

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. № 1

**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. — № 1. — 174 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.



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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 7

Дерябин В. В. Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети 7

Фирсов Ю. Г. Современная цифровая гидрография и требования новых международных стандартов для батиметрической съемки..... 17

Ююкин И. В. Картографирование изоповерхности дополнительных вторичных факторов методом сплайн-аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Logan 37

Костюничев Д. Н., Отделкин Н. С. Оценка работоспособности сетчатых экранов по снижению пылевых выбросов сыпучих грузов с открытых складов портов 55

Галин А. В., Рудный П. С. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России 64

Горенькова В. С. Методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях 74

Гарибин П. А., Буцанец А. А., Егоров С. В. Валидация швартовных тумб причалов АО «Троица» в порту «Чайка» (Северодвинск) с проведением натурного эксперимента 84

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 97

Цветков Ю. Н., Петров В. А., Ивко И. Е. Гидроабразивный износ форсунок струйного насоса 97

Покусаев М. Н., Горбачев М. М. Применение матрицы рисков для оценки установки систем мониторинга крутильных колебаний на судах 109

Матвеева Е. В., Афанасьев А. К., Иванов А. Н. Особенности расчета прочности узлов редукторов порталных и судовых кранов в вероятностном аспекте 121

Том 16. № 1

2024

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ

Гл. редактор

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

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
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.

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

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

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

Подписной индекс в каталоге Урал-Пресс — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

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

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

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

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

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

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

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

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

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

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 134**

Решняк В. И., Негруца Е. А., Чиков Е. П. Особенности применения озона для очистки судовых загрязнений..... 134

Кочергин В. И., Глушков С. П., Зинченко Е. С. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок..... 141

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 154**

Голоскоков К. П., Глебов Н. Б., Астапкович А. А. Моделирование транспортно-технологических процессов в автоматизированных системах 154

Русинов И. А., Затолокина М. Ю. Теоретико-игровая модель для анализа стратегии внедрения технологии блокчейн при организации морской перевозки 163

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	7
<i>Deryabin V. V.</i> Depth-based vessel position fixing by means of a neural network	7
<i>Firsov Yu. G.</i> Modern digital hydrography and the new International Hydrographic Organization bathymetric survey Standards	17
<i>Yuyukin I. V.</i> Map-aiding of the additional secondary factors isosurface by the spline approximation method as a condition of improving the e-Loran observations accuracy.....	37
<i>Kostyunichev D. N., Otdelkin N. S.</i> Assessment of the meshed screens operability to reduce dust emissions of bulk cargo from the ports open warehouses	55
<i>Galina A. V., Rudny P. S.</i> Liner shipping network design problem in modern transportation system of Russia.....	64
<i>Gorenkova V. S.</i> Methodology for planning transportation and containerized cargo unloading in off-port conditions	74
<i>Garibin P. A., Butsanets A. A., Egorov S. V.</i> Validation of JSC “Troitsa” berths bollards in the “Chayka” port of Severodvinsk.....	84
TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	97
<i>Tsvetkov Y. N., Petrov V. A., Ivko I. Y.</i> Hydroabrasive wear of jet pump nozzles	97
<i>Pokusaev M. N., Gorbachev M. M.</i> The risk matrix application to assess the installation of torsional vibration monitoring systems on ships	109
<i>Matveeva E. V., Afanasyev A. K., Ivanov A. N.</i> Features of calculating the strength of gantry and ship cranes gear units in the probabilistic aspect.....	121

Volume 16. № 1

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)..... 134**

Reshnyak V. I., Negrutsa E. A., Chikov E. P. Features of using ozone
for cleaning marine pollution..... 134

Kochergin V. I., Glushkov S. P., Zinchenko E .S. Using the thermodynamic
processes features to assess the diesel power plants technical condition 141

**AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES AND PRODUCTIONS 154**

Goloskokov K. P., Glebov N. B., Astapkovich A. A. Modeling
of transportation and technological processes in automated systems..... 154

Rusinov I. A., Zatolokina M. Y. Analysis of blockchain introduction
strategies in maritime business with game theory modelling 163

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16

DEPTH-BASED VESSEL POSITION FIXING BY MEANS OF A NEURAL NETWORK

V. V. Deryabin

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

A depth-based vessel position fixing method on the basis of a neural network is proposed. The network takes as an input a sequence of depth values measured by an echo-sounder and predicts vessel latitude and longitude for the moment of the latest depth measurement. The neural network has a fully-connected feedforward architecture with several layers which satisfies conditions of the universal approximation in compliance with the Stone-Weierstrass theorem. The Adamax algorithm for the neural network training with controlling a maximum value of position error at each epoch is implemented. Modeling is conducted with the Python programming language and the Tensorflow library. The model surface of seabed is performed as a second-order polynomial. Training samples on the basis of virtual soundings at the coordinate net knots with the space resolution not worse than one cable are obtained. After samples obtaining the training of the neural network is conducted. A validation set is not used. Several neural networks are trained. They have different number of hidden layers and different number of neurons per each hidden layer. After training the test procedure is performed. Test samples are generated in the assumption that a vessel is moving along meridians which are not used at the stage of the preliminary soundings survey. The cases of mean and random test meridians are considered. The random meridians are obtained with a uniform random number generator. As the result, all the tested neural networks have shown approximately identical navigational accuracy which is close to the accuracy for the training set.

Keywords: vessel, position, depth, neural network, machine learning, autonomous mode, seabed relief, calculation algorithm.

For citation:

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.

УДК 656.61.052:527.62:004.032.26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СУДНА ПО ГЛУБИНАМ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В. В. Дерябин

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

Предложен метод определения места судна по глубинам на основе нейронной сети, которая принимает на вход последовательность глубин, измеренных при помощи эхолота, а прогнозирует широту и долготу судна на момент измерения последней глубины. Нейронная сеть имеет архитектуру сети прямого распространения с несколькими скрытыми слоями и полными связями, удовлетворяющую условиям универсальной аппроксимации в соответствии с теоремой Стоуна – Вейерштрасса. Для обучения используется алгоритм Adamax при условии контроля наибольшего значения модуля невязки на каждой итерации. Моделирование выполнялось с использованием языка программирования Python и библиотеки Tensorflow. Модельная поверхность рельефа дна была представлена в виде многочлена второго порядка. Образцы получены на основе виртуальных измерений глубин в узлах координатной сетки с пространственным разрешением не хуже, чем один кабельтов. После сбора образцов выполнялось обучение

нейронной сети, в ходе которого не использовалась контрольная выборка. В обучении участвовало несколько нейронных сетей, отличающихся количеством скрытых слоев, а также количеством нейронов в них. После обучения было проведено тестирование, которое предполагало движение судна вдоль меридианов, в точности не совпадающих с используемыми для формирования обучающей выборки. При этом наряду с вариантом средних по долготе меридианов рассмотрен вариант выбора меридианов с использованием датчика случайных чисел равномерного распределения. В результате тестирования все рассмотренные сети показали примерно одинаковую приемлемую навигационную точность, близкую к точности, полученной на обучающей выборке.

Ключевые слова: судно, местоположение, глубина, нейронная сеть, машинное обучение, автономный режим, рельеф дна, алгоритм расчета.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Одной из основных задач судовой навигации является высокоточное непрерывное определение координат, успешно решаемое в настоящее время использованием спутниковых радионавигационных систем. В соответствии с хорошей морской практикой для повышения надежности обсерваций спутниковые методы должны контролироваться другими независимыми от них методами. В прибрежном плавании для этого успешно могут использоваться радиолокационные методы, в открытом море — астрономические методы и счисление. Судовое конвенционное оборудование позволяет использовать еще один класс методов определения места — *корреляционно-экстремальную навигацию по глубинам*. Предварительно записанные последовательности значений глубин и координат могут использоваться для определения места, если выполнить поиск последовательности глубины, наиболее близкой к текущей. Известно (см., например, [1] и [2]), что методы поиска в задачах корреляционно-экстремальной навигации могут предполагать наличие мощных вычислительных комплексов, способных в реальном времени решить эту задачу.

Вычислительные способности наиболее актуальны в случае, когда выполняется непосредственно поиск по базе данных. Тем не менее возможен и другой вариант, когда соответствие глубин и координат представляется некоторой структурой, не являющейся непосредственно базой данных глубин и координат. В качестве таких структур целесообразно использовать *искусственные нейронные сети*, способность которых к аппроксимации функций хорошо изучена и доказана математически [3]–[5]. Если сеть обучить, то в рабочем режиме набор данных о глубинах уже не нужно будет использовать непосредственно, так как зависимость сохранится в коэффициентах сети, и скорость вычислений будет зависеть от их количества. Функциональной зависимостью в данном случае будет являться зависимость координаты от глубины.

В настоящее время нейронные сети используются для решения задач корреляционно-экстремальной навигации (по эталонным данным). Например, в [6] предлагается построение корреляционно-экстремального метода видеонавигации, который использует изображения, предварительно проходящие процедуру сегментации при помощи нейронной сети cGAN (Conditional Generative Adversarial Network). В исследовании [7] для сегментации изображений в рамках оптической автономной навигационной системы используется нейросеть U-Net. В работе [8] нейронная сеть используется при определении координат судна по магнитным и гидроакустическим маячкам, расположенным на дне. Существуют также непосредственные решения задач навигации беспилотных летательных аппаратов по изображениям, когда на вход нейронной сети подаются изображения местности, а на выходе получаются их координаты (см., например, [9]). Для решения задач батиметрической навигации могут применяться и сплайны (см., например, [10]), которые также можно интерпретировать как нейронные сети, что показано, например, в исследовании [11]. Альтернативные решения задач батиметрической навигации можно найти в исследованиях [12]–[14].

В статьях [15] и [16] предлагаются алгоритмы определения места судна по глубинам, причем в статье [16] используется непосредственно глубина, а в [15] — ее производная. В обеих статьях рассматривается весьма ограниченный для практического использования одномерный случай. В настоящей работе рассматривается *двумерный случай*, что более соответствует реальным условиям плавания судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. Пусть на этапе промеров при помощи эхолота измеряются n значений глубины d на заданной акватории. Каждому такому значению глубины соответствует значение широты φ и долготы λ судна. Пусть p — количество значений глубин, которые используются для определения местоположения, т. е. используется подпоследовательность вида $\{D\} = d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}$, где $k = 0, 1, 2, \dots, n - p + 1$, которой соответствуют подпоследовательности координат: $\{X\} = \varphi_k, \varphi_{k+1}, \varphi_{k+2}, \dots, \varphi_{k+p-1}$; $\{Y\} = \lambda_k, \lambda_{k+1}, \lambda_{k+2}, \dots, \lambda_{k+p-1}$. Предполагается, что существует функциональная зависимость вида: $\varphi_{k+p-1}, \lambda_{k+p-1} = f(d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1})$, которая может быть приближенно представлена нейронной сетью.

Следует отметить, что отображение $f(\cdot)$ может содержать неоднозначность, т. е. одной и той же последовательности глубин будут соответствовать две или более точки на плоскости. Указанная ситуация соответствует рельефу, который имеет «повторяющийся» характер, что на практике будет приводить к затруднению обучения нейронной сети. Возможна также противоположная ситуация, когда разным последовательностям глубин соответствует одна и та же точка. Действительно, в одну и ту же точку акватории можно попасть различными траекториями. Данная ситуация не должна вызывать дополнительных проблем с обучением нейронной сети.

Архитектура нейронной сети. Теория нейронных сетей позволяет использовать сеть персептронного типа с одним скрытым слоем для реализации любого непрерывного отображения по типу «вход-выход». Теоретическим обоснованием указанного утверждения может служить теорема Стоуна – Вейерштрасса. В данном случае на вход поступает вектор размерностью p , а на выходе получается вектор координат размерностью 2. Общий вид такой нейронной сети приведен на рис. 1.

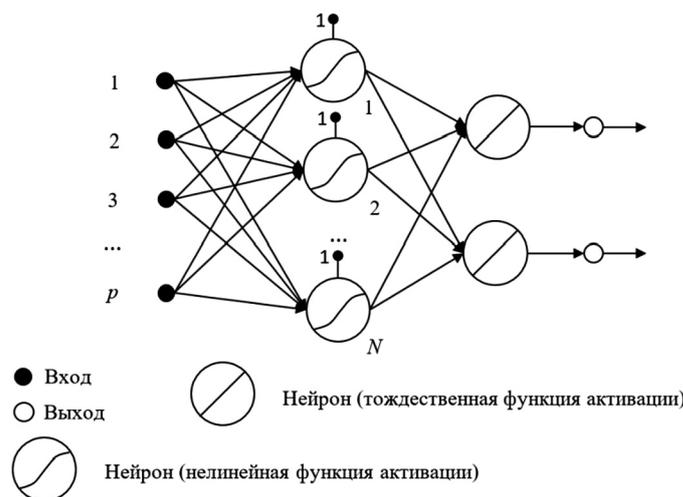


Рис. 1. Общий вид архитектуры нейронной сети

В случае однослойной архитектуры и заданной функции активации скрытых нейронов (часто используется гиперболический тангенс) параметрами являются количество скрытых нейронов N , а также параметры, определяющие вид функций принадлежности. Однослойная архитектура иногда называется мелкой в отличие от архитектуры глубокой, когда нейронная сеть содержит два и более скрытых слоя. Для аппроксимации одной и той же функциональной зависимости могут использоваться как мелкие сети, так и глубокие. При этом не исключена возможность добиться

лучших результатов обучения при использовании глубокой архитектуры либо добиться примерно тех же результатов, но с использованием сети с меньшим количеством вычислительных узлов, т. е. требующей меньших вычислительных затрат. Исследования [17] и [18] содержат информацию о целесообразности использования глубоких нейросетей.

В целях настоящего исследования будем использовать несколько архитектур нейронных сетей, аналогичных приведенной на рис. 1, имеющих от одного до пяти скрытых слоев. Все скрытые нейроны таких сетей имеют функции активации в виде гиперболического тангенса. Более того, будем варьировать количество нейронов N в каждом слое сетей.

Набор учебных данных. Для генерации набора учебных данных было выполнено моделирование. Рассматривалась область на поверхности эллипсоида WGS-84, ограниченная с Севера — параллелью $34^{\circ} 26,1385' S$, с Юга — параллелью $33^{\circ} 36,0405' S$, с Востока — меридианом $76^{\circ} 29,4684' W$, с Запада — меридианом $77^{\circ} 29,9348' W$. Далее выбирался шаг по широте и долготе таким образом, чтобы пространственное разрешение по ним было не хуже, чем 1 км (185,2 м). Фактическое пространственное разрешение составило 185,17 м по широте и 183,4 м по долготе. В итоге была сформирована сетка меридианов и параллелей, в каждом узле которой глубина акватории вычисляется по следующей формуле:

$$d = 10 + 30(\varphi - \varphi_s)^2 + 200(\lambda - \lambda_w),$$

где φ_s — широта южной границы района плавания;

λ_w — долгота западной границы района плавания.

Иными словами, глубина зависит квадратично от широты и линейно от долготы. Наименьшая глубина (10 м) достигается в юго-западной точке района плавания, наибольшая — в северо-восточной. При таком подходе каждой точке (φ, λ) акватории ставится в соответствие единственное значение глубины d . Вид подводной поверхности приведен на рис. 2.

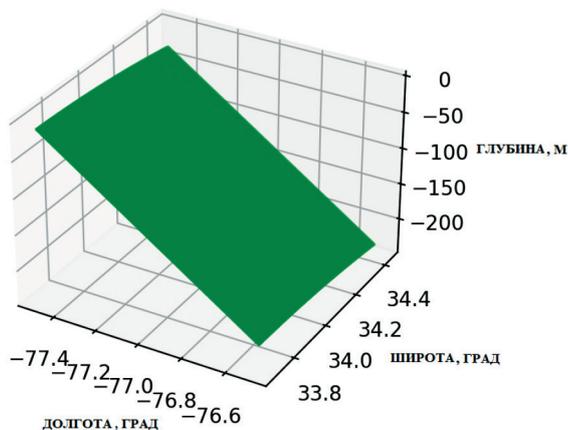


Рис. 2. Вид модельной поверхности рельефа дна

При движении вдоль меридиана глубина зависит квадратично от широты и при малом коэффициенте, учитывающем влияние долготы, возможно получение выборок, которые будут практически одинаковыми, но фактически соответствующими разным меридианам. Т. е. слабая зависимость рельефа от долготы предполагает наличие *неопределенности места по долготе*. При движении вдоль одного меридиана и слабой зависимости глубины от широты будет наблюдаться аналогичная ситуация в отношении *неопределенности места по широте*. Таким образом, коэффициенты модельной зависимости должны подбираться с учетом указанного обстоятельства.

Количество измерений глубин $p = 51$. Измерения выполняются в узловых точках, которые определены заранее с учетом желаемого пространственного разрешения. Предполагается, что гидрографическое судно (или любое другое с необходимым оборудованием) должно пройти каждую

точку и выполнить измерение глубины в ней. Вариантов обхода всех точек существует много, но для задачи батиметрической навигации важно, чтобы направление движения гидрографического судна совпадало с направлением движения судна в режиме определения места. Будем считать, что суда в заданном районе плавания движутся в основном в направлении вдоль меридианов на север. В таком случае и гидрографическое судно должно выполнять промеры в узловых точках, двигаясь вдоль меридиана. На основе этих промеров формируются последовательности, соответствующие движению на север. Схема будет «работать» и при движении в направлении на юг, если указанные последовательности рассматривать в обратном порядке. С учетом фактического разрешения по широте судно проходит 9258,5 м, набирая нужную последовательность глубин, которая впоследствии подается на вход нейронной сети, прогнозирующей его координаты.

Процедура обучения. Данная процедура была реализована в виде итерационного процесса, на каждом шаге которого определялась способность нейронной сети к прогнозу широты и долготы судна. В качестве критерия точности использовалось расстояние (модуль невязки) между прогнозируемой и эталонной точками, вычисленное вдоль геодезической линии, соединяющей указанные точки. Расстояние по геодезической линии определялось по формулам со средними аргументами. На каждом шаге работал алгоритм градиентной оптимизации (обучения) нейронной сети, в качестве которого использовался Adamax [19], представляющий собой модификацию алгоритма Adam. Параметры алгоритма использовались такие, которые были установлены по умолчанию в Keras на основе TensorFlow (v. 2.10.0). Размер минипакета был выбран равным десяти. Общее количество итераций равно 3000. Следует отметить, что алгоритм Adamax оптимизировал сеть на каждой итерации только в рамках одной эпохи.

Результаты (Results)

Было выполнено обучение нейронной сети с использованием языка программирования Python и библиотеки TensorFlow. Результаты представлены в табл. 1 в формате X/Y , где X — минимум наибольшего значения модуля невязки прогноза координат (в метрах), Y — номер итерации, на которой был зафиксирован указанный минимум. Наиболее точный результат выделен жирным шрифтом.

Таблица 1

Результаты обучения нейронной сети

Количество нейронов в каждом скрытом слое	Количество скрытых слоев				
	1	2	3	4	5
10	1135,6/2730	997,8/2709	985,9/2087	995,0/2294	917,2/2952
20	1090,7/2251	1014,2/2879	983,1/1952	911,6/2892	1004,3/2242
30	1178,1/436	1049,1/2998	1007,9/2978	1003,3/1114	929,1/2887
40	1213,2/2620	1043,7/1703	985,7/2035	980,1/2971	973,5/2851
50	1060,2/773	1066,9/961	987,2/1626	947,2/2405	974,8/2317
100	1124,7/2463	1068,9/1256	996,1/2957	992,8/1626	994,6/2200

После обучения нейронная сеть проходит тестирование, т. е. проверку работоспособности с использованием тех образцов, которые непосредственно не предъявлялись для ее обучения. Такие образцы могут появиться, когда судно идет между меридианами, на которых были выполнены предварительные промеры глубин. Более того, даже следуя точно вдоль исходного меридиана на стадии использования модели, судно не может выполнять промеры в точности в тех же точках, в которых их получало гидрографическое судно на стадии промеров. Наконец, в измерениях глубины могут присутствовать как погрешности, так и колебания уровня моря, приводящие к искажению входного сигнала нейронной сети — все зависит от того, насколько сеть чувствительна к этим эффектам.

