров Владимир Григорьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7
e-mail: nikiforovvg@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
chertkov51@mail.ru
Nikiforov Vladimir G. —
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: nikiforovvg@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 04 Ноября 2024
Received: Nov. 04, 2024

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 16. № 6

2024 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.12.24. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 23,25. Тираж 500 экз. Заказ № 614/24

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7