Тестирование проводилось для двух случаев. В первом случае меридиан движения судна выбирался как средний по долготе между меридианами, на которых выполнялись виртуальные промеры, во втором — случайно по долготе из промежутка возможных значений для рассматриваемой акватории по закону равномерного распределения. Количество случайных меридианов составляет 1000.

Результаты тестирования нейронной сети

Количество нейронов в каждом скрытом слое	Количество скрытых слоев				
	1	2	3	4	5
10	1136,5/1228,4	1013,1/1037,0	1048,6/1116,8	1051,3/1134,9	932,0/1002,8
20	1090,6 /1112,2	1071,3/1100,1	1035,3/1155,8	982,1/ 984,6	1007,9/1178,5
30	1178,1/1178,3	1074,1/1054,1	1070,2/1098,6	1055,2/1123,2	972,8/1006,1
40	1213,2/1214,1	1066,8/1154,2	1041,0/1025,6	1048,5/1153,6	1043,4/1073,7
50	1069,6/1104,9	1066,8/1140,1	1005,9/1005,1	1010,4/1036,6	1023,9/1107,8
100	1124,7/1124,8	1068,7/1185,3	1042,8/1069,1	1062,9/1100,9	1000,7/1081,9

Результаты представлены в табл. 2 в формате X / Y , где X — наибольшее значение модуля невязки прогноза координат для средних меридианов (в метрах), Y — для случайных меридианов (в метрах). Жирным шрифтом выделен максимально точный результат.

Обсуждение (Discussion)

Результаты тестирования показывают, что нейронная сеть способна прогнозировать координаты места судна (широту и долготу) с хорошей для навигационных целей точностью. Наибольшая ошибка (для сети с четырьмя скрытыми слоями, содержащими по 20 нейронов) не превосходит 984,6 м для акватории размером примерно 50×50 морских миль. При указанных условиях область вероятного местонахождения судна составляет приблизительно $1,2 \cdot 10^{-5} \%$ от общей площади района плавания. Для других архитектур результаты отличаются в сторону ухудшения, но незначительно.

Лучшая архитектура нейронной сети устанавливается на основании данных, приведенных в табл. 2, следующим образом. Рассматривается наибольшее из пары чисел, приведенных в ячейках таблицы. Чем меньше указанный показатель, тем лучше результат, так как действительно он характеризует наихудшую точность во всех модельных ситуациях. Например, лучший результат (932 м) достигается для архитектуры с пятью скрытыми слоями, каждый из которых содержит по десять нейронов. Однако эти результаты получены для варианта, когда выбирались средние меридианы. Для случайного характера тестовых ситуаций результат хуже и составляет уже 1002,8 м, т. е. указанное число рассматривается как итоговый результат тестирования. Схожая ситуация наблюдается и для нейронной сети, содержащей пять скрытых слоев, каждый из которых содержит по 30 нейронов.

Сравнивая данные табл. 1 и 2, можно выделить две особенности. Первая особенность заключается в том, что архитектура, которая показала самый точный результат на этапе настройки, показала лучший результат и на этапе тестирования. Вторая особенность заключается в том, что наибольший максимум ошибки для некоторых архитектур (с одним скрытым слоем) оказался одинаковым на этапах настройки и тестирования. В принципе, в этом нет ничего странного, так как берется максимум невязки, а фактические ошибки могут быть различными. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что если двигаться вдоль средних меридианов, то изменения в точности прогноза координат не произойдет. При этом для варианта случайных меридианов отличия фиксируются в виде табличных результатов. При случайном рассмотрении меридианов точность, демонстрируемая нейронной сетью на этапе тестирования, как правило, хуже, чем при рассмотрении средних меридианов, хотя возникают и противоположные ситуации. Однако во всех случаях расхождение в точности незначительное с точки зрения задач навигации в прибрежном плавании и открытом море.

В используемой схеме тестирования предполагается, что судно может двигаться с некоторым отклонением от тех меридианов, которые использовались при проведении предварительных промеров. В действительности, может наблюдаться ситуация, когда судно в режиме эксплуатации проходит близко к «эталонным» (промерным) меридианам, но измерения глубины выполняет не в точности в тех точках, в которых это делало промерное судно. Дело в том, что интервал, через который вы-

полняются промеры в режиме навигации, не является постоянной величиной, так как судно перемещается со скоростью, отличной от скорости движения гидрографического судна, точнее этот интервал является функцией (через коэффициент) скорости собственного и гидрографического судна. Понятно, что двигаясь со скоростью, большей промерной, интервал измерений необходимо уменьшить, и наоборот. Конечно, скорости и, как следствие, интервал измерений глубин имеют определенные погрешности, причем без учета погрешностей часов. В случае если даже можно было бы пренебречь и погрешностями интервала измерений, то существует еще дополнительная ошибка моментов измерений, связанная с тем, что необходимо начать первое измерение глубины строго в той же точке, в которой находилось гидрографическое судно на стадии предварительных промеров. Данное требование представляется весьма затруднительным на практике, так как факт вхождения судна в зону батиметрической навигации может быть определен с конечной точностью.

Ввиду указанных причин измерения глубин в режиме использования батиметрической системы навигации будут выполняться не только на промежуточных меридианах, но и на промежуточных параллелях, что не учитывает предлагаемая схема тестирования. Конечно, для учета отклонений по широте необходима модель, основанная на конкретных значениях ошибок, которые могут наблюдаться в действительности. Следует также отметить, что выбранная модель рельефа дна имеет, возможно, слишком «идеализированный» характер, предполагающий монотонные изменения глубины как при движении вдоль меридиана, так и вдоль параллели. Однако для проверки идеи двумерной батиметрической навигации на данном этапе рассмотренная модель представляется достаточной.

Предложенный алгоритм определения места судна по глубинам предполагает движение судна на этапе его использования только либо вдоль меридианов, либо вдоль параллелей, т. е. в одном из взаимно перпендикулярных направлений. В принципе, одно из них можно повернуть на любой угол относительно истинного меридиана, но требования к перпендикулярности другого направления сохраняются. В связи с этим на этапе практической реализации необходимо нанесение таких районов на электронную навигационную карту с указанием направления движения, скорости промера, т. е. необходимо принятие новых условных обозначений. Направление промеров в общем случае может быть произвольным, но при этом резко увеличивается набор учебных данных и кроме того, на практике, как правило, маршруты движения судов пролегают вдоль генеральных прямых направлений.

Заключение (Conclusion)

Проведенное моделирование показало возможность использования нейронных сетей при решении задач батиметрической навигации для двумерного случая, наиболее часто встречающегося на практике. Однако использовалась модельная поверхность рельефа дна, которая отличается в общем случае от реалистичной. Поэтому после проверки работоспособности нейронной сети на модельных данных необходимо обратиться к реальным батиметрическим данным, содержащимся, например, в электронных навигационных картах и используемым в качестве инструмента современной электронной картографии на судах. Учитывая векторный формат данных указанных карт, получить массив глубин на их основе не составит большого труда. Возможно, для некоторых районов с характерным рельефом дна данную модель уже сейчас можно использовать без каких-либо видоизменений. Очевидно, некоторые участки дна будут иметь рельеф, непригодный для навигации по глубинам (простейший пример — идеально ровное плоское дно постоянной глубины). В связи с этим необходима разработка метода оценки пригодности подводного рельефа для задач навигации по эталонным данным — следует научиться оценивать потенциальную точность такой навигации на основе данных о глубинах, которые могут быть получены как из баз данных, включая электронные карты, так и являться результатом специально выполняемых промеров акватории, если имеющихся данных о глубинах недостаточно или они ненадежные. Однако в любом случае должно быть получено наибольшее значение погрешности, которое следует ожидать ввиду «неопределенности» формы рельефа на заданной акватории.

Актуальным также является направление, связанное с учетом различного рода факторов неопределенности при создании системы определения места судна по глубинам, к которым относятся: ошибки измерений глубины, скорости и времени; колебания уровня моря сгонно-нагонного и приливного характера, а также изменения рельефа во времени.

Кроме того, в дальнейшем должны быть исследованы вопросы выбора оптимальной архитектуры нейронной сети, решающей задачу батиметрической навигации. При этом оптимальность следует рассматривать в плане быстродействия, точности, скорости настройки, простоты аппаратной и программной реализации. Указанные критерии могут противоречить друг другу. Подобного рода вопросы являются традиционными для нейронных сетей, используемых для реализации прикладных задач, решение которых вряд ли возможно только теоретическими методами и потребует, скорее всего, проведения масштабных вычислительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюева С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Клюева, В. В. Завьялов. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. — 132 с.
2. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах: Аналитический обзор / О. А. Степанов. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. — 84 с.
3. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. — New Jersey: Pearson, 2009. — 936 p.
4. Hornik K. Some new results on neural network approximation / K. Hornik // Neural Networks. — 1993. — Vol. 6. — Is. 8. — Pp. 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.
5. Pinkus A. Approximation theory of the MLP model in neural networks / A. Pinkus // Acta Numerica. — 1999. — Vol. 8. — Pp. 143–195. DOI: 10.1017/S0962492900002919.
6. Schleiss M. Translating aerial images into street-map-like representations for visual self-localization of UAVS / M. Schleiss // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W13–2019. — Pp. 575–580. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-575-2019.
7. Танченко А. П. Алгоритм автономной коррекции навигационной системы беспилотного летательного аппарата на основе распознавания дорожной и речной сети / А. П. Танченко, А. М. Федулин, Р. Р. Бикмаев, Р. Н. Садеков // Гироскопия и навигация. — 2020. — Т. 28. — № 3 (110). — С. 32–42. DOI: 10.17285/0869-7035.0038.
8. Hou G. A Novel Underwater Simultaneous Localization and Mapping Online Algorithm Based on Neural Network / G. Hou, Q. Shao, B. Zou, L. Dai, Z. Zhang, Z. Mu, Y. Zhang, J. Zhai // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2019. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 5. DOI: 10.3390/ijgi9010005.
9. Harvey W. Direct Aerial Visual Geolocalization Using Deep Neural Networks / W. Harvey, C. Rainwater, J. Cothren // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — Is. 19. — Pp. 4017. DOI: 10.3390/rs13194017.
10. Ююкин И. В. Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 15. — № 3. — С. 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.
11. 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.
12. Ling Y. Active Bathymetric SLAM for autonomous underwater exploration / Y. Ling, Y. Li, T. Ma, Z. Cong, S. Xu, Z. Li // Applied Ocean Research. — 2023. — Vol. 130. — Pp. 103439. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103439.
13. Ma T. AUV Bathymetric Simultaneous Localisation and Mapping Using Graph Method / T. Ma, Y. Li, Y. Gong, R. Wang, M. Sheng, Q. Zhang // The Journal of Navigation. — 2019. — Vol. 72. — Is. 6. — Pp. 1602–1622. DOI: 10.1017/S0373463319000286.
14. Rui G. Cooperative localization and bathymetry-aided navigation of autonomous marine systems: thesis / G. Rui. — Singapore: National University of Singapore, 2019. — 175 p.
15. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.
16. Дерябин В. В. Нейросетевой метод определения места судна по рельефу дна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734.

17. Liang S. Why deep neural networks for function approximation? / S. Liang, R. Srikant // 5th International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1610.04161.

18. Mhaskar H. When and why are deep networks better than shallow ones? / H. Mhaskar, Q. Liao, T. Poggio // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. — 2017. — Vol. 31. — No. 1. — Pp. 2343–2349. DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10913.

19. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. J. Kingma, Ba // 3rd International Conference on Learning Representations. — 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

REFERENCES

1. Klyueva, S. F., and V. V. Zav'yalov. *Sintez algoritmov batimetriceskikh sistem navigatsii*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013.

2. Stepanov, O. A. *Metody otsenki potentsial'noi tochnosti v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh: Analiticheskii obzor*. Spb.: TsNII «Elektropribor», 1993.

3. Haykin, Simon. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. New Jersey: Pearson, 2009.

4. Hornik, Kurt. “Some new results on neural network approximation.” *Neural Networks* 6.8 (1993): 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.

5. Pinkus, Allan. “Approximation theory of the MLP model in neural networks.” *Acta numerica* 8 (1999): 143–195. DOI: 10.1017/S0962492900002919.

6. Schleiss, Michael. “Translating aerial images into street-map-like representations for visual self-localization of UAVs” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W13* (2019): 575–580. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-575-2019.

7. Tanchenko, A. P., A. M. Fedulin, R. R. Bikmaev, and R. N. Sadekov. “UAV Navigation System Autonomous Correction Algorithm Based on Road and River Network Recognition.” *Gyroscopy and Navigation* 28.3(110) (2020): 32–42. DOI: 10.17285/0869-7035.0038.

8. Hou, Guangchao, Qi Shao, Bo Zou, Liwen Dai, Zhe Zhang, Zhehan Mu, Yadong Zhang, and Jingsheng Zhai. “A novel underwater simultaneous localization and mapping online algorithm based on neural network.” *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.1 (2019): 5. DOI: 10.3390/ijgi9010005.

9. Harvey, Winthrop, Chase Rainwater, and Jackson Cothren. “Direct aerial visual geolocalization using deep neural networks.” *Remote Sensing* 13.19 (2021): 4017. DOI: 10.3390/rs13194017.

10. Yuyukin, Igor V. “Spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as the potential of cybernetic situational awareness.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.

11. 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.

12. Ling, Yu, Ye Li, Teng Ma, Zheng Cong, Shuo Xu, and Zhihui Li. “Active Bathymetric SLAM for autonomous underwater exploration.” *Applied Ocean Research* 130 (2023): 103439. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103439.

13. Ma, Teng, Ye Li, Yusen Gong, Rupeng Wang, Mingwei Sheng, and Qiang Zhang. “AUV bathymetric simultaneous localisation and mapping using graph method.” *The Journal of Navigation* 72.6 (2019): 1602–1622. DOI: 10.1017/S0373463319000286.

14. Rui, Gao. *Cooperative localization and bathymetry-aided navigation of autonomous marine systems*. Thesis. Singapore: National University of Singapore, 2019.

15. Deryabin, Victor V. “Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-179.

16. Deryabin, Victor V. “Neural network-based method for determining vessel position by seabed relief.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 723–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-723-734.

17. Liang, Shiyu, and Rayadurgam Srikant. “Why deep neural networks for function approximation?” *5th International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1610.04161.

18. Mhaskar, Hrushikesh, Qianli Liao, and Tomaso Poggio. “When and why are deep networks better than shallow ones?” *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Vol. 31. No. 1. 2017. 2343–2349. DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10913.

19. Kingma, Diederik P., and Jimmy Ba. “Adam: A method for stochastic optimization.” *3rd International Conference on Learning Representations*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.
Received: October 10, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36

MODERN DIGITAL HYDROGRAPHY AND THE NEW INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANISATION BATHYMETRIC SURVEY STANDARDS

Yu. G. Firsov

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

The current state of the International Hydrographic organization bathymetric survey Standards S44 (6.1.0) is examined in this study. The introduction of the S44 survey Standards fourth edition in 1998 heralded the beginning of a new era of modern digital hydrography based on the concept of the survey orders resulting from implementation of the Global Navigation Satellite Systems of positioning and hydrographic information systems. The fundamental changes between the 4th and 6th editions of the Standards for Hydrographic Surveys (S-44) are described. The differences between the 5th and 6th editions of the Standards for Hydrographic Surveys (S-44) are evaluated. Particular attention is paid to the conceptual evolution of such definitions as “bathymetric model” and “features detection”. The main new S44 (6.1.0) survey Standards paradigm became the concept of “bathymetric coverage” and the rejection of the “full sea floor coverage” concept which was introduced in the previous 5th edition. Introducing the “bathymetric coverage” and “feature search” notions in the 6th S44 (2022) survey Standards provides the possibility to avoid the implementation of such previously important hydrographic definition as “line spacing”. It is especially emphasized that the introduction and combined application of such definitions as “bathymetric coverage”, “feature detection” and “feature search” necessitate the usage in the 6th S44 (2022) survey Standards of the new special tool named “specification matrix”. This tool is important for hydrographic survey drafting taking into consideration the various stakeholder requirements as well as providing a short hydrographic survey description. The introduction of gridding concept in hydrography provided in the S44 (6.1.0) survey Standards for the first time is also mentioned. Critical comments on the interpretation of gridding methods provided in the annex D which are not considered as the part of the Standards are presented. Some recommendations concerning general quality control requirements and survey posteriori quality control provided in the annex C and B are also commented on. It should be especially emphasized that three last editions of S44 Standards use the “standard deviation” term without specifying its confidence level for position uncertainty (Total Horizontal Uncertainty — THU) calculation. The position uncertainty (2D) quantities are stated as “standard deviation” multiplied by coefficient 2.45. The “standard deviation” term needs additional explanation and clarification; it should not be confused with the widely used term «position standard deviation = distance root mean squared». It is also pointed out the insufficient study of the 3D hydrographic technology provisions presented in the 6th S44 survey Standards edition associated with the alternative method of sea level correction determination based on the precise ellipsoid (geodetic) heights measurements of the tide gauges benchmarks and chart datum using GNSS observations. The necessity of inclusion of the requirements for survey posteriori quality control as the result of survey data post-processing, using statistical comparison of check lines crossing the regular lines, is substantiated. Finally, the urgency of developing new Russian hydrographic standards and specifications based on IHO S44 (6.1.0) on the basis of modern technology is emphasized.

Keywords: Digital hydrography, IHO Standards for Hydrographic Surveys (S-44), bathymetric model, bathymetric coverage, standard deviation, uncertainty, Total Horizontal Uncertainty, Total Vertical Uncertainty, a priori uncertainty model, posteriori model, sea floor significant features, feature detection, feature search, specification matrix.

For citation:

Firsov, Yury G. “Modern digital hydrography and the new International Hydrographic Organization bathymetric survey Standards.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.

УДК 551.462.33(268)

СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ ГИДРОГРАФИЯ И ТРЕБОВАНИЯ НОВЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ДЛЯ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Ю. Г. Фирсов

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

Рассмотрены вопросы современного состояния и стандартизации батиметрической съемки, регламентируемые Международной гидрографической организацией. Отмечается, что четвертая редакция Стандартов S-44 явилась «революционной», ознаменовав собой начало эры современной электронной гидрографии, основанной на понятии «категорий съемки рельефа», обусловленной новыми возможностями глобальных навигационных спутниковых систем и электронных гидрографических информационных систем. Дана характеристика изменений, внесенных в Стандарт S-44, с 4-й (1998 г.) по 6-ю (2022 г.) редакции. Проанализированы основные отличия 5-й редакции (2008 г.) и уточненной 6-й версии редакции (2022 г.). Особое внимание уделено вопросу эволюции понятий «батиметрическая модель» и «обнаружение объектов». Указано, что основой новой парадигмы Стандартов S-44 является требование «батиметрического покрытия» и отказ от понятия «полное обследование морского дна», впервые введенного в 5-й редакции S-44. В результате введения понятий «батиметрическое покрытие» и «обнаружение объектов» в 6-й редакции S-44 впервые оказалось возможным отказаться от такого важного гидрографического параметра, как подробность промера («междугалсовое расстояние»). Подчеркивается, что совместное применение понятий «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» привело к необходимости использования в 6-й редакции S-44 такого нового инструмента для проектирования и формирования краткой характеристики съемки, как «матрица спецификаций». Отмечается, что в 6-й редакции S-44 впервые введено понятие «батиметрическая модель», связанное с гридом (регулярной сеткой глубин). Даны критические комментарии к сведениям об использовании сеточных батиметрических моделей, приведенных в приложениях, не являющихся частью S-44(б.1). Проанализированы предложения по формированию апостериорной модели неопределенностей результатов съемки рельефа дна, актуальной для площадной съемки с использованием многолучевых сонаров, необходимые для подтверждения выполнения заданной категории S-44. Указано, что в трех последних редакциях S-44 для оценки планового положения использован термин «стандартное отклонение» без конкретного указания связанной с ним доверительной вероятности. Это требует дополнительных пояснений и уточнений в части рекомендации, касающейся применения коэффициента 2,45 для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности. Обращается внимание на недостаточную проработку в 6-й редакции S-44 вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения высот нулей глубин в геоцентрической системе координат. Обоснована необходимость включения в последующую редакцию S-44 спецификаций по контролю качества результатов площадной батиметрической съемки. Отмечается отсутствие новых российских спецификаций выполнения гидрографических съемок, основанных на Стандартах S-44 Международной гидрографической организации, и необходимость их разработки, согласования и утверждения.

Ключевые слова: электронная гидрография, Стандарты S-44 МГО, батиметрическое покрытие, неопределенность изменений, априорные модели неопределенностей, апостериорные модели неопределенностей, существенные объекты на дне, поиск объектов, матрица спецификаций.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Современная цифровая гидрография и требования новых международных стандартов для батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.

Введение (Introduction)

Последнее десятилетие XX в. ознаменовано радикальным изменением гидрографических технологий благодаря внедрению в практику трехмерного высокоточного позиционирования на основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), многолучевых эхолотов (МЛЭ) и новых персональных компьютеров с графическими мониторами. Все это явилось основой для разработки электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС), определивших новое научно-прикладное направление — современную электронную гидрографию как один из разделов геоматики — научно-технического направления, объединяющего методы и средства интеграции информационных технологий сбора, обработки и использования пространственных данных, включая геоинформационные технологии [1].

Появление нового научно-практического направления — электронной гидрографии — потребовало нормативного обеспечения, исторически возложенного на Международную гидрографическую организацию, которая с 1968 г. занималась подготовкой специальных публикаций S-44 — стандартов на гидрографическую съемку. Первые три стандарта, появившиеся

в 1968, 1983 и 1988 гг., были во многом схожи, поскольку отражали уровень развития гидрографических технологий второй половины XX в. Однако появление в 1998 г. 4-й редакции Стандарта S-44 существенно изменило требования к гидрографической съемке, отражая новые возможности гидрографии, которая стала *электронной и цифровой*.

Стандарты на гидрографическую съемку Международной гидрографической организации (МГО) изначально не имели статуса нормативного документа, но формировали минимальные стандарты точности съемок, которые следовало выполнять государствам для подготовки навигационных морских карт (НМК) в целях обеспечения безопасности мореплавания в соответствии с требованиями Конвенции СОЛАС-74. В 4-й редакции Стандарта S-44 сделана первая попытка обобщить опыт использования новых средств и методов новой цифровой гидрографии. В этом документе были представлены новые парадигмы цифровой гидрографии, которые получили развитие в последующих редакциях Стандарта 2008 г. (5-я редакция), а также в 2020 и 2022 гг. (редакции 6.0.0 и 6.1.0).

Целью статьи является анализ основных положений последних трех редакций Стандартов S-44, исследование эволюции норм и рекомендаций, изложенных в этих документах, а также оценка новых изменений, которые появились в 6-й редакции Стандарта (сентябрь 2022 г.).

Выполненное исследование основано на изучении текстов трех редакций Стандартов S-44 и сопутствующих этим стандартам российских и зарубежных публикаций. Использован также личный опыт автора по эксплуатации многолучевых эхолотов с ЭГИС Нураск (фирма НУРАСК) и QINSy / Qimera (фирма Quality Positioning Services), включающий предоставление заказчику окончательных результатов в соответствии с требованиями 5-й редакции Стандарта S-44. Кроме того, учитывался опыт изложения основных положений Стандартов S-44 в процессе преподавания дисциплины «Гидрография» в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Предполагается, что анализ положений 6-й редакции Стандарта S-44 может быть полезен при подготовке нового отечественного нормативного документа по современной гидрографии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Отличительной особенностью современной гидрографии является ее международный характер, что связано с необходимостью создания различными государствами равноценных по точности и надежности НМК. Стремительное развитие средств и методов гидрографии, внедрение в практику современного мореплавания морских электронных карт определяют необходимость решения вопросов унификации требований при проведении гидрографических съемок. «Стандарты МГО на гидрографические съемки» (IHO Standards for Hydrographic Survey) выходят в виде специальной публикации МГО № 44 (Special Publication 44), более известной как документ S-44. Первое издание стандарта было опубликовано в 1968 г. с последующими переизданиями в 1982 г. (2-я редакция) и в 1987 г. (3-я редакция).

Необходимо отметить, что стандарты рассматривались исключительно как документы, применяемые на добровольной основе, содержащие общие рекомендации и определяющие минимальные требования к качеству проведения гидрографических съемок для стран — членов МГО, а также других стран, выполняющих данные работы в зонах своей ответственности. Предполагалось, что на основе стандартов МГО страны — члены МГО будут разрабатывать свои национальные стандарты выполнения гидрографических съемок, учитывающие специфические особенности акваторий и исторически сложившиеся методические особенности выполнения работ. Первые три редакции документа S-44 идеологически были во многом схожи, поскольку касались выполнения гидрографических съемок, направленных на создание НМК. При этом масштабы съемок увязывались с текущими потребностями судоходства, глубинами моря на основных судоходных трассах, а также доступными в то время средствами высокоточного определения координат при проведении гидрографических работ. В предыдущем издании стандарта S-44 (1987 г.) основное внимание было сосредоточено на классификации точностей для гидрографических съемок, проводимых для составления НМК.

В настоящее время существует осознание того, что пользователи гидрографических данных составляют намного более разнообразную и обширную по своему составу группу, чем представлялось ранее. На новом этапе научно-технического прогресса в области морской навигации и гидрографии в начале 90-х гг. XX в. возникла необходимость создания очередной 4-й редакции стандартов S-44. Для этого в 1993 г. была создана рабочая группа, состоящая из представителей тринадцати государств — членов МГО. Группе было поручено дать рекомендации для формирования новой редакции, учитывающей развитие новых спутниковых средств определения местоположения (Навстар / ГЛОНАСС), прогресс в создании мелководных многолучевых эхолотов и их внедрение в практику гидрографических работ, а также появление мощных и бюджетных компьютеров. В связи с этим в новых Стандартах S-44 (4-я редакция (1998 г.))¹ основной акцент сделан на оценке точности данных, полученных в результате проведения гидрографических работ, а также предоставления потенциальным пользователям метаданных, касающихся дополнительной разносторонней информации, позволяющей впоследствии использовать материалы гидрографических работ для других целей.

Главные нововведения 4-й редакции Стандартов S-44:

- обоснование четырех категорий (orders) гидрографической съемки;
- введение понятия *суммарной перенесенной ошибки* (Total Propagated Error (TPE));
- стандарты, в которых впервые был сформулирован вопрос о том, что с помощью суммарной перенесенной ошибки (СПО) необходимо охарактеризовать положение глубины на дне с учетом всех составляющих ошибок, включая также размер следа луча эхолота на дне;
- рекомендации по регистрации не только результатов съемки, но и оценки точности получаемых величин на уровне 95 %-й доверительной вероятности;
- введение принципа 100 %-го обследования дна;
- введение понятия *обнаружения объектов на дне*;
- наличие рекомендации по регистрации метаданных съемок и их представлению в цифровой форме совместно с результатами съемки.

Главным отличием 4-й редакции Стандартов S-44 явилось введение категорий гидрографических съемок в зависимости от важности района их проведения для безопасности надводного мореплавания. В зависимости от категории съемки устанавливались точность определения планового положения глубины на морском дне и точность исправленной глубины. При этом, в отличие от более ранних редакций Стандартов S-44, в 4-й редакции полностью исключалась зависимость между *точностью гидрографических измерений* и *масштабом съемки*. Все гидрографические съемки разделены на четыре категории в соответствии с предполагаемыми пользователями получаемой информации. Данная редакция определяла для каждой из указанных категорий точность планового положения (на 95 %-м уровне доверительной вероятности), точность глубин (на 95 %-м уровне доверительной вероятности), соблюдение требования 100 %-го обследования дна, способность системы съемки по обнаружению подводных объектов, потенциально опасных для навигации (экзогенных и техногенных), и максимальную подробность промера (для съемки с однолучевыми эхолотами).

Неопределенность измерения глубины была разделена на две составляющие: *постоянную* и *переменную* (зависящую от глубины), а точность глубины следовало понимать как *точность исправленной глубины*. При этом полагалось, что все источники погрешностей должны быть изучены и определены поправки, исключающие систематические ошибки, а точность полученных поправок должна быть учтена при получении СПО (TPE). В табл. 1, являющейся основой 4-й редакции Стандартов S-44, в краткой форме изложены основные требования к точностным характеристикам четырех нормированных категорий гидрографической съемки и приведена основополагающая формула для расчета допустимых ошибок.

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 4th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 1998. 23 p.

Введение 4-й редакции Стандарта S-44 активно обсуждалось в зарубежной специальной литературе [1]–[3], а также в отечественных публикациях [4], [5]. В частности, в публикации [5] отмечается, что рекомендации по точности исправленных глубин по S-44 (1998 г.) в 2 раза выше, чем в отечественном нормативном документе ПГС-4, ч. 2, а также производных руководящих документах (РД)¹ и Своде правил по инженерно-геодезическим изысканиям для строительства (СП)². Дополнительная информация по этому вопросу приводится в работе [6].

В ряде публикаций отмечен ряд недостатков новых Стандартов S-44 (1998 г.), к которым можно отнести следующие.

1. Большинство новых терминов, использованных в тексте S-44 (1998 г.), не были четко определены.

2. Введено понятие «батиметрическая модель», но не показан ее смысл, отсутствует методика создания и использования.

3. В составе данных съемки рекомендовалось регистрировать априорные и апостериорные погрешности. Формирование априорных погрешностей было понятно большинству специалистов, ознакомившихся с публикацией [7], однако методика получения апостериорных погрешностей глубин осталась без разъяснения.

4. Пояснения по пересчету погрешностей положения с 63 %-м уровнем доверительной вероятности в погрешность положения с 95 %-м уровнем доверительной вероятности отсутствовали.

5. Не определен состав метаданных съемки.

В S-44 (1998 г.) отмечено, что гидрографические съемки выполняются для широкого круга задач, не связанных с обеспечением безопасности мореплавания (издания НМК), но требования необходимой точности исправленных глубин для этих участников морской деятельности не представлены.

Термин «СПО» (ТРЕ) не был конкретизирован, что привело к его неоднозначному толкованию как априорной оценки точности планового и высотного положения отметки глубины на дне, рассчитанного на основе составляющих погрешностей на уровне 95 %-й доверительной вероятности. При этом подразумевалось, что грубые погрешности измерений устранены, систематические ошибки отсутствуют, а случайные погрешности подчиняются нормальному закону распределения. Учет влияния систематических ошибок в Стандарте S-44 не рассматривался. Отмечалась необходимость выполнения контрольных галсов, но сравнение глубин в точках пересечения основных и контрольных галсов не было нормировано. Ряд терминов Стандарта S-44 (1998 г.) был приведен без детализации и комментариев, а ссылки на Гидрографический словарь МГО (специальная публикация S-32)³ не могли помочь ввиду отсутствия в нем новой терминологии.

В Стандарте S-44 (1998 г.) не удалось учесть всех тех преимуществ, которые предоставляет современная площадная съемка рельефа дна. Использование МЛЭ было представлено в самом общем виде без конкретных рекомендаций и пояснений. В частности, остались нераскрытыми такие вопросы, как ширина полосы обзора, необходимое перекрытие смежных полос обзора, совместное использование МЛЭ и гидролокатора бокового обзора (ГБО), а также применение авиационных лазерных батиметрических систем (LIDAR).

Введение 4-й редакции Стандарта S-44 явилось значительным событием в цифровой гидрографии. Новая концепция, связанная с введением категорий *съемки и отказ от сопоставления точности планового положения глубин с масштабом планшета*, несомненно, открыла новую веху для всех направлений гидрографической деятельности. Следует отметить, что многочисленные национальные нормативные документы, касающиеся разных сторон гидрографической деятельности, появившиеся в начале XXI в., использовали эту новую концепцию.

¹ РД 31.74.04–2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. Ростов н /Д, 2004. 154 с.

² СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Ч. III: Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства». М.: ФГУП «ПНИИИС», 2004. 106 с.

³ Hydrographic Dictionary. Part 1. Volume 1. English. Special Publication No 32. 5th Edition. Monaco, 1994. 280 p.

Работа над новой 5-й редакцией Стандарта S-44 началась в 2006 г. Для создания проекта была сформирована рабочая группа в составе 32 экспертов. В сентябре 2007 г. в Финляндии было проведено очередное заседание рабочей группы и принят проект, который был разослан всем странам — членам МГО с целью внесения замечаний и предложений. Первоначально предполагалось, что новая редакция S-44 (2008 г.) должна давать указания для выполнения гидрографических работ не только в целях составления морских карт, но и для обеспечения другой морской деятельности, однако эти надежды не оправдались. В действительности, S-44 (2008 г.) по-прежнему представлял собой стандарт для съемок только в интересах безопасности надводного мореплавания, о чем было сразу заявлено¹. По сравнению с 4-й редакцией в Стандарт S-44 (2008 г.) были внесены следующие существенные изменения:

1) ликвидирована 3-я категория съемки для районов с глубинами свыше 200 м; количество категорий съемки сохранено (четыре), но первая категория S-44 (1998 г.) была разделена на две: *Ia* и *Ib*. Для категории *Ia* предусмотрено полное обследование дна, для категории *Ib* данное требование отсутствует;

2) особая категория съемки, в отличие от категории *Ia*, не связана с характеристикой донного грунта, потенциально опасного для судов в случае касания дна;

3) в дополнение к термину СПО (TPE) введено подразделение суммарной перенесенной неопределенности на плановую (*Total Horizontal Uncertainty (THU)*) и высотную (*Total Vertical Uncertainty (TVU)*). При этом термин *Error* (ошибка) заменен новым термином *Uncertainty*;

4) в 5-й редакции S-44 был введен Словарь (*Glossary*), поясняющий используемую терминологию. В дальнейшем термины планировалось включить в публикацию МГО S-32²;

5) были введены два приложения: прил. А «Руководство по контролю качества» и прил. В «Руководство по обработке данных», которые в дальнейшем планировалось включить в учебник по гидрографии МГО — публикация M-13 (C-13, 2011 г.)³. Ряд ранее использованных в S-44(4) понятий получили четкие объяснения. Упомянутый в S-44 (1998 г.) термин «batimетрическая модель» (*Bathymetry Model*) был сохранен, но его взаимосвязь с известным термином «цифровая модель рельефа» (DTM) не была раскрыта. При этом появился новый важный термин: *Uncertainty Surface* (поверхность неопределенностей), в пояснении к которому впервые было использовано понятие «грид».

В табл. 1 данного исследования, которая является сутью проекта 5-й редакции Стандарта S-44 (2008 г.), в сжатой форме представлены основные требования к точностным характеристикам новых четырех категорий гидрографической съемки. Комментарии к 5-й редакции Стандарта S-44 даны в работе [8].

Комментарии по S-44 (2008 г.) и их сравнение с национальными нормативными гидрографическими документами были представлены в работах [8] [9]. В целом в 5-й редакции Стандартов, как отмечается в работе [8], особое внимание акцентировано на следующих вопросах:

1. 5-я редакция является «компромиссным» вариантом который, как правило, возможен, когда рабочая группа включает специалистов, имеющих разные подходы к решению новых проблем.

2. Впервые в гидрографический обиход была введена международная земная система отсчета ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), однозначно связанная с WGS84, а также рекомендовано фиксировать нули глубин в этой геоцентрической системе координат.

3. Больше внимание было уделено использованию МЛЭ. Для этого отдельно выделена категория *Ia* с требованием полного обследования дна, но при этом отсутствовали различия между категориями *Ia* и особой категорией по опасности, которое дно представляет для судов. В 4-й редакции S-44 отмечалось, что особая категория предполагает «жесткое дно», а категория *Ia* — «мягкое дно» (песок, глина, ил).

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 5th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 p. DOI: 10.25607/OBP-1354.

² Hydrographic Dictionary. Part 1. Volume 1. English. Special Publication No 32. 5th Edition. Monaco, 1994. 280 p.

³ Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p. https://www.deparentis.com/wp-content/uploads/2020/04/IHO-Manual-on-Hydrography-1st-edition-February-2011-C-13_e1.0.0_ENG.pdf.

Таблица 1

**Основные требования к точностным характеристикам четырех категорий Стандарта S-44 (2008 г.).
Минимальные стандарты на гидрографические съемки¹**

Текст стандарта	Категория	Особая	Ia	Ib	2
Гл. 1	Описание районов	Районы, где глубина под килем имеет критическое значение	Районы с глубиной менее 100 м, где глубины под килем менее важны, но могут быть объектами, представляющие опасность для надводного мореплавания	Районы с глубинами менее 100 м, в которых глубины под килем не представляют опасности тому виду надводного мореплавания, который ожидается в этом районе	Районы с глубинами обычно более 100 м, где общее описание dna считается отвечающим требованиям
Гл. 2	Максимально допустимая ТНУ с 95 %-м уровнем доверительной вероятности	2 м	5 м + 5 % глубины	5 м + 5 % глубины	20 м + 10 % глубины
§ 3.2, примечание 1	Максимально допустимая TVU с 95 %-м уровнем доверительной вероятности	$a = 0,25$ м $b = 0,0075$	$a = 0,5$ м $b = 0,013$	$a = 0,5$ м $b = 0,013$	$a = 1,0$ м $b = 0,023$
Словарь терминов	Полное обследование dna	Требуется	Требуется	Не требуется	Не требуется
§ 2.1, 3.4, 3.5, примечание 3	Обнаружение объектов	Кубические объекты более 1 м	Кубические объекты более 2 м на глубинах до 40 м; 10 % глубины на глубинах более 40 м	Не применяется	Не применяется
§ 3.6, примечание 4	Рекомендуемое максимальное междугалсовое расстояние	Не определяется, необходимо полное обследование dna	Не определяется, так как требуется полное обследование dna	Три средних глубины или 25 м в зависимости от того, какое значение больше. Для лидаров интервал между точками 5 × 5 м	Четыре средних глубины
Гл. 2, примечание 5	Определение места стационарных СНО* и топографии, значимой для навигации (на 95 %-м уровне доверительной вероятности)	2 м	2 м	2 м	5 м
Гл. 2, примечание 5	Определение места береговой линии и топографии, менее значимой для навигации (на уровне 95 %-й доверительной вероятности)	10 м	20 м	20 м	20 м
Гл. 2, примечание 5	Среднее положение плавучих СНО* (на уровне 95 %-й доверительной вероятности)	10 м	10 м	10 м	20 м

*СНО — средства навигационного оборудования (Aids to Navigation).

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication № 44. 5th Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. С. 15.

4. Установлена максимальная глубина 40 м для особой категории, а также невозможность достижения 100 %-го акустического покрытия дна для двух категорий: *особой* и *Ia*, при использовании МЛЭ. Тем самым подтверждалась необходимость обязательного использования наряду с новейшими акустическими средствами площадного обследования гидрографического траления наиболее ответственных участков акватории (порты, причалы, подходные каналы с лимитирующими глубинами и т. п.).

5. Взамен параметра TPE (S44/4) вводилась TPU и дополнительно два других: THU и TVU. Однако при этом отсутствовали рекомендации по методике определения величин апостериорных оценок THU и TVU.

6. Введение категории съемки *Ib* решало вопрос возможности выполнения съемки рельефа с МЛЭ без «полного» акустического покрытия с расстоянием между краями полос обзора не более трех глубин.

7. В S-44 (2008 г.) впервые отмечалась важность таких мероприятий, как калибровка оборудования, сбор данных, проверочные процедуры (*Qualification Procedures*), формирование практического опыта гидрографа (*Surveyors' Skill*). Однако рекомендации по этим мероприятиям не были представлены.

8. В 4-й и 5-й редакциях Стандарта S-44 оставался нерешенным вопрос относительно правильного пересчета оценки точности планового положения в виде «стандартного отклонения» (*Standard Deviation*) с 63 %-м уровнем доверительной вероятности для перехода к оценке точности планового положения глубины на дне в виде THU (суммарной плановой *неопределенности*) с 95 %-м уровнем доверительной вероятности. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [10], а более детальные пояснения даны в разделе «Обсуждение» данной работы.

9. Во введении к 5-й редакции S-44 указано, что в Стандартах МГО должны фиксироваться *минимальные стандарты для выполнения съемки рельефа дна*, а национальные гидрографические службы должны разрабатывать *спецификации для съемки*, которые позволят обеспечивать достижение стандартов для каждой из категорий. С развитием гидрографических технологий спецификации могут изменяться, но минимальные стандарты будут неизменны в течение длительного периода времени.

Таким образом, 5-я редакция Стандарта S44 явилась конструктивным документом, отражающим достигнутый к 2008 г. уровень развития электронной гидрографии, и использовалась в качестве стандартов для гидрографических съемок в интересах создания морских навигационных карт до 2020 г. Основные положения Стандартов S-44 (2008 г.) использовались автором в процессе преподавания дисциплины «Гидрография» в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и были включены в учебные издания [11], [12].

Рассмотрим примечания 1–5 к табл. 1, выполненные в авторском переводе (выделены автором курсивом):

1. *Учитывая, что существуют как постоянные, так и зависящие от глубины неопределенности, влияющие на неопределенность глубин, для вычисления максимально допустимой TVU на уровне 95 %-й доверительной вероятности должна использоваться приведенная формула, в которую для вычисления максимально допустимой TVU для некоторой глубины необходимо ввести значения a и b , приведенные в табл. 1 для каждой категории съемки, а также глубину d :*

$$\pm \sqrt{a^2 + (b \times d)^2},$$

где a — величина, выражающая ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины;

b — коэффициент, выражающий ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины, d — глубина;

$b \times d$ — величина, выражающая ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины.

2. *В целях обеспечения гарантированной минимальной безопасной глубины под килем по всему району для особой и Ia категорий съемки может быть использован правильно настроенный механический трал (Mechanical Sweep).*

3. Кубический объект означает правильный куб с ребрами одинаковой длины. Необходимо отметить, что в качестве минимальных требований для особой и 1а категорий съемки требуется обеспечить обнаружение кубических объектов с размерами 1 м и 2 м соответственно. В определенных обстоятельствах гидрографическая служба / организация может считать необходимым определять объекты меньших размеров для минимизации риска необнаружения опасности для надводной навигации. Для категории 1а ослабление критерия обнаружения объектов до глубины 40 м отражает максимальные ожидаемые осадки судов.

4. Междугалсовое расстояние может быть увеличено, если использованы процедуры по соблюдению надлежащего обеспечения плотности глубин. Параметр «максимальное междугалсовое расстояние» должен быть интерпретирован в следующем виде: междугалсовое расстояние для съемки с однолучевым эхолотом или расстояние между использованными внешними границами полосы обзора систем площадной съемки.

5. Прим. 5 относится только к измерениям, необходимым для съемки.

В 2011 г. текст из приложений S-44 был включен в гл. 2 обновленного Руководства по гидрографии МГО С-13¹.

В сентябре 2020 г. МГО выпустила новую 6-ю редакцию стандартов на гидрографические съемки S-44 (версия 6.0) и в 2022 г. — уточненный вариант (версия 6.1), в который были внесены незначительные уточнения².

В 6-й редакции S-44 (2022 г.) было внесено много новшеств, которые не только уточнили и конкретизировали отдельные положения предыдущих двух редакций, но и ввели ряд существенных изменений, которые можно охарактеризовать в качестве новых парадигм современной электронной гидрографии.

Основные нововведения 6-й редакции S-44 (2022 г.) сводятся к следующему.

1. В отличие от двух предыдущих редакций S-44, положения которых носили рекомендательный характер, в новой 6-й редакции выделены императивные уровни: «должен» (*Must*), означающий обязательное требование; «следует» (*should*) — рекомендуемое действие, а также «может» (*may*) как возможное, но не обязательное действие. Таким образом, частично меняется ранее существовавший рекомендательный характер Стандартов S-44 МГО, приближая их к нормативному документу МГО.

2. Введена новая, более строгая категория съемки, названная «эксклюзивной» (*Exclusive Order*), которая расширяет применимость Стандартов. Данная категория предназначена для критических для навигации районов, таких как порты, гавани и подходные каналы с минимальным запасом воды под килем и в случае, когда характеристики дна наиболее опасны для судов. В таких районах Стандарт устанавливает максимально возможную точность глубин и особые требования обследования дна. Такая категория ранее уже использовалась в национальных стандартах шведской гидрографии.

3. Определено новое понятие «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*), определяющее степень обследования района с использованием систематического метода измерения глубин. Данная величина основана на сочетании выбранной схемы обследования с теоретически рассчитываемой областью акустического освещения дна (пятна облучения) и обнаружения объектов с помощью применяемого исследовательского оборудования. Величина батиметрического покрытия выражена в процентах.

4. С понятием батиметрическое покрытие тесно связана новая концепция 6-й редакции S-44³ (2022 г.), заключающаяся в отказе от назначения величины междугалсового расстояния для категорий 1b и 2 согласно Стандарту S-44 (2008 г.), а также условия, в соответствии с которыми батиметрическое покрытие (в %) используется для всех четырех категорий съемки. При этом для категорий 1b и 2 батиметрическое покрытие может быть существенно меньше 100 %, но не менее 5 %. Для категории 1а не требуется обязательного 100 %-го батиметрического покрытия, для особой категории и категории 1а может составлять 100 %.

¹ Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p.

² ИНО Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

³ Там же.

Особым случаем является *эксклюзивная категория*, для которой предусмотрено батиметрическое покрытие до 200 %. При этом в качестве примера в п. 3.5.2 приведена модель расчета батиметрического покрытия для промера с ОЛЭ, имеющего угол характеристики направленности 8–12°. Полученный результат составил 5,1 %. Подтверждается, что 100 %-е *батиметрическое покрытие* следует понимать как «полное» и не отождествлять с понятием «полное акустическое освещение дна», которое, согласно Стандарту S-44 (2008 г.), для современных средств площадной съемки рельефа не может составлять 100 %.

5. Концепция *батиметрического покрытия* имеет еще один актуальный аспект, связанный с практикой использования съемки по первой категории. Если для заданного района съемка выполняется с использованием средств площадного обследования, а характер рельефа и глубины не требуют обязательного 100 %-го *батиметрического покрытия*, то при съемке по категории *1a* расстояние в плане между зарегистрированными местами измерения глубин не должно превышать величину более трех глубин или быть 25 м в зависимости от того, что больше (см. п. 3.5.2 6-й редакции S-44¹).

6. Понятие *батиметрического покрытия* совмещено с двумя другими актуальными параметрами: обнаружение объектов (*Feature Detection*) и поиска объектов (*Feature Search*). Для категории *1a* может быть предусмотрен 100 %-й поиск объектов с применением гидролокатора бокового обзора, однако при этом независимая батиметрическая система должна обеспечить определение наименьших глубин над существенными объектами, обнаруженными на дне. Рекомендуется выполнять 100 %-й поиск объектов совместно со 100 %-м *батиметрическим покрытием*, где это практически возможно. Эти комплексные требования по проектированию и выполнению съемок для удовлетворения нужд различных участников морской деятельности привели к введению в шт. 6.1 S-44² нового понятия — *матрица спецификаций*.

7. В 6-й редакции Стандарта S-44 семь глав и четыре приложения. В новую редакцию включены главы: «Съемки над высотным уровнем» (*Surveys Above the Vertical Datum*), «Метаданные» (*Metadata*) и «Матрица спецификаций» (*Specification Matrix*).

Глава «Съемки над высотным уровнем» содержит рекомендации по трехмерному позиционированию «небатиметрических» объектов, актуальных для безопасности навигации в соответствии с заданными категориями съемки. При этом, в отличие от предыдущих редакций Стандарта S-44, следует применять заданные неопределенности их планового и высотного положения. Следует отметить, что для береговой линии (*coastline*) нормирование *неопределенности* ее высотного положения (СВН) не применяется. Детальные сведения по позиционированию небатиметрических объектов приведены в табл. 2 Стандартов S-44. В главе «Метаданные» представлен примерный минимальный перечень метаданных, которыми рекомендуется сопровождать результаты съемок. Также гидрографическим службам рекомендуется создавать собственные документы с расширенным перечнем метаданных по результатам съемок.

8. В седьмой главе 6-й редакции Стандартов S-44 вводится концепция *матрицы спецификаций* (*Specification Matrix*). Это новый инструмент для оптимизации и настройки разных категорий съемок. Матрица позволяет выбирать набор критериев как для батиметрических параметров, так и для других типов данных, которые регистрируются и предоставляются в процессе гидрографической съемки. Матрица вводится для обеспечения гибкости в постановке задачи и оценки результатов съемки, учета потребностей различных потребителей и приспособления к вновь появляющимся технологиям. В Приложение D включено руководство по использованию *матрицы спецификаций*. В гл. 7 содержится также табл. 1 «Минимальные батиметрические стандарты на гидрографические съемки в целях безопасности мореплавания», которая в авторском переводе с английского языка включена в данную работу в виде табл. 2. Более подробная информация и комментарии к табл. 1–3 6-й редакции Стандартов S-44 (версия 6.1.0.), включая пояснения по матрице спецификации, приведены в работе [13].

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² Там же.

Таблица 2

Минимальные батиметрические стандарты на гидрографические съемки в целях безопасности мореплавания (п. 7.3¹)

СВН: (англ. TVU) использована формула $TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$,

где a — параметр, который выражает ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины;

b — это коэффициент, который выражает ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины;

d — глубина.

Стандарты МГО ²	Критерии	Категория 2	Категория 1b	Категория 1a	Особая категория	Эксклюзивная категория
Гл. 1	Описание районов (обобщенное)	Районы, в которых общее описание морского дна считается достаточным	Районы, в которых глубина под килем не представляет проблемы для того вида надводного судоходства в данном районе	Районы, в которых глубина под килем не рассматривается как крайне важная, но в которых могут находиться объекты, способные представлять опасность для надводного судоходства	Районы, в которых глубина под килем имеет критически важное значение	Районы с критическими минимальными глубинами под килем и критериями маневренности
П. 2.6	ТНУ глубины, м + % глубины	20 м + 10 % глубины *Ba5, Bb2	5 м + 5 % глубины *Ba8, Bb3	5 м + 5 % глубины *Ba8, Bb3	2 м *Ba9	1 м *Ba10
П. 2.6, п. 3.2, п. 3.2.3	Компоненты a , m , и b , TVU глубины	$a = 1,0$ м $b = 0,023$ *Bc7, Bd4	$a = 0,5$ м $b = 0,013$ *Bc8, Bd6	$a = 0,5$ м $b = 0,013$ *Bc8, Bd6	$a = 0,25$ м $b = 0,0075$ *Bc10, Bd8	$a = 0,15$ м $b = 0,0075$ *Bc12, Bd8
П. 3.3	Обнаружение объектов в м или в % глубины	Не установлено	Не установлено	Кубические объекты > 2м, на глубинах до 40 м; 10 % глубины на глубинах больше 40 м *Be5, Bf3 — более 40 м	Кубические объекты > 1 м *Be6	Кубические объекты > 0,5 м *Be9
П. 3.4	Поиск объектов, %	Рекомендовано, но не требуется	Рекомендовано, но не требуется	100 % *Bg9	100 % *Bg9	200 % *Bg12
П. 3.5	Батиметрическое покрытие, %	5 % *Bh3	5 % *Bh3	≤ 100 % *≤ Bh9	100 % *Bh9	200 % *Bh12

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² Там же.

9. В 6-й редакции Стандартов S-44 дан обновленный словарь терминов — глоссарий (Glossary). Особо следует отметить терминологию, касающуюся оценки точности, в соответствии с новыми принципами международной метрологии [16]. Аналогично 5-й редакции для оценки точности планово-высотного положения используется термин «неопределенность» (*uncertainty*). При этом уточняется, что неопределенность является оценкой (*estimate*) истинного значения величины, которая дается на заданном уровне доверительной вероятности. Для СГН (THU) и СВН (TVU) задан уровень 95 %.

В 5-й редакции Стандартов S-44 не рекомендован к использованию термин «ошибка» (*error*). Однако в 6-й редакции он вновь используется, при этом уточняется, что ошибки могут быть *случайными* и *систематическими*. Также необходимо отметить, что в глоссарии отсутствуют такие термины, как *precision* (точность) и *accuracy* (аккуратность). Последний термин пока еще используется в недавних публикациях МГО¹. Отсутствует также такое актуальное для гидрографии понятие и термин, как «грубая ошибка глубин» (*blunder*).

10. 6-я редакция Стандартов S-44 предполагает *нормальное распределение ошибок*, при котором *неопределенность позиции* рассчитывается как коэффициент 2,45, умноженный на *стандартное отклонение* (*Standard Deviation*). При этом в Стандартах S-44 не указывается, на каком уровне доверительной вероятности рассчитано это «стандартное отклонение» (позиции), и отсутствует формула расчета. В зарубежной практике для оценки точности двумерного положения используются разные меры точности с соответствующими уровнями доверительной вероятности. Принятой в Российской Федерации мерой точности оценки местоположения по ГНСС, получаемой на основе параметров предложения \$GPGST [14] протокола NMEA, является *среднеквадратическое радиальное отклонение*, представляющее собой аналог DRMS (*Distance Root Mean Square*). Для измерений в физике и геодезии, а также гидрографии двумерная оценка DRMS тождественна *Standard Deviation*. Мера точности местоположения DRMS имеет доверительную вероятность 63 %. Подробнее этот вопрос рассмотрен в разделе «Обсуждение» данной статьи.

11. 6-я редакция Стандартов S-44 предлагает своеобразную трактовку априорной и апостериорной оценки точности батиметрической съемки. Информация по контролю точности содержится в прил. В «Руководящие указания по управлению качеством», прил. С «Руководство по априорному и апостериорному контролю качества», а также прил. D «Аспекты батиметрии, связанные с регулярными сетками (гридами)». Данные приложения не являются неотъемлемой частью Стандартов S-44 и предполагается, что будут удалены в последующих редакциях, когда содержащаяся в них информация войдет в публикацию С-13 МГО «Руководство по гидрографии»².

12. Расчеты априорной оценки точности батиметрической съемки, известные как *модель неопределенностей*, включены практически во все ЭГИС при настройке системы, необходимые для обработки данных МЛЭ в соответствии с технологией CUBE [15]. Алгоритмы расчета априорной модели неопределенностей изложены в работах [7] и [11].

10. Вопрос об апостериорной оценке точности батиметрической съемки, приведенной в прил. В, предполагает использование специального «тестового» полигона — участка дна с детальной цифровой моделью рельефа, которая будет использоваться для сравнения с *батиметрической моделью-сеткой*, полученной в результате выполненной съемки. При этом использование глубин контрольных галсов для последующего их сравнения с поверхностью *батиметрической модели-сетки* (грида), полученной по результатам обработки данных съемки на основных галсах, в тексте 6-й редакции в прил. В вообще не рассматривается.

11. В прил. D. Gridded Bathymetry Considerations, в авторском переводе «Аспекты батиметрии, связанные с *сеточными моделями* (гридами)», впервые в гидрографии введен термин *grid* (сеточная модель или регулярная сетка) и дана новая трактовка понятия «батиметрическая модель-сетка» (*Gridded Bathymetric Model*).

¹ S-67. Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC). Edition 1.0.0. International Hydrographic Organization, 2020. 22 p.

² Manual on Hydrography. Publication C-13. 1st Edition. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2011. 539 p.

12. Установление взаимосвязи высот уровней нулей глубин с топографическими высотными уровнями и высотами геоцентрической системы координат имеет актуальное значение в современной электронной гидрографии. В 5-й редакции S-44 этому вопросу посвящен п. 4.1, в котором было установлено требование, в соответствии с которым высоты нулей глубин должны быть связаны с нулем топографической системы высот, а реперы уровенных постов иметь геодезическую высоту в используемой геоцентрической системе координат ITRS (WGS84). В 6-й редакции Стандартов S-44 эти вопросы кратко и изложены только в п. 2.4 и не связаны с технологией альтернативного варианта определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезической высоты реперов уровенных постов и нулей глубин с помощью ГНСС. Данный вопрос более конкретно рассмотрен в разделе «Обсуждение».

13. В 6-й редакции Стандартов S-44 вновь отмечается, что гидрограф, являясь важным участником процесса съемки, должен обладать достаточными знаниями и опытом, чтобы иметь возможность эксплуатировать съемочную систему в соответствии с требованиями данных стандартов. Впервые об этом было заявлено во введении 5-й редакции Стандартов S-44. В 6-й редакции требования в части подготовки гидрографов получили дальнейшее развитие. В том числе отмечается необходимость получения установленных компетенций и знаний в этой области согласно требованиям образовательных программ категории *A* и / или *B*, разработанных Международным советом по стандартам компетентности для гидрографов-геодезистов и морских картографов (IBSC), Международной гидрографической организацией (ИНО), Международной федерацией геодезистов (FIG), а также Международной картографической ассоциацией (ICA).

Обсуждение (Discussion)

Прежде всего следует отметить высокую преемственность основных положений 5-й и 6-й редакций Стандартов S-44 МГО, однако при этом имеются также существенные различия, главными из которых является введение новой «эксклюзивной» категории съемки (*Exclusive Order*), а также таких новых понятий, как «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*).

В результате введения новых понятий: «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*FEATURE DETECTION*) в 6-й редакции S-44 впервые оказалось возможным отказаться от такого ранее важного для гидрографии параметра, как «подробность промера», или «междугалсовое расстояние» (*Line Spacing*). Понятие «батиметрическое покрытие» в 6-й редакции Стандартов S-44 введено взамен ранее применяемого в пятой редакции S-44 (2008 г.) понятия «полное обследование морского дна» (*Full Sea Floor Search*). При этом не рекомендовалось использовать термины «100 %-е акустическое освещение» (*100 % ensonification*) и «100 %-е батиметрическое покрытие» (*100 % Bathymetric Coverage*). В 6-й редакции термин «батиметрическое покрытие» восстановлен, но смысл его изменился и теперь он означает *степень обследования поверхности дна акватории*, задаваемой в %. Это понятие оказало большое влияние на интерпретацию применения первой категории съемки.

Использование понятия «батиметрическое покрытие» позволило отказаться от жесткой увязки съемки по первой «*a*» категории с требованием «полного» (приближающегося к 100 %) акустического освещения дна. Теперь для съемки по *1a* категория «батиметрическое покрытие» может составлять не более 100 %, а для съемки категории *1b* — менее 100 % при условии, что расстояния между отметками глубин на дне не будут составлять более трех глубин, либо 25 м (что больше). При этом для съемок с ОЛЭ «батиметрическое покрытие» не должно составлять менее 5 %. Для съемок *особой категории* предусматривается батиметрическое покрытие 100 %, а для эксклюзивной категории — 100 %-е батиметрическое покрытие, которое может включать две взаимно пересекающиеся системы основных галсов.

Совместное применение таких понятий, как «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» (*Feature Search*) обусловило возможность также целесообразность использования в 6-й редакции Стандартов S-44 нового инструмента в виде «матрицы спецификаций»

(*Specification Matrix*). Идея применения такого инструмента заключается в поддержке процесса проектирования съемки для задач, отличных от создания морских навигационных карт, и формировании краткой характеристики съемки для представления заказчику. Текст 6-й редакции Стандартов S-44 содержит подраздел «Описание матрицы и правила работы с матрицей спецификаций» с отступлениями от принятой в 5-й редакции Стандартов, включая установку о том, что спецификации должны разрабатываться национальными гидрографическими службами на основе Стандартов S-44. Применение «матрицы спецификаций» не является обязательным требованием 6-й редакции Стандартов, и реальная практика применения в ближайшие годы докажет ее эффективность. Попытки создания универсальных стандартов, пригодных для нормирования съемок в самых разных целях, отличных от съемок для создания морских навигационных карт, являются несостоятельными. Более подробный и детальный анализ применения «матрицы спецификаций» в 6-й редакции Стандартов представлен в работе [13].

В 6-й редакции Стандартов S-44 впервые «узаконено» использование батиметрических моделей, создаваемых на основе регулярных сеток глубин (*Gridded Bathymetric Models*), а в прил. D показана методология их создания и использования, а также приведены основные термины и определения. Учитывая, что указанное приложение не является частью данных стандартов и его планируется позже включить в Руководство по гидрографии МГО, представленные тексты следует существенно доработать, приведя их в соответствие с имеющимся гидрографическим программным обеспечением. При этом в прил. D следует четко разграничить применение цифровых моделей рельефа дна (ЦМР) в реальном масштабе времени, используемое в большинстве ЭГИС для оперативного контроля качества работы многолучевых сонаров и ЦМР, которые создаются на этапе постобработки и окончательной обработки данных многолучевых сонаров для получения конечного продукта съемки.

В режиме реального времени ЦМР используются исключительно на основе регулярных сеток глубин (гридов), а при окончательной обработке используются как гриды, так и нерегулярные сетки. В течение последних двадцати лет такими фирмами, как Quality Positioning Services (QPS), Teledyne CARIS (Computer Aided Resources Information System), EIVA, НУРАСК и др., созданы специализированные пакеты гидрографических программ для оперативного и окончательного создания батиметрических моделей. Поэтому Руководство по гидрографии МГО должно включать не только теоретические сведения по батиметрическим моделям в виде регулярных сеток глубин (гридов), но и их практическую реализацию в различных гидрографических информационных системах. В этой связи следует также отметить своеобразные предложения 6-й редакции Стандартов S-44 по формированию апостериорной модели неопределенностей результатов съемки рельефа дна, изложенные в прил. B и актуальные для площадной съемки с использованием многолучевых сонаров. Предлагается апостериорную модель неопределенностей съемки рельефа оценивать на основе сравнения батиметрических моделей выполненной съемки с тестовой батиметрической моделью заранее созданного полигона, на котором была выполнена детальная площадная съемка рельефа. Данный метод, известный как «эксплуатационный тест» (*Performance Test*), используется при выполнении мелководной площадной съемки и рекомендуется в Руководстве по инженерной гидрографии корпуса военных инженеров США (US ACE)¹. Описание эксплуатационного теста приведено также в [11]. Этот метод является полезным и необходимым инструментом, который, как правило, применяется для проверки качества функционирования системы с МЛЭ и проводится перед началом съемок, а также при замене оборудования.

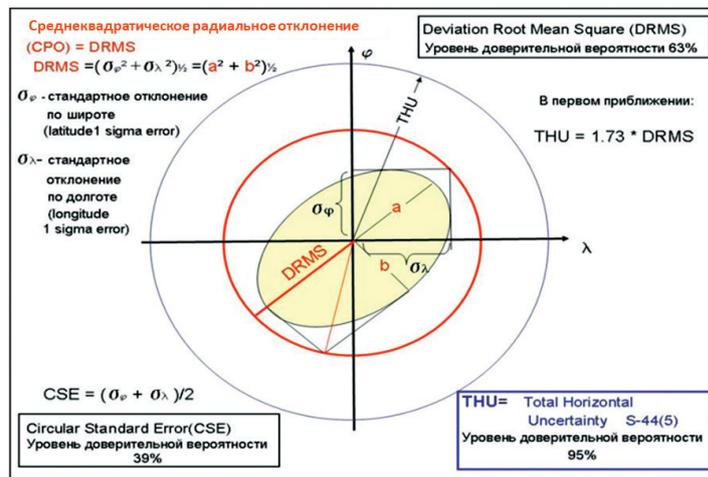
В ЭГИС НУРАСК имеется специальный программный модуль для автоматизации проведения эксплуатационного теста и установления гидрографической ширины полосы обзора мелководного МЛЭ [11]. Однако он не может заменить традиционный для гидрографии метод получения апостериорной модели неопределенностей съемки рельефа, каким является *статистическая обработка результатов сравнения глубин основных и контрольных галсов*. Такая статистическая обработка авто-

¹ Engineering and Design. Hydrographic Surveying. EM 1110-2-1003. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, 2013. 700 p.

матрирована в большинстве ЭГИС (например, НУРАС, CARIS HIPS, Qimera) и отражена в качестве нормы в большинстве национальных гидрографических стандартов, спецификациях и руководствах по использованию многолучевых эхолотов для морских исследований [17]–[20], а также отечественном нормативном документе «Правила гидрографической службы» № 4, ч. 2 применительно к промеру с ОЛЭ. Отсутствие в 6-й редакции Стандартов S-44 упоминания о необходимости выполнения контрольных галсов является очевидным упущением, которое необходимо исправить в последующих редакциях.

В трех последних редакциях Стандартов S-44 при оценке планового положения используется термин «стандартное отклонение» (*Standard Deviation*) без конкретного указания доверительной вероятности. На практике обычно используется «стандартное отклонение позиции», называемое *среднеквадратическим радиальным отклонением* (CPO), являющееся аналогом зарубежной меры точности Distance Root Mean Square (DRMS), имеющее доверительную вероятность в пределах 63–68 %. Расчет точного значения доверительной вероятности позиции, оцениваемой стандартным отклонением, основан на соотношении полуосей среднеквадратического эллипса погрешностей a и b . Эти величины для конкретной спутниковой обсервации содержатся в строке NMEA — xxGST.

Для пересчета оценки точности позиции от стандартного отклонения к неопределенности позиции с 95 %-й доверительной вероятностью может быть использован коэффициент k , рассчитываемый на основе соотношения b/a . При $b/a = 1$ $k = 1,73$, а при $b/a = 0,1$ $k = 1,95$. Этот вопрос подробно исследован в табл. 4.14 (см. Мореходные таблицы (MT-2000). Адм. № 9011. — СПб.: ГУНиО, 2002. — 576 с.), а также в работах [10] и [16], в которых рассмотрена оценка точности спутниковой обсервации по ГНСС, а также дано обоснование для расчета суммарной горизонтальной неопределенности (THU) на основе использования значения CPO при $b/a = 1$. На приведенной схеме показаны различные меры точности для расчета планового положения с их доверительными вероятностями, используемые в зарубежной практике.



Расчет точности планового положения с 95 %-м уровнем доверительной вероятности на основе CPO [10]

Отметим, что только при использовании меры точности в виде Circular Standard Error (CSE): круговой стандартной ошибки с уровнем доверительной вероятности 39 %, может быть использована формула

$$THU = 2,45 \cdot CSE = 2,45 (\sigma_x + \sigma_y) / 2. \quad (1)$$

Кроме того, CSE не может рассматриваться в качестве стандартного отклонения при оценке позиции, поскольку имеет доверительную вероятность, равную 39 %. В российской практике вместо CSE используется CPO — аналог зарубежной оценки DRMS. При этом формула для расчета неопределенности позиции в виде THU для частного случая $b/a = 1$ примет вид

$$\text{THU} = 1,73\text{DRMS} = 1,73 \cdot (\sigma^2x + \sigma^2y)^{1/2}. \quad (2)$$

Использование формулы (2) рекомендовано при расчете THU для общего случая, когда $b/a < 1$ неудобна и лучше применять формулу (1). Расчет величины априорной суммарной горизонтальной неопределенности глубин на дне, базирующийся на основе данных МЛЭ, основанный на алгоритмах работы [7] с использованием меры точности позиции, в соответствии с формулой (1), автоматизирован в программе AMUST (Apriori Multi-beam Uncertainty Simulation Tool)¹.

Таким образом, приведенная в п. 2.7 6-й редакции Стандартов S-44 рекомендация по применению коэффициента $k = 2,45$ для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности на основе использования величины стандартного отклонения² требует дополнительного пояснения и уточнения. Целесообразно указать в глоссарии, что *имеется в виду стандартное отклонение позиции, рассчитываемое на основе осреднения стандартных отклонений по широте и долготе* или привести формулу (1). Следует отметить, что в Гидрографическом словаре МГО³ термин *Standard Deviation* применительно к оценке позиции отсутствует, а при обсуждении терминов, связанных с оценкой точности, нигде не упоминается их доверительная вероятность и не приводятся формулы, использующие в качестве аргументов величины σ_x и σ_y .

Кроме того, в 6-й редакции стандартов S-44 следует также отметить недостаточную проработку вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения высот нулей глубин в геоцентрической системе координат. В 5-й редакции Стандартов S-44 этот вопрос рассмотрен в п. 4.1, в котором установлено требование о том, чтобы высоты нулей глубин были связаны с нулем топографической системы высот, а реперы уровенных постов имели геодезическую высоту в используемой геоцентрической системе координат ITRS (WGS84).

В Стандартах S-44 (2022 г.) вопрос определения поправок уровня рассмотрен только в п. 2.4 Vertical Reference Frame, который в авторском переводе сформулирован следующим образом: *«Если высотный компонент местоположения привязан к местному высотному датуму, следует указывать название и эпоху этого датума (системы отсчета). Высотный компонент местоположения (например, глубин, высот осушки) следует привязывать к такой системе отсчета высот, которая подходит для конкретного типа данных и их предполагаемого использования. Эта система отсчета высот может основываться на наблюдениях за приливами (это может быть LAT, MWL и т. д.) на физической модели (например, геоид) или на референц-эллипсоиде»*.

Данный пункт не содержит конкретных указаний по альтернативному определению поправок уровня. Следует рекомендовать определение на уровенных постах разности высот поверхностей нуля глубин и моделей геоида. Получение этого параметра является основой альтернативного метода вычисления поправок уровня, реализованного в большинстве современных ЭГИС. Достигнуты дециметровые точности получения высоты геоида на основе региональных и глобальных моделей. Возможная точность определения геодезических высот реперов уровенных постов на основе фазовой двухчастотной многосистемной аппаратуры ГНСС с использованием технологий PPP (*Precise Point Positioning*) также составляет 0,1–0,2 м. Таким образом, в настоящее время появляются новые технологические возможности альтернативного определения поправок уровня, свидетельствующие о начале эры трехмерной (3D) гидрографии.

Следует констатировать отсутствие новых российских спецификаций выполнения гидрографических съемок, основанных на Стандартах S-44 МГО, и необходимость их разработки, согласования и утверждения. Главным недостатком использования устаревших правил выполнения гидрографической съемки, в соответствии с ПГС-4⁴, является точность глубин и координат, осно-

¹ Work instruction V3.0.0 for AMUST. Version 3.0.0. Rijkswaterstaat, 2018. 61 p.

² IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

³ Hydrographic Dictionary [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iho-ohi.net/S32/> (дата обращения: 10.07.2023).

⁴ Правила гидрографической службы №4. Съемка рельефа дна. Ч. 2: Требования и методы. Изд. Министерства обороны СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1984. 264 с.

ванная на 63 %-й доверительной вероятности, а Стандарты S-44 МГО¹ предписывают представление результатов съемки с 95 %-й доверительной вероятностью. Таким образом, требования к точности в Стандартах S-44 в два раза выше заданных в ПГС-4. В новом документе следует принять концепцию категорий съемки, создание модели погрешностей, принципы контроля качества площадной съемки и формирования метаданных. Работы по подготовке нового документа ПГС-4 уже проводились 10 лет назад, однако результирующий итоговый документ не был утвержден в качестве нормативного.

Разработку новых национальных стандартов следует считать приоритетной задачей российской гидрографии, а до их введения в части точности предоставляемых результатов съемки целесообразно руководствоваться требованиями и нормами Стандартов S-44 МГО (2022 г.). Отсутствие нового ПГС-4 не позволяет дать правильную оценку гидрографических работ, выполненных на трассах СМП, которые в перспективе планируются для международного использования. Высокоширотные маршрутные коридоры в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море целесообразно выполнять в соответствии с требованиями категории *Ia* Стандартов S-44 МГО. Эти вопросы рассмотрены в работе [21]. Следует отметить, что первая попытка создания национальных стандартов на выполнение гидрографических работ реализована в 2023 г. в виде ГОСТа 70750–2023², анализ и оценка которого выходят за рамки данной статьи.

Выводы (Summary)

В результате выполненного анализа 5-й и 6-й редакции S-44 можно сделать следующие выводы:

1. 5-я и 6-я редакции Стандартов S-44 МГО имеют большую преемственность основных положений, однако выявлены и существенные различия, главными из которых является введение новой *исключительной* категории съемки (*Exclusive Order*), а также новых понятий, таких как «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*).

2. В результате введения новых понятий: «батиметрическое покрытие» (*Bathymetric Coverage*) и «обнаружение объектов» (*Feature Detection*) в 6-й редакции Стандартов S-44 впервые появилась возможность отказаться от такого важного гидрографического параметра, как «междугалсовое расстояние» (*Line Spacing*).

3. Использование понятия «батиметрическое покрытие», задаваемого в %, позволяет отказаться от строгой увязки съемки по первой категории *a* с требованием «полного» (приближающегося к 100 %) акустического освещения дна. Теперь для съемки по категории *Ia* батиметрическое покрытие может составлять не более 100 %, а для съемки категории *Ib* — менее 100 % при условии, что расстояния между отметками глубин на дне не будут более трех глубин либо 25 м (в зависимости от того, что больше). При этом для съемок с ОЛЭ батиметрическое покрытие не должно составлять менее 5 %.

4. Совместное применение понятий: «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов» (*Feature Search*), привело к необходимости использования в 6-й редакции Стандартов S-44 такого нового инструмента для проектирования съемки и формирования краткой характеристики съемки, как «матрица спецификаций» (*Specification Matrix*). Текст 6-й редакции S-44 стандартов содержит подраздел описания матрицы и правила работы с матрицей спецификаций, нарушая принятую в 5-й редакции установку о том, что спецификации должны разрабатываться национальными гидрографическими службами на основе Стандартов S-44.

5. В трех последних редакциях Стандартов S-44 для оценки планового положения используется термин «стандартное отклонение» без указания доверительной вероятности и формулы расчета этой величины на основе известных значений стандартных отклонений по широте

¹ IHO Standards for Hydrographic Surveys (6.1.0 Edition). S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2022. 43 p.

² ГОСТ Р 70750–2023. Гидроэлектростанции. Гидротехнические сооружения. Подводно-техническое обследование состояния гидротехнических сооружений и примыкающих к ним участков неукрепленного русла. Нормы и требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 62 с.

и долготе. На практике для оценки планового положения в качестве *стандартного отклонения позиции* повсеместно используется мера точности в виде СРО (DRMS), что приводит к неоднозначности рекомендации применения коэффициента $k = 2,45$ для расчета величины суммарной горизонтальной неопределенности.

6. В 6-й редакции Стандартов S-44 в прил. D впервые узаконено использование батиметрических моделей, создаваемых на основе регулярных сеток глубин (*Gridded Bathymetric Models*), а в приложении D показана методология их создания и использования, а также основные термины и определения. Учитывая, что прил. D не является частью стандартов и его планируется в дальнейшем включить в Руководство по гидрографии МГО, представленные тексты следует существенно доработать, приведя их в соответствие с имеющимся гидрографическим программным обеспечением.

7. Следует отметить недостаточную проработку в 6-й редакции Стандартов S-44 вопросов, связанных с альтернативным способом определения поправок уровня на основе высокоточного определения геодезической высот реперов уровенных постов и нулей глубин с использованием прецизионных ГНСС-обсерваций в геоцентрической системе координат, также известных в специальной зарубежной гидрографической литературе, как RTK-tide.

8. Для апостериорной оценки качества результатов батиметрической съемки предлагается использовать тестовый полигон, а результаты постобработки с применением статистического анализа на основе сравнения глубин основных и контрольных галсов, применительно к заданной категории съемки, в 6-й редакции S-44 вообще не упоминаются. Этот очевидный недостаток стандартов необходимо исправить при подготовке очередной редакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wells D. E. IHO S44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data / D. E. Wells, D. Monahan // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2001. — No. 60. — Pp. 31–39.

2. Monahan D. Variable errors and fixed boundaries: the role of deep echo-sounding in the United Nations Convention on Law of the Sea (UNCLOS) / D. Monahan // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2001. — No. 59. — Pp. 17–23.

3. MacPhee S. B. S-44 And Multibeam Echosounding / S. B. MacPhee, R. Hare // Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association. — 2003. — No.64. — Pp. 11–16.

4. Фирсов Ю. Г. Стандарты современной гидрографии и российские нормативные документы на выполнение гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов в акваториях морских и речных портов, на трассах Севморпути, по внутренним водным путям: материалы всероссийского семинара (Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.) / ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — С. 28–34.

5. Фирсов Ю. Г. К вопросу о нормативных документах для выполнения гидрографических работ / Ю. Г. Фирсов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 97–107.

6. Фирсов Ю. Г. Анализ нормативных документов отечественной инженерной гидрографии / Ю. Г. Фирсов, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2012. — № 4. — С. 46–50.

7. Hare R. Depth and Position Error Budget for Multibeam Echosoundings / R. Hare // International Hydrographic Review. — 1995. — Vol. LXXII. — No. 2. — Pp. 37–69.

8. Фирсов Ю. Г. Пятая редакции международного Стандарта на гидрографические съемки S-44 Международной Гидрографической Организации / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 1 (51). — С. 39–44.

9. Alkan R. M. Evaluation of Recent Hydrographic Survey Standards / R. M. Alkan, N. O. Aykut // Proc. of the 19th International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. — Bulgaria, Sofia, 2009. — Pp. 116–130.

10. Фирсов Ю. Г. Обоснование требований к оценке точности площадной съемки в соответствии с пятой редакцией Стандарта S-44 МГО / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2 (52). — С. 42–46.

11. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров: учеб. пособие. / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.

12. Фирсов Ю. Г. Гидрографическое обеспечение морских изысканий: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 235 с.
13. Зубченко Э. С. Новая редакция Стандарта S-44 Международной гидрографической организации / Э. С. Зубченко // Записки по гидрографии. — 2021. — № 312. — С. 38–64.
14. Фирсов Ю. Г. Контроль качества трехмерного позиционирования в электронной гидрографии / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3 (57). — С. 34–39.
15. Calder B. R. Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data / B. R. Calder // International Hydrographic Review. — 2003. — Vol. 4. — No. 1. — Pp. 53–68.
16. Гарматенко И. С. Международные стандарты оценки точности навигационной информации / И. С. Гарматенко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — Т. 6. — № 8. — С. 863–866.
17. Hydrographic Survey Specifications and Deliverables. — Office of Coast Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021. — 154 p.
18. Standards for hydrographic surveys. — Edition 4. — Canadian Hydrographic Service, 2021. — 15 p.
19. Guidelines for the use of multibeam echosounders for offshore surveys. — Rev.2. — IMCA S003, July 2015. — 54 p.
20. HYSPEC—Contract Specifications for Hydrographic Surveys. — Version 2.0. — New Zealand: New Zealand Hydrographic Authority, 2020. — 64 p.
21. Фирсов Ю. Г. Задачи батиметрической съемки и картографического обеспечения высокоширотных трасс Северного морского пути в Восточно-Сибирском море / Ю. Г. Фирсов, Д. А. Позенкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 744–766. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-744-766.

REFERENCES

1. Wells, David E., and David Monahan. “IHO S44 Standards for Hydrographic Surveys and the Variety of Requirements for Bathymetric Data.” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 60 (2001): 31–39.
2. Monahan, David. “Variable errors and fixed boundaries: the role of deep echo-sounding in the United Nations Convention on Law of the Sea (UNCLOS).” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 59 (2001): 17–23.
3. MacPhee, Stephen B., and Rob Hare. “S-44 And Multibeam Echosounding.” *Lighthouse: Journal of the Canadian Hydrographic Association* 64 (2003): 11–16.
4. Firsov, Yu. G. “Standarty sovremennoi gidrografii i rossiiskie normativnye dokumenty na vypolnenie gidrograficheskikh rabot.” *Navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie uslovii plavaniya sudov v akvatoriyakh morskikh i rechnykh portov, na trassakh Sevmorputi, po vnutrennim vodnym putyam: materialy vserossiiskogo seminaru*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2005. 28–34.
5. Firsov, Yu. G. “K voprosu o normativnykh dokumentakh dlya vypolneniya gidrograficheskikh rabot.” *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 97–107.
6. Firsov, Yu. G., and I. V. Menshikov. “Specification documents analysis of the domestic engineering hydrography.” *Geodesy and Cartography* 4 (2012): 46–50.
7. Hare, Rob. “Depth and Position Error Budget for Multibeam Echosoundings.” *International Hydrographic Review* LXXII.2 (1995): 37–69.
8. Firsov, Yu. G. “5th edition of the international standard for hydrographic mapping S-44 of the International Hydrographic Organization (based on the materials from foreign sources).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2008): 39–44.
9. Alkan, Reha Metin, and N. Onur Aykut. “Evaluation of Recent Hydrographic Survey Standards.” *Proc. of the 19th International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*. Bulgaria, Sofia, 2009. 116–130.
10. Firsov, Yu. G. “Justification of the requirements to the evaluation of the accuracy of the areal mapping in accordance with the 5th edition of the S-44 standard of the International Hydrographic Organization.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(52) (2008): 42–46.
11. Firsov, Yu. G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2010.
12. Firsov, Yu. G. *Gidrograficheskoe obespechenie morskikh izyskanii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

13. Zubchenko, Eduard S. “Novaya redaktsiya Standarta S-44 Mezhdunarodnoi gidrograficheskoi organizatsii.” *Zapiski po gidrografii* 312 (2021): 38–64.
14. Firsov, Yu. G. “Kontrol’ kachestva trekhmernogo pozitsionirovaniya v elektronnoi gidrografii.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(57) (2009): 34–39.
15. Calder, Brian R. “Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data.” *International Hydrographic Review* 4.1 (2003): 53–68.
16. Garmatenko, I. S. “International standards of the assessment of accuracy of navigation information.” *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 6.8 (2013): 863–866.
17. *Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*. Office of Coast Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
18. *Standards for hydrographic surveys*. Edition 4. Canadian Hydrographic Service, 2021.
19. *Guidelines for the use of multibeam echosounders for offshore surveys*. Rev.2. IMCA S003, July 2015.
20. *HYSPEC–Contract Specifications for Hydrographic Surveys*. Version 2.0. New Zealand: New Zealand Hydrographic Authority, 2020.
21. Firsov, Yury G., and Daria A. Pozenkova. “The tasks for bathymetric investigations and cartographic support of the northern sea high latitude routes in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 744–766. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-744-766.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 3 декабря 2023 г.
Received: December 3, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54

MAP-AIDING OF THE ADDITIONAL SECONDARY FACTORS ISOSURFACE BY THE SPLINE APPROXIMATION METHOD AS A CONDITION OF IMPROVING THE E-LORAN OBSERVATIONS ACCURACY

I. V. Yuyukin

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

The benefit of the Loran ground-based radio navigation system as an alternative to global navigation satellite systems is argued. The motivation of searching for a duplicate variant is caused by the necessity to ensure the reliability of positioning as a subject of countering spoofing and jamming risks when implementing the concept of cybernetic awareness on water transport. Hypothetically, the possibility of using e-Loran on the Northern Sea Route as a backup navigation system is considered. The experience of operating pilot projects of the enhanced Loran in the issue of the predicted potential of positioning accuracy is analyzed. The optimal method of compensation for the system error of geolocation based on the use of additional secondary factors is investigated. Taking into account the principle of the d-Loran functional, based on comparing the measured values of the radio signal passage delay with published analogues for transmitting clarifications to marine consumers, the necessity of using integrity as a criterion for a confidence assessment of the navigation information processing reliability has been determined. A critical analysis of the attempts effectiveness to use the linear interpolation method to calculate intermediate representative values of the delay in the radio signal transmission in order to simulate the map of additional secondary factors is performed. The hypothesis of the prospects for the isosurface corrections synthesis based on B-spline approximation is put forward. The South Korean experiment of synthesizing a chart of additional secondary factors with measured indicators of the radio signal propagation time delay in nanoseconds from the Pohang transmitting station has been repeated at the correct algorithmic level. In order to demonstrate the practical feasibility of the spline algorithm, a computer visualization of a cartographic fragment of additional secondary factors of Yongil Bay is performed. It is suggested that three-dimensional representation of the additional secondary factor for situational perception by the Officer on watch of map-aided correction as a process in alternative positioning in order to increase the reliability of location control through visual evaluation of proper use of corrections of the e-Loran differential variant. The prospect of using the developed package of applied Pascal-programs with implementations on display-type monitors as intellectual support for decision-making by the navigator in a posteriori assessment of the observation accuracy due to the visual representation of the correction field is noted.

Keywords: spoofing, jamming, cybernetic awareness, additional secondary factors, the criterion of integrity, map-aided correction.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Map-aiding of the additional secondary factors isosurface by the spline approximation method as a condition of improving the e-Loran observations accuracy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

УДК 656.61.052

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ИЗОПОВЕРХНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВТОРИЧНЫХ ФАКТОРОВ МЕТОДОМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ КАК УСЛОВИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБСЕРВАЦИЙ E-LORAN

И. В. Ююкин

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

Аргументировано предложение в пользу наземной радионавигационной системы e-Loran в качестве альтернативы глобальным навигационным спутниковым системам. Мотивация поиска дублирующего варианта вызвана необходимостью обеспечения надежности позиционирования как предмета противодействия

спуфинговым и джамминговым рискам при реализации концепции кибернетической осведомленности на водном транспорте. Гипотетически рассмотрена возможность использования e-Loran на трассе Северного морского пути в качестве резервной навигационной системы. Проанализирован опыт эксплуатации пилотных проектов усовершенствованного Loran в вопросе прогнозируемого потенциала точности позиционирования. Исследован оптимальный способ компенсации системной погрешности геолокации на основе использования дополнительных вторичных факторов. С учетом принципа функционала d-Loran, основанного на сравнении измеренных значений задержки прохождения радиосигнала с опубликованными аналогами для передачи уточнений морским потребителям, определена необходимость применения целостности как критерия доверительной оценки надежности обработки навигационной информации. Выполнен критический анализ результативности попыток применения метода линейной интерполяции для вычисления промежуточных репрезентативных значений задержки прохождения радиосигнала с целью имитационного моделирования карты дополнительных вторичных факторов. Выдвинута гипотеза перспективности синтеза изоповерхности поправок на основе B-сплайновой аппроксимации. Реализован повтор на корректном алгоритмическом уровне южнокорейского эксперимента синтезирования карты дополнительных вторичных факторов с измеренными показателями хронометражной задержки распространения радиосигнала в наносекундах от передающей станции Пхохан. С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма выполнена компьютерная визуализация картографического фрагмента дополнительных вторичных факторов залива Йонгиль. Выдвинуто предположение о целесообразности трехмерного представления дополнительного вторичного фактора для ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации с коррекцией по карте как процесса в альтернативном позиционировании с целью повышения надежности контроля местоположения за счет визуального оценивания правильности использования поправок дифференциального варианта e-Loran. Отмечается перспектива применения разработанного пакета прикладных паскаль-программ с реализациями на мониторах дисплейного типа в качестве интеллектуальной поддержки принятия решений судоводителем при апостериорной оценке точности обсервации за счет наглядности визуального представления поля поправок.

Ключевые слова: спуфинг, джамминг, кибернетическая осведомленность, дополнительные вторичные факторы, критерий целостности, коррекция по карте.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Картографирование изоповерхности дополнительных вторичных факторов методом сплайн-аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Loran / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

Введение (Introduction)

Несмотря на высокую точность глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в конце первой четверти XXI в. не считаются достаточно надежным средством для использования без резервного копирования в качестве единственного варианта позиционирования и хронометража для критически важных навигационных применений [1]. Проект e-Loran представляется наилучшим техническим решением, позволяющим обеспечить оптимальное дублирование ГНСС. Усовершенствованный Loran является новейшей разработкой в серии низкочастотных навигационных систем дальнего действия. В ответ на уязвимости GPS проект e-Loran эволюционировал от предшественника как модернизированная трансформация ресурсов Loran-C. Прогрессивное развитие улучшает Loran-C за счет усовершенствования оборудования, надежности передаваемого сигнала и рабочих процедур. Инновации позволяют e-Loran обеспечивать более высокую производительность и точность определения места судна по сравнению с Loran-C, а также характеризуют новую систему как резервный вариант спутниковой навигации в морских приложениях.

Система e-Loran соответствует набору мировых стандартов и функционирует полностью независимо от GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou или других ГНСС. Приемник e-Loran каждого морского пользователя будет устойчиво функционировать во всех регионах, где предоставляется такая услуга. Приемники e-Loran работают автоматически при минимальном участии пользователя, передачи синхронизируются с идентифицируемым, публично сертифицированным источником Всемирного координированного времени (Universal Time Coordinated — UTC), полностью независимым от ГНСС методом. Это позволяет поставщику услуг e-Loran работать в масштабе времени, синхронизиро-

ванном с временными шкалами ГНСС, но работающим независимо от них. Синхронизация с общим источником времени также позволяет приемникам использовать гибридную комбинацию сигналов спутников и e-Loran в качестве потенциального инструмента передачи национального времени. Принципиальным отличием e-Loran от традиционного Loran-C является добавление канала передачи данных к передаваемому сигналу, что позволяет передавать на приемник пользователя исправления, предупреждения и информацию о целостности сигнала, относящиеся к конкретному приложению. Именно этот канал передачи данных позволяет e-Loran быть конкурентоспособным GPS.

Международные дискуссии относительно концепции электронной навигации сформировали надежную систему определения местоположения в качестве одного из важнейших компонентов. Известно, что ГНСС обладают узвимостями, а бортовые альтернативы, такие как инерциальные системы, имеют ограничения. В ситуации поиска реальной замены ГНСС представляется логичным выдвинуть аргумент в пользу усовершенствованной версии наземной радионавигационной системы Loran.

В ходе практической реализации исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать точностные характеристики РНС e-Loran в условиях современности и в перспективе на основе учета опыта функционирования пилотных проектов.
2. Рассмотреть гипотетическую возможность использования e-Loran на трассе СМП в качестве альтернативной (резервной) системы позиционирования.
3. Обосновать целесообразность моделирования карты *дополнительных вторичных факторов* на основе методов *B*-сплайновой аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Loran.
4. Реализовать южнокорейский эксперимент картирования поправок задержки распространения радиосигнала с позиций кусочных аппроксимаций в качестве доказательства работоспособности сплайнового алгоритма в вопросе повышения точности обсерваций e-Loran.
5. Рассмотреть применение феномена *целостности данных* как критерия доверия к навигационной информации в аспекте функционирования дифференциального варианта e-Loran.
6. Разработать пакет прикладных паскаль-программ обеспечения картографирования поправок на распространение радиоволн *методом сплайн-функций* в качестве обеспечения поддержки принятия решений вахтенным помощником в оценке точности обсерваций e-Loran.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первоначальная гарантированная 20-метровая точность системы e-Loran в определенной мере отвечает требованиям, предъявляемым к навигационным приборам для захода судна в морской порт при использовании услуг, основанных на определении местоположения [1], [2]. Опыт эксплуатации системы Loran-C выявил серьезный недостаток в виде устаревшей конфигурации геометрии так называемых *цепочек станций* для обеспечения регионального навигационного покрытия системной точности. Технология e-Loran, в отличие от классической концепции цепочки, работает по принципу ранжирования сигналов с учетом фиксированных условий наилучшего распространения. В то время как старая концепция Loran-C гарантировала точность позиционирования менее четверти мили, дифференциальный e-Loran в настоящее время обеспечивает погрешность менее 10 м за счет более высокой стабильности сигнала, чем у его предшественника.

Точность временной синхронизации в 100 наносекунд (нс) на приемной антенне e-Loran определяет уникальные возможности новой системы. Практическая точность позиционирования системы e-LORAN в настоящее время реализуется в диапазоне 8–20 м [3]. Дифференциальный режим e-Loran, по прогнозам, предоставит в ближайшие годы морским потребителям потенциальную точность ниже 5 м [4]. Успешное развитие интегрированных инерциально-спутниковых систем в конечном итоге приведет к глобальному повышению навигационной точности до 1 м для гражданских потребителей, но в современных условиях только армейские приемники обеспечивают погрешность определения места 3 м при использовании закрытых военных каналов связи GPS [5].

Проект e-Logan в настоящее время демонстрирует точностные характеристики на уровне соответствующих показателей GPS без учета дифференциального режима.

Низкочастотный e-Logan в условиях современности становится предпочтительным передовым источником сигналов определения местоположения, навигации и синхронизации времени. Проект e-Logan официально стандартизирован во всем мире с целевой функцией минимизирования уязвимости спутниковых сигналов к случайным или преднамеренным помехам, намеренной подмене данных, радиочастотным помехам или явлениям космической погоды. Новая система позиционирования Logan также способна обеспечивать чрезвычайно точные привязки по времени и частоте, необходимые телекоммуникационным системам, обеспечивающим голосовую и интернет-связь.

Система e-Logan характеризуется как основанная на цифровых технологиях современная версия физически устаревшей системы Logan-C. Инновация повторно использует передающие станции своего предшественника для определения местоположения с гораздо более высокой точностью, непрерывностью, доступностью и целостностью [6]. Перспективные передатчики излучают точно рассчитанные импульсы мощностью в сотни киловатт на частоте 100 кГц. Для обеспечения высокоточной навигации импульсы должны быть рассчитаны с точностью до наносекунд. Благодаря этому они могут выполнять дополнительную функцию точного распределения времени на большие расстояния. Временная синхронизация каждой передающей станции определяется локальным набором из трех атомных часов цезиевого стандарта, которые сами синхронизируются с интервалами по UTC по сравнению с основным стандартом. Таким образом, передачи привязываются к UTC, обеспечивая источник времени, отслеживаемого по UTC, полностью независимому от ГНСС.

Инновационная система использует импульсные сигналы с частотой 100 кГц при обеспечении невосприимчивости к помехам радиосигналов большой дальности действия. Новый Logan обеспечивает надежное системное покрытие минимально на расстояние 18 км и максимально на расстояние более 1000 миль [2]. Вследствие указанных преимуществ у мировой морской общественности возникает понимание перспективности e-Logan для использования в качестве резервной системы для ГНСС во всех отношениях. Появляется реальная возможность применения инновационной резервной системы в проблемных ситуациях для ГНСС. Наиболее жизнеспособной наземной системой, предоставляющей услуги позиционирования и хронометража, соответствующей требованиям Международной морской организации (International Maritime Organization — ИМО), является e-Logan. Благодаря трем передатчикам e-Logan может быть обеспечена точность горизонтального позиционирования менее 10 м с синхронизацией времени по UTC в течение 50 нс, что достаточно для того, чтобы выступать в качестве альтернативы ГНСС [4]. Организация признает необходимость наличия на борту нескольких систем определения местоположения и разработала концепцию электронной навигации для повышения безопасности на море с помощью технических средств, которая требует для надежности наличия по крайней мере двух независимых разнородных источников определения местоположения и времени в навигационной системе.

Великобритания и Ирландия установили к концу октября 2014 г. дифференциальные опорные станции e-Logan для обеспечения начальной готовности к эксплуатации принципиально новой системы. Совместно с передатчиками Logan в Англии, Франции, Германии и Дании дифференциальные опорные станции e-Logan обеспечивают точность определения местоположения, равную 10 м, в семи портах и подходах к ним вдоль Восточного побережья Англии и Шотландии. Пилотная карта конфигурации инновационного проекта приведена на рис. 1 [4].

Исследования инерциальных навигационных систем показали, что они не представляют собой полноценной резервной копии GPS, а испытания усовершенствованного Logan, проведенные в Великобритании, доказывают, что e-Logan действительно обладает потенциалом для обеспечения производительности, эквивалентной ГНСС, и является ее полностью дополняющей системой [7]. Европейская система e-Logan была введена в эксплуатацию осенью 2014 г. Финансовый прогноз по эффективности эксплуатации e-Logan в водах Великобритании и Ирландии предполагает эко-

номию более 4 млн фунтов стерлингов в год в течение номинального срока службы системы, составляющего 10 лет с момента полномасштабного внедрения услуг электронной навигации в 2018–2028 гг. [8].



Рис. 1. Европейский дифференциальный вариант эксплуатационных возможностей e-Loran

Для интенсивного развития проекта может быть повторно использована бывшая европейская инфраструктура Logan-C с передатчиками, расположенными в Великобритании (Анторн, Мидлсбро), Франции (Лессей и Сустон), Германии (Зюльт), Дании (Эйде, Фарерские острова) и Норвегии (Верландет, Бо, Ян-Майен и Берлеваг). Британская станция в Анторне является усовершенствованным прототипом e-Loran с возможностью передачи данных по традиционному каналу Logan, обеспечивающему UTC и дифференциальные поправки для судовождения у восточного побережья Великобритании. В настоящее время в Мидлсбро нет передачи измеренных данных, поскольку коммуникационная инфраструктура все еще нуждается в установке. Производительность на четырех объектах в Харвиче, Дувре, Ширнесе и Лейте превышает прогноз на 15–32 % [8]. Первая установка бортового оборудования e-Loran была завершена осенью 2014 г. на пароме *Pride of Hull*, курсирующем между Халлом и Роттердамом в рамках исследования возможностей дифференциального проекта e-Loran. На судне проводились специальные эксперименты сравнения точности позиционирования GPS и e-Loran. Точечная диаграмма и распределение кумулятивных ошибок показали, что разница между e-Loran и GPS полностью нивелируется в течение 7,84 мин для 95 % всех измерений [4].

В настоящее время результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что измеренная производительность европейской службы e-Loran находится на максимальном уровне прогнозируемой производительности. Модель дифференциального проекта e-Loran, представленная на рис. 1, полезна тем, что позволяет оценивать точность в заданном местоположении. Архитектура европейской конфигурации e-Loran обладает достаточной гибкостью, чтобы иметь возможность изменять такие параметры, как интервалы усреднения и частоту обновления.

Проведенные натурные эксперименты показали, что система e-Loran может предоставлять услуги точного позиционирования с производительностью, сравнимой с GPS. Это особенно важно для морских применений, где концепция ИМО по электронной навигации требует наличия двух независимых источников информации: о местоположении и времени. Соединенное Королевство фактически ввело в эксплуатацию службу e-Loran в Европе с первоначальным дифференцированным оперативным потенциалом.

За последнее десятилетие произошло резкое увеличение числа отключений спутниковых сигналов из-за преднамеренного создания помех ГНСС [9]. Поскольку ГНСС широко используются, необходимо приложить дополнительные усилия, чтобы создать возможность устойчивости ко все более часто наблюдающимся случаям глушения и подмены спутниковых сигналов. Необходимость поиска дублирующей системы GPS мотивирована тем, что надежность позиционирования является

предметом для разрешения спуфинговых и джамминговых ситуаций в реализации кибернетической осведомленности в морской отрасли [10]. Подтверждением актуальности проблемы может служить южнокорейский крупномасштабный инцидент 2016 г., когда было зафиксировано продолжавшееся в течение недели радиоэлектронное преднамеренное подавление сигналов GPS Северной Кореей, под негативное воздействие которого попало 715 судов, 1007 летательных аппаратов и 1794 вышки сотовой связи [11]. Крупномасштабный инцидент с глушением сигналов GPS, произошедший в Южной Корее, подтверждает практическую важность дублирования спутниковой системы альтернативным методом, основанным на других принципах функционирования.

Пример политического противостояния Южной Кореи и КНДР в вопросе безопасности судоходства выражается в парадоксальной необходимости для южнокорейских моряков периодически возвращать суда к причалам вследствие региональной блокировки сигналов GPS. Правительство Южной Кореи было вынуждено переориентироваться на принципиально новую систему позиционирования e-Logan. Работоспособность пилотного проекта e-Logan в Южной Корее в ситуации постоянных проблем с GPS подтверждает дееспособность перепрофилирования на альтернативную наземную систему радионавигации в Азиатско-Тихоокеанском регионе с группой из пяти станций, демонстрируемых на рис. 2 [12].



Рис. 2. Южнокорейский пилотный проект e-Logan

После четырех лет исследований и разработок южнокорейская испытательная стендовая система e-Logan была введена в эксплуатацию с 1 июня 2021 г. [13]. Изначально требуемая точность системы e-LORAN на Корейском полуострове планировалась равной 20 м [14]. В результате проведения специального эксперимента на расстоянии до 160 км от передатчика испытательного стенда в Инчхоне был установлен эксплуатационный показатель точности местоположения системы e-Logan в 15 м с вероятностью 95 % на этапе захода любого судна в порт на основе *метода компенсации системной погрешности* при помощи использования так называемых *дополнительных вторичных факторов* [15].

Правительство Южной Кореи в перспективе намерено совершенствовать инфраструктуру дальней навигации e-Logan для обеспечения резервных навигационных возможностей для морских пользователей. При оптимальном развертывании дополнительных передатчиков e-Logan в настоящее время параллельно ведутся интенсивные методические поиски путей создания высокоточной общенациональной системы. С использованием фактических измерений погрешности электронного местоопределения по всей стране специальными научными исследованиями было подтверждено, что достигнутая точность может быть улучшена за счет применения инновационных

алгоритмов примерно на 10–91 % с устойчивым экспериментальным показателем, равным 8,49 м, по сравнению с апробированными симуляторами точности позиционирования южнокорейской e-Loran [14]. Анализ точности позиционирования службы e-Loran дает уверенность в практической осуществимости ее внедрения как общенациональной системы в качестве альтернативы GPS в ситуации проблемной затруднительности функционирования ГНСС в Северо-Восточной Азии. В Китае также были проведены соответствующие исследования в рамках крупного национального инфраструктурного проекта по разработке наземного инновационного Лорана [16].

В перспективе на основе существующего опыта проведения испытаний европейского и южнокорейского пилотных проектов, в США планируется установить 71 дифференциальную станцию e-Loran, которые будут охватывать 50 крупных американских мегаполисов, 50 крупных аэропортов и 50 крупных портов с возможностью передачи корректирующей информации по каждому каналу от 40 дифференциальных станций [8]. Стремление различных стран создать надежный резервный сервис позиционирования объясняется высокими требованиями кибернетической безопасности на водном транспорте.

Результаты (Results)

Перспективная низкочастотная радионавигационная система дальнего действия e-Loran обеспечивает аналогичную ГНСС навигацию по местоположению, времени и частоте при полном отсутствии режимных сбоев. Импульсы сконструированы таким образом, чтобы позволить приемнику различать компоненты поверхностной и пространственной волн в принимаемом составном сигнале. Таким образом, сигналы e-Loran могут использоваться на очень больших расстояниях без неопределенности в измерении времени распространения.

Система e-Loran была разработана с учетом требований к входу в морскую гавань. Технические характеристики системы и многочисленные испытания, проведенные за последнее десятилетие, показали, что e-Loran в реальности соответствует точности 10 м, предусмотренной требованием Резолюции ИМО А.953 к будущим системам ГНСС [11]. Когда для определения местоположения используется e-Loran, требуется минимум три станции для расчета двумерной фиксации местоположения с учетом временных задержек прохождения радиосигнала. Любые дополнительные измерения позволяют повысить общую точность решения. Как оптимальный вариант, например, могут быть дополнительно использованы возможности корреляционно-экстремальной навигации [17]. Чтобы достичь высокоточного уровня точности в морской среде, пользовательский приемник корректирует свои измерения с помощью опубликованных значений *дополнительных вторичных факторов* (Additional Secondary Factors — ASF) в качестве дифференциальных поправок e-Loran. Карты ASF для конкретных географических районов распространяются среди пользователей в независимом от получателя формате данных, а картографические данные публикуются провайдером морских услуг, ответственным за средства навигации. Измеренные значения *дополнительных вторичных факторов* остаются стабильными в течение длительного периода времени. Любые изменения опубликованных ASF, из-за изменений характеристик распространения радиоволн или задержек, связанных с передатчиком, будут компенсированы дифференциальными поправками. Для этого на берегу, в доступных пределах интересующего географического района, устанавливается дифференциальная станция e-Loran. Опорная станция сравнивает измеренные значения ASF с опубликованными аналогами и передает исправления пользователям по каналу передачи данных e-Loran.

Опорная станция вычисляет дифференциальные поправки для набора измерений дальности e-Loran и передает их пользователям в виде сообщений с двумя поправками. Время обновления сообщения составляет 120 с для полного набора дифференциальных исправлений от одной дифференциальной станции e-Loran. В структуре e-Loran установлено оборудование для контроля целостности в целях обеспечения высокой точности первоначальных эксплуатационных возможностей [6]. Аппаратура целостности каждые 10 с сравнивает дифференциальные поправки от опорной станции со своим собственным набором поправок, подавая сигнал тревоги, если разница между поправками

превышает пороговое значение. Кроме того, при практическом использовании целостности данных применяются поправки к собственным измерениям, получаемые по каналу передачи данных e-Logan. Если разница между расчетным и наблюдаемым положениями превышает предел защиты, традиционно устанавливаемый на уровне 25 м, то подается блокирующий сигнал и дифференциальная служба e-Logan не может быть использована [4]. Целесообразно феномен целостности рассматривать как критерий для оценки надежности и измерения уровня доверия к информации. Навигационная система с высокой степенью целостности должна быть способна обнаруживать и отклонять ошибочные измерения с целью обеспечения достоверности показателей работы РНС в любое время и при любых условиях. Поэтому целостность необходимо понимать как способность системы радионавигации обеспечивать своевременные предупреждения о невозможности использования этой системы в навигационных целях.

Несмотря на устойчивость к подавлению сигнала, точность позиционирования e-Logan условно остается ниже, чем у GPS. Задержка сигнала из-за помех наземного пути распространения радиоволн, которая называется *дополнительным вторичным фактором* (ASF), является наиболее уязвимой составляющей точности позиционирования e-Logan. Вследствие указанной проблемы необходимо учитывать временные и пространственные ошибки ASF для обеспечения высокой точности. Генерация карт на основе данных обследования ASF в зоне обслуживания является наиболее перспективным способом уменьшения пространственной ошибки ASF, но качество карт ASF зависит от применяемого алгоритма интерполяции. Целесообразно создавать высококачественные карты на основе измерений ASF только в фиксированных точках измерительных операций, поскольку обширные обследования ASF являются дорогостоящими и трудоемкими и требуют значительных технологических усилий [18].

Карта ASF для гавани и района подхода к гавани, как правило, содержит номинальные значения дополнительного вторичного фактора для каждого передатчика e-Logan. Наглядно карта ASF может быть представлена в виде наложенной сетки со значениями дополнительных вторичных факторов для каждой ее ячейки. Картографическая проекция является результатом обследования, которое необходимо точно провести один раз, прежде чем начнет функционировать дифференцированная служба e-Logan с последующими ежегодными регулярными интервалами обновления. Приемник дифференциального e-Logan позволяет морскому пользователю принимать на борту моделированную карту ASF. Разработка системы e-Logan в условиях современности трансформировалась в d-Logan как систему генерации информации об исправлении ошибок и предоставления пользователям данных по аналогии с системой DGPS. Дифференциальный e-Logan передает корректирующую информацию пользовательским приемникам путем извлечения номинального ASF, который является долгосрочным средним значением временного дополнительного вторичного фактора [19].

ASF можно условно разделить на номинальный, пространственный и временной уровень. Номинальный уровень ASF рассчитывается с использованием среднего значения фактических измерений за период измерения, составляющий не менее одного года с учетом сезонного цикла изменений на пути распространения трассы радиосигнала от каждой передающей станции с учетом географического местоположения d-Logan. Сгенерированный номинальный ASF передается на пользовательские приемники. Пространственный уровень ASF индивидуально создает карту дополнительных вторичных факторов для каждой передающей станции. Пространственный ASF определяется путем вычисления относительного значения для номинального ASF в каждой ячейке карты-сетки для всей зоны покрытия целевого сегмента d-Logan. С целью коррекции ASF в памяти каждого пользовательского приемника должна быть сгенерирована карта ASF. Наилучшим методом получения пространственной ASF является использование измеренной ASF в соответствующем районе. На временной уровень ASF оказывают влияние факторы окружающей среды. Например, временные значения ASF варьируются в зависимости от дня и ночи или между летом и зимой. Поэтому наиболее подходящим методом учета временного параметра является передача информации об исправлении ошибок в режиме реального времени. В отличие от ASF, обусловлен-

ной пространственными характеристиками, временная ASF обладает низкой чувствительностью к положению приемников и имеет большую зону покрытия информацией об исправлении ошибок.

Представляется целесообразным синтезировать структуру карты ASF на основе разработанного алгоритма гибридной двумерной *B*-сплайновой аппроксимации [20]. Ежегодная корректировка карты дополнительных вторичных факторов с позиций сплайнового подхода не представляет математических проблем. В случае обнаружения расхождений измерительных данных с принятой моделью автоматически возникнет необходимость реконструкции карты ASF. Эффекты аномальных пульсаций измерительных значений дополнительных вторичных факторов оптимальным образом могут учитываться при использовании унифицированного сплайнового синтеза без какого-либо алгоритмического переформатирования при возможности корректировки файла исходных данных. На основе новой информации измерений уточненная форма карты ASF будет пересчитана высокоскоростным методом *B*-сплайновой аппроксимации без каких-либо конструктивных сложностей. Обновления информации на основе методов *B*-сплайнов позволяют использовать в практических приложениях e-Loran уточненную синтезированную изогеометрию карты ASF практически в режиме реального времени.

Точная карта базы данных по ASF необходима в случае, если e-Loran должен обеспечить абсолютную точность навигации, требуемую при входе в морскую гавань. В 2013 г. был проведен интересный вычислительный эксперимент в рамках академических исследований в южнокорейском заливе Йонгиль по корректности технологии картирования дополнительных вторичных факторов для передающей станции Пхохан с установлением корреляции погрешности местоопределения в зависимости от точности графического синтезирования ASF информации как учета фактического воздействия радиосреды. Применялись методы экстраполяции и линейной интерполяции для вычисления промежуточных репрезентативных значений задержки прохождения радиосигнала с целью имитационного моделирования ASF карты в соответствии с реперными измерениями, выполненными в двенадцати локациях целевой области исследования согласно схеме, приведенной на рис. 3 [21].

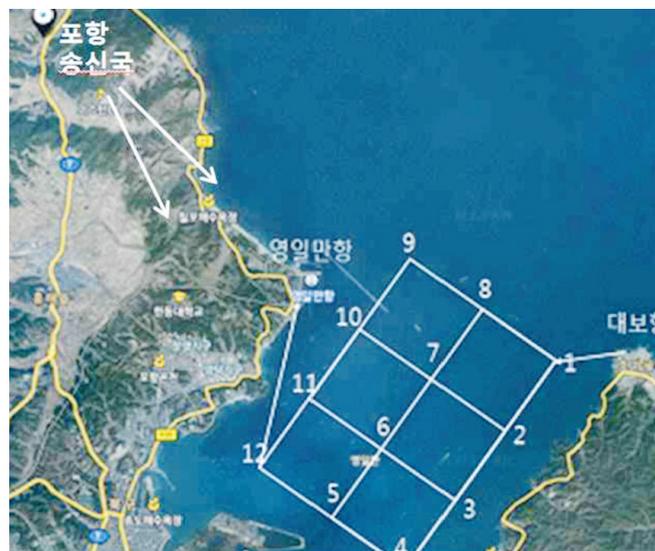


Рис. 3. Схема локационного картирования дополнительных вторичных факторов южнокорейской станции e-Loran в Пхохан

Применимость линейного интерполирования обусловлена упрощенной постановкой задачи и наличием регулярных измерительных данных. Линейное интерполирование стратегически уступает методам сплайн-функций в вопросе точности из-за конструктивных математических ограничений [22]. Геометрический характер прямой линии обладает нежелательными последствиями в вопросе точности интерполирования из-за невозможности применимости процедуры

«сглаживания»), что является важным обстоятельством, если в измерениях присутствует погрешность. Негатив линейного интерполянта выражается в провоцировании «лестничного эффекта» при компьютерной визуализации графических приложений.

Поскольку при подборе аппроксиманта в постановке задачи оптимальности моделирования ASF карты всегда требуется дифференцируемая функция, принципиально исключающая точки геометрического разрыва, следует обратиться к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей осуществить наилучшие математические приближения. В ситуации хаотичности данных, отражающей современную реальность измерительных процедур, аппроксимационный сплайн может выполнить лидирующую роль в реализации задачи составления ASF карты. При сравнительной характеристике линейного интерполирования с методами аппарата сплайн-функций предпочтение следует отдать кусочной аппроксимации. Оперирование с сегментированными многозвенниками является эффективным с точки зрения проведения вычислений. Расчет сплайн-функций сопряжен только с такими математическими операциями, как умножение и сложение, что обуславливает высокую результирующую точность.

Положительным аспектом применения сплайнов являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость расчетных кусочно-аппроксимационных процедур. Сплайны представляют собой универсальное математическое средство синтезирования ASF карты по дискретным измерениям хронометражной задержки распространения радиосигнала ввиду независимости от конкретного вида фиксируемого параметра. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными скалярными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения дополнительного вторичного фактора по номеру сеточного интервала. Поэтому сплайновые аппроксимации являются высокоскоростным средством решения задач автоматизированной обработки навигационной информации системы e-Logan.

В результате южнокорейского эксперимента была получена синтезированная карта ASF с учетом коррекции прогнозируемых результатов с измеренными показателями хронометражной задержки распространения радиосигнала в наносекундах, представленная в цветовой гамме на рис. 4 [21].

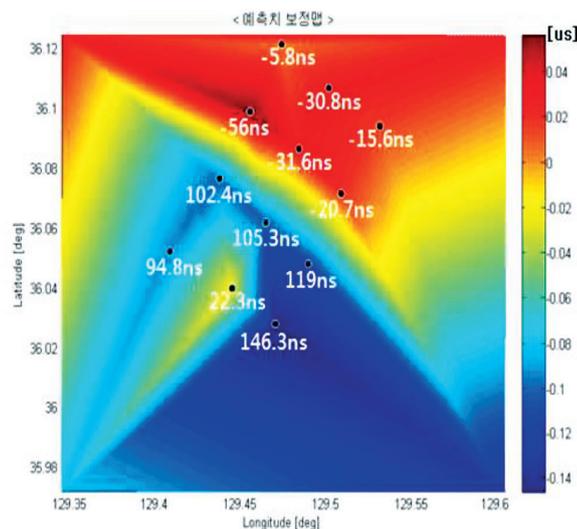


Рис. 4. Цветная синтезированная карта ASF для залива Йонгиль

В данном случае цветовая палитра является условным аналогом трехмерности измерительных результатов. Погрешность измерения картирования составила менее 9 м, что гарантирует изначально запланированную общую точность позиционирования южнокорейского проекта в 20 м, удовлетворяя в полной мере навигационным характеристикам системы e-Logan [21]. При фиксированном шаге в 500 м географической сетки как полигона экспериментальных измерений для прогностической

карты ASF погрешность времени прохождения радиосигнала составляет менее 0,03 нс [21]. Фактические измерения временных задержек выполнялись на основе хронометража цезиевых атомных часов. Повторный эксперимент, выполненный в 2014 г., позволил выявить, что при установке справочной станции на мысе Гомигот с целевым оперированием в пределах залива Йонгиль как дополнительного источника информации для передающей станции Пхохан можно гарантированно добиться точности определения местоположения от 8 до 20 м при условии соблюдения возможности корректуры карты ASF на приемнике пользователя [23]. По данным специального эксперимента 2020 г., проведенного в Юго-Восточной Азии, характеристики позиционирования e-Logan, скорректированные с использованием временного параметра ASF, составили приблизительно 12 м [24].

Использование сплайн-функций как алгоритма синтеза ASF карты может позволить существенно улучшить коррелированную погрешность позиционирования. С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма в аспекте обеспечения максимальной точности дифференциального варианта e-Logan выполнена компьютерная визуализация картографического фрагмента *дополнительных вторичных факторов* южнокорейского залива Йонгиль на основе гибридной *B*-сплайновой аппроксимации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 3×4 с реперными данными по широте и долготе при общем количестве двенадцати узловых точек согласно рис. 4. С математической точки зрения скриншот, представленный на рис. 6, является трехмерным представлением картографированной изоповерхности задержки времени прохождения в наносекундах сигнала от передающей станции e-Logan в Пхохан.

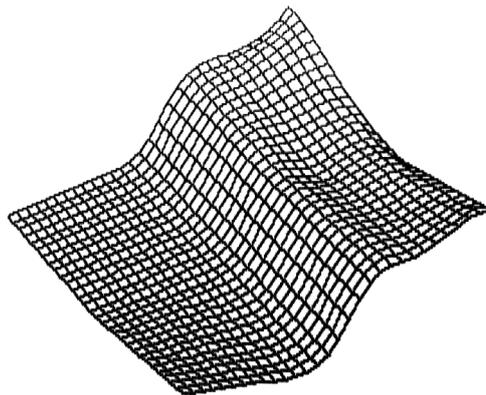


Рис. 5. Скриншот сплайн-картированной изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль (результат работы авторского программного обеспечения)

При сопоставлении рис. 4 и 5 определяется информационная идентичность при учете разного формата представления информации. Внимательный анализ одного и того же изображения с различиями геометрической размерности подтверждает достоверность моделирования фрагмента сплайновой изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль. Представление информации задержки распространения радиосигнала на рис. 4 дается в цветовой палитре в плоскостном варианте, а рис. 5 синхронно демонстрирует аналогичные данные в графике черно-белого цвета 3D формата. По сути, воссоздана ситуация практического использования трехмерной карты ASF при исследовании вопроса функционирования дифференциального e-Logan для морских применений. С целью гладкого приближения сплайновой изоповерхности использовались 24 добавочных точки по каждой координате на фрагментированном гридированном полигоне по рис. 3. Добавочные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов, согласно *схеме Марседена*, на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала. Геометрический фактор синтезированной изоповерхности, позволяющий осуществить центровку компьютерного изображения

в случае смещения граничных участков изоповерхности за фактические размеры компьютерного экрана, был задан равным безразмерному значению 68 ввиду необходимости корректной фиксации перепада измерительных данных из отрицательной области значений в положительную.

Положительный результат моделирования, полученного на основе фактической карты дополнительных вторичных факторов, может быть использован в качестве высокоточного эталона информативности в аспекте организации точного альтернативного позиционирования при уникальном представлении задержки прохождения радиосигнала на мониторе бортового компьютера аппаратуры e-Logan. Апробированный с использованием методов сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу при реализации процедуры визуальной оценки правильности учета поправок дифференциального режима e-Logan.

Проведением специально организованного эксперимента установлено, что сплайновая вычислительная погрешность при расчете любого навигационного параметра составляет порядок точности до шестого знака после запятой [25]. Точная графическая информация ASF является важнейшим условием эффективной эксплуатации системы e-Logan в дифференциальном варианте.

Система дальней навигации e-Logan может служить дополнением или альтернативой к уязвимым к радиочастотным помехам традиционным ГНСС. Синтезируемое математическими методами картирование отличается от стандартной карты ASF, основанной на времени прибытия, которая в настоящее время не подходит для Южной Кореи, поскольку южнокорейские передатчики e-Logan не синхронизированы со Всемирным координированным временем [26]. Карта дополнительных вторичных факторов, основанная на разнице во времени прибытия радиосигналов, создается с целью повышения точности позиционирования e-Logan в Южной Корее. В 2023 г. были замечены попытки применения южнокорейскими учеными кубического сглаживающего сплайна с целью синтеза данных ASF. В результате апробирования алгоритма кусочных аппроксимаций установлено, что *метод сглаживающего сплайна* имеет преимущество в подгонке нелинейных данных с помощью весовых коэффициентов в сравнении с полиномиальной регрессией. Сплайновый подход в южнокорейском сценарии продемонстрировал погрешность определения местоположения примерно на 2 м меньше, чем стандартный подход, основанный на применении линейной интерполяции [13].

В настоящее время проводятся интенсивные научные поиски по улучшению характеристик позиционирования e-Logan. В одном из таких исследований был предложен *метод многоцепочечного позиционирования*, который использует сигналы передающих станций, принадлежащих к разным группам. Несмотря на то, что производительность улучшенного Logan превосходит производительность традиционных методов, дополнительный вторичный фактор все еще может снизить точность позиционирования [24]. Чтобы нивелировать последствия временной компоненты ASF, судну в любом случае необходимо получать данные временной коррекции с ближайшей опорной станции с известным местоположением.

Трехмерное сплайновое картографирование дополнительного вторичного фактора с реализацией на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяет горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса альтернативного позиционирования с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального оценивания правильности использования поправок дифференциального варианта e-Logan.

Обсуждение (Discussion)

Трансарктические маршруты становятся все более судоходными в ответ на быстрое сокращение площади морского льда за последние десятилетия. Появляется стимул для открытия новых морских коммерческих маршрутов, соединяющих Азию с Европой и Северной Америкой. Открытие северных маршрутов могло бы значительно сократить навигационные расстояния и время морских перевозок при экономии транспортных расходов и обеспечить существенные экологические выгоды [27].

Наибольший потенциал для развития среди мировых маршрутов приобретает Северный морской путь (СМП), расположенный вдоль побережья Российской Федерации и имеющий перспективу круглогодичного судоходства между крупнейшими портами Азии и Северной Европы по значительно более короткому маршруту по сравнению с традиционными. Навигационное использование РНС e-Logan в качестве альтернативы глобальной навигационной спутниковой системе (ГЛОНАСС) на трассе СМП представляется актуальной необходимостью в условиях перспективного судоходства в Арктике. Ввиду того, что зону СМП полностью покрывает ГЛОНАСС, российская спутниковая система может стать приоритетной целью злоумышленной спуфинг-атаки. С российской стороны активно продвигается развитие СМП как альтернативы Суэцкому каналу. Несмотря на сложные навигационные условия северный вариант морского пути из Азии в Европу имеет ряд преимуществ, таких как меньшая протяженность пути, экономия топлива, отсутствие опасности пиратских нападений, движение в зоне юрисдикции одного государства, несущественные финансовые издержки ледокольного сопровождения.

Событие 23 марта 2021 г. спровоцировало остановку мирового грузооборота на 8–12 % за семь дней ввиду посадки на мель судна Ever Given в Суэцком канале [28]. Резонанс данного инцидента выразился не только в блокировке движения по центральному маршруту между Европой и Азией, а также в том, что судовладелец получил финансовую претензию в размере 916 млн долл. Прецедент ситуации заключается в том, что одна авария может привести к транспортному коллапсу с ущербом мировой торговле в 400 млн долл. в час. Аналогичная авария может дискредитировать эксплуатацию СМП как безопасного судоходного пути с серьезными экологическими последствиями. Репутация нового проекта в начале его развития является решающим фактором для его дальнейшего эффективного использования. Однако помимо преимуществ арктических маршрутов имеется множество препятствий для судоходства. Поэтому необходимо решать вопросы безопасности и создавать перспективные навигационные системы надежного позиционирования. Вследствие этого, безусловно, важным является практическая разработка альтернативного местоопределения в варианте системы e-Logan для гарантированного обеспечения безопасности судовождения на трассе СМП, представляющего собой идеальное место для навигационного использования системы e-Logan. В связи с тем, что трасса СМП проходит через малонаселенные районы, установка станций e-Logan может обеспечить жизненно необходимые коммуникации в ситуации локальной недееспособности спутниковых средств связи. Это особенно важно в условиях Арктики, где сложные погодные условия могут нарушить работу технического оборудования и связи. Благодаря системе e-Logan будут обеспечены точность и надежность связи во всей арктической зоне. При этом необходимо отметить, что применение системы e-Logan на СМП является стратегией развития северных территорий и в целом будет способствовать укреплению позиций Российской Федерации в Арктике. Внедрение инновации e-Logan в арктической зоне будет способствовать повышению эффективности судоходства, а также снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций в сложных обстоятельствах плавания. Как важнейший аспект государственной политики в Арктике развитие транспортной инфраструктуры СМП принесет значительную пользу экономике проблемного региона.

В проекте e-Logan в целях экономической эффективности следует максимально использовать имеющуюся инфраструктуру радиотехнической системы дальней навигации (РСДН). Так как в западной части СМП уже фактически установлены станции РНС, расположенные по оптимальному геометрическому фактору, соответствующие по всем условиям эффективного пересечения градиентов, предлагается использовать e-Logan в качестве *системной основы позиционирования*. Установка новых станций РСДН требует больших материальных затрат. С целью уменьшения себестоимости проекта частично можно использовать уже имеющуюся инфраструктуру РСДН «Чайка». Учитывая необходимость установки новых станций e-Logan в арктической части РФ, их расположение должно обеспечивать близость к населенным пунктам для управления работой станции, технического обслуживания и ремонта. Ввиду того, что это не всегда может быть осуществимо, станции e-Logan должны быть максимально автономными с минимальным количеством технического персонала,

иметь устойчивое к местным погодным условиям оборудование при условии возможности дистанционного управления и контроля станции.

По аналогии с исследованием, активно проводимым в Южной Корее, в приоритете должно быть коллекционирование статистических данных по изменению ASF в процессе прохождения радиосигнала над арктической сушей. Безусловно, для создания целостной карты определенных поправок ASF потребуется огромное количество времени и ресурсов, поэтому выдвигается гипотеза производить не точечные замеры, а интерпретировать полученные данные на единое поле поправок *методом сплайн-функций*.

Морские перевозки в арктических морях увеличиваются ввиду изменения климата по причине прогнозируемого глобального потепления. Таяние морского льда привело к широко распространенному мнению о том, что судоходство будет быстро расширяться с актуализацией поиска более коротких морских путей между Европой и Азией. Экономия расстояния, которую можно достичь с помощью арктических маршрутов в условиях современности, с финансовой точки зрения нецелесообразно игнорировать. Например, расстояние между Лондоном и Иокогамой через Северо-Западный проход составляет 15700 км, а через Северо-Восточный проход — 13841 км, что значительно меньше маршрута через Суэцкий (21200 км) или Панамский канал (23300 км) [29]. В некоторых случаях расстояния плавания по арктическому маршруту сокращаются примерно на 25–30 %, что является важнейшим фактором, стимулирующим потенциал быстрой интенсификации судоходства в арктическом регионе. Финансовый профицит на некоторых северных маршрутах является значительным, и он будет служить стимулом будущего развития. Если прогнозы относительно потенциального растущего трафика на долгосрочную перспективу оправдаются, то СМП может стать реальным конкурентом Суэцкому и Панамскому каналам, Малаккскому и Сингапурскому проливам при геополитическом усилении суверенитета Российской Федерации.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Становится возможным признать функционал РНС e-Loran как лучшую альтернативу ГНСС в аспекте сопоставимой точности обсерваций с достигнутым потенциалом местоопределения 8–20 м с прогнозируемой перспективой уменьшения погрешности геолокации ниже 5 м.
2. Применение системы e-Loran на трассе СМП эффективным образом обеспечит безопасность судоходства в арктической зоне РФ.
3. Синтезирование карты дополнительных вторичных факторов на основе методов *B*-сплайновой аппроксимации позволит получить точностные характеристики позиционирования e-Loran идентичные геолокации ГНСС.
4. Приведенный скриншот изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль может служить доказательством работоспособности сплайнового алгоритма картирования поправок задержки распространения радиосигнала в системе e-Loran.
5. Применение поправок к измерениям, получаемым по каналу передачи данных d-Loran, необходимо рассматривать как практическое использование феномена целостности данных с целью обеспечения высокоточного позиционирования в режиме реального времени.
6. Разработанный пакет прикладных паскаль-программ обеспечения картографирования ASF методом сплайн-функций с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа может выступить в роли интеллектуальной поддержки принятия решений вахтенным помощником в апостериорной оценке точности обсервации за счет наглядности визуального представления поля поправок дифференциального варианта e-Loran.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pelgrum W. J. New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century: PhD dissertation / W. J. Pelgrum. — Netherlands: Delft University of Technology, 2006. — 295 p.

2. *Czaplewski K.* The Identification of Possible Applications of the E-Loran System / K. Czaplewski, A. Weintrit // Annual of Navigation. — 2018. — No. 25. — Pp. 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
3. *Peshekhonov V. G.* High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data / V. G. Peshekhonov // Gyroscopy and Navigation. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
4. *Offermans G.* eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom — First Results / G. Offermans, E. Johannessen, S. Bartlett, C. Schue, A. Grebnev, M. Bransby, P. Williams, C. Hargreaves // Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — ION, 2015. — Pp. 27–39.
5. *Schmidt G. T.* GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments / G. T. Schmidt // Gyroscopy and Navigation. — 2019. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 41–53. DOI: 10.1134/S207510871902007X.
6. *Ююкин И. В.* Опортунистическая навигация в аспекте интеграции альтернативного позиционирования и электронного картографирования на основе сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.
7. *Williams P.* e-Navigation and the Case for eLoran / P. Williams, S. Basker, N. Ward // The Journal of Navigation. — 2008. — Vol. 61. — Is. 3. — Pp. 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.
8. *Offermans G.* Providing a resilient timing and UTC service using eLoran in the United States / G. Offermans, S. Bartlett, C. Schue // Navigation: Journal of The Institute of Navigation. — 2017. — Vol. 64. — Is. 3. — Pp. 339–349. DOI: 10.1002/navi.197.
9. *Clements Z.* Dual-Satellite Geolocation of Terrestrial GNSS Jammers from Low Earth Orbit / Z. Clements, T. E. Humphreys, P. Ellis // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). — IEEE, 2023. — Pp. 458–469. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140058.
10. *Ююкин И. В.* Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.
11. *Son P. W.* eLoran: Resilient positioning, navigation, and timing infrastructure in maritime areas / P. W. Son, S. G. Park, Y. Han, K. Seo // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — Pp. 193708–193716. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033215.
12. *Fang T. H.* Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter / T. H. Fang, Y. Kim, D. Kim, S. Lee, K. Seo, S. H. Park // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. — 2018. — Vol. 24. — No. 8. — Pp. 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0079.
13. *Kim W.* First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps / W. Kim, P. W. Son, S. G. Park, S. H. Park, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2022. — Vol. 58. — Is. 2. — Pp. 1492–1496. DOI: 10.1109/TAES.2021.3114272.
14. *Rhee J. H.* Enhanced Accuracy Simulator for a Future Korean Nationwide eLoran System / J. H. Rhee, S. Kim, P. W. Son, J. Seo // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 115042–115052. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3105063.
15. *Son P. W.* Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed / P. W. Son, S. G. Park, Y. Han, K. Seo, T. H. Fang // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — Is. 14. — Pp. 3586. DOI: 10.3390/rs15143586.
16. *Yan B.* High-Accuracy Positioning Based on Pseudo-Ranges: Integrated Difference and Performance Analysis of the Loran System / B. Yan, Y. Li, W. Guo, Y. Hua // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Is. 16. — Pp. 4436. DOI: 10.3390/s20164436.
17. *Yuyukin I. V.* Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — No. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.
18. *Son P. W.* Universal Kriging for Loran ASF Map Generation / P. W. Son, J. H. Rhee, J. Hwang, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2018. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 1828–1842. DOI: 10.1109/TAES.2018.2876587.
19. *Choi Y. S.* A Study on the ASF Correction Age and Error for Effective eLORAN Data Channel Utilization in Korea / Y. S. Choi, S. W. Hwang, S. R. Yeo, C. Park, S. H. Yang, S. J. Lee // Journal of Positioning, Navigation, and Timing. — 2013. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 109–114. DOI: 10.11003/JKGS.2013.2.2.109.

20. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
21. Hwang S. W. A generation method of ASF mapping by the predicted ASF with the measured one in the Yeongil Bay / S. W. Hwang, M. Y. Shin, Y. S. Choi, D. Yu, C. Park, S. H. Yang, C. B. Lee, S. J. Lee // Journal of Navigation and Port Research. — 2013. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 375–381. DOI: 10.5394/KINPR.2013.37.4.375.
22. 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.
23. Lee C. B. dLoran Measurement in Yeongil Bay using the Pohang Loran-C (9930M) / C. B. Lee, J. K. Lee, Y. K. Lee, S. W. Hwang, S. J. Lee, S. H. Yang // Journal of Navigation and Port Research. — 2014. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 227–232. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.3.227.
24. Park J. Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy / J. Park, P. W. Son, W. Kim, J. H. Rhee, J. Seo // 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). — IEEE, 2020. — Pp. 824–826. DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268214.
25. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Loran в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
26. Hwang J. TDOA-based ASF Map Generation to Increase Loran Positioning Accuracy in Korea / J. Hwang, P. W. Son, J. Seo // 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia). — IEEE, 2018. — Pp. 206–212. DOI: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552129.
27. Cao Y. Review of navigability changes in trans-Arctic routes / Y. Cao, M. Yu, F. Hui, J. Zhang, X. Cheng // Chinese Science Bulletin. — 2021. — Vol. 66. — Is. 1. — Pp. 21–33. DOI: 10.1360/TB-2020-0596.
28. Цмай В. В. Актуальные вопросы правового регулирования международных коммерческих морских перевозок / В. В. Цмай // Океанский менеджмент. — 2022. — № 1 (15). — С. 56–59.
29. Guy E. Commercial shipping in the Arctic: new perspectives, challenges and regulations / E. Guy, F. Lasserre // Polar Record. — 2016. — Vol. 52. — Is. 3. — Pp. 294–304. DOI: 10.1017/S0032247415001011.

REFERENCES

1. Pelgrum, Wouter Johan. New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century. PhD Diss. Netherlands: Delft University of Technology, 2006.
2. Czaplewski, Krzysztof, and Adam Weintrit. “The Identification of Possible Applications of the E-Loran System.” *Annual of Navigation* 25 (2018): 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
3. Peshekhonov, V.G. “High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data.” *Gyroskopy and Navigation* 13.1 (2022): 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
4. Offermans, Gerard, Erik Johannessen, Stephen Bartlett, Charles Schue, Andrei Grebnev, Martin Bransby, Paul Williams, and Chris Hargreaves. “eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom — First Results.” *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. ION, 2015. 27–39.
5. Schmidt, George T. “GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments.” *Gyroskopy and Navigation* 10.2 (2019): 41–53. DOI: 10.1134/S207510871902007X.
6. Yuyukin, Igor V. “Opportunistic navigation applied to integration of alternative positioning and electronic mapping based on spline technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.
7. Williams, Paul, Sally Basker, and Nick Ward. “e-Navigation and the Case for eLoran.” *The Journal of Navigation* 61.3 (2008): 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.
8. Offermans, Gerard, Stephen Bartlett, and Charles Schue. “Providing a resilient timing and UTC service using eLoran in the United States.” *Navigation: Journal of The Institute of Navigation* 64.3 (2023): 339–349. DOI: 10.1002/navi.197.
9. Clements, Zachary, Todd E. Humphreys, and Patrick Ellis. “Dual-Satellite Geolocation of Terrestrial GNSS Jammers from Low Earth Orbit.” *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. 458–469. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140058.
10. Yuyukin, Igor V. “Spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as the potential of cybernetic situational awareness.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.

11. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Younghoon Han, and Kiyeol Seo. “eLoran: Resilient positioning, navigation, and timing infrastructure in maritime areas.” *IEEE Access* 8 (2020): 193708–193716. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033215.
12. Fang, Tae Hyun, Youngki Kim, Don Kyu Kim, Sangheon Lee, Ki-Yeol Seo, and Sang Hyun Park. “Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter.” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 24.8 (2018): 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0079.
13. Kim, Woo Hyun, Pyo-Woong Son, Sul Gee Park, Sang Hyun Park, and Jiwon Seo. “First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 58.2 (2022): 1492–1496. DOI: 10.1109/TAES.2021.3114272.
14. Rhee, Joon Hyo, Sanghyun Kim, Pyo-Woong Son, and Jiwon Seo. “Enhanced Accuracy Simulator for a Future Korean Nationwide eLoran System.” *IEEE Access* 9 (2021): 115042–115052. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3105063.
15. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Younghoon Han, Kiyeol Seo, and Tae Hyun Fang. “Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed.” *Remote Sensing* 15.14 (2023): 3586. DOI: 10.3390/rs15143586.
16. Yan, Baorong, Yun Li, Wei Guo, and Yu Hua. “High-Accuracy Positioning Based on Pseudo-Ranges: Integrated Difference and Performance Analysis of the Loran System.” *Sensors* 20.16 (2020): 4436. DOI: 10.3390/s20164436.
17. Yuyukin, I.V. “Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0102916.
18. Son, Pyo-Woong, Joon Hyo Rhee, Jaehui Hwang, and Jiwon Seo. “Universal Kriging for Loran ASF Map Generation.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 55.4 (2019): 1828–1842. DOI: 10.1109/TAES.2018.2876587.
19. Choi, Yun Sub, Sang-Wook Hwang, Sang-Rae Yeo, Chansik Park, Sung-Hoon Yang, and Sang Jeong Lee. “A Study on the ASF Correction Age and Error for Effective eLORAN Data Channel Utilization in Korea.” *Journal of Positioning, Navigation, and Timing* 2.2 (2013): 109–114. DOI: 10.11003/JKGS.2013.2.2.109.
20. Yuyukin, Igor V. “Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
21. Hwang, Sang-Wook, Mi Young Shin, Yun Sub Choi, Donghui Yu, Chansik Park, Sung-Hoon Yang, Chang-Bok Lee, and Sang Jeong Lee. “A generation method of ASF mapping by the predicted ASF with the measured one in the Yeongil Bay.” *Journal of Navigation and Port Research* 37.4 (2013): 375–381. DOI: 10.5394/KINPR.2013.37.4.375.
22. Yuyukin, Igor V. “Application of the spline-functions method in underwater relief computer visualization.” *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.
23. Lee, Chang-Bok, Jong Koo Lee, Young-Kyu Lee, Sang-Wook Hwang, Sang Jeong Lee, and Sung-Hoon Yang. “dLoran Measurement in Yeongil Bay using the Pohang Loran-C (9930M).” *Journal of Navigation and Port Research* 38.3 (2014): 227–232. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.3.227.
24. Park, Jongmin, Pyo-Woong Son, Woo Hyun Kim, Joon Hyo Rhee, and Jiwon Seo. “Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy.” *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2020. 824–826. DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268214.
25. Yuyukin, Igor V. “Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
26. Hwang, Jaehui, Pyo-Woong Son, and Jiwon Seo. “TDOA-based ASF Map Generation to Increase Loran Positioning Accuracy in Korea.” *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*. IEEE, 2018. 206–212. DOI: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552129.
27. Cao, Yunfeng, Meng Yu, Fengming Hui, Jing Zhang, and Xiao Cheng. “Review of navigability changes in trans-Arctic routes.” *Chinese Science Bulletin* 66.1 (2021): 21–33. DOI: 10.1360/TB-2020-0596.
28. Tsmay, V.V. “Current issues of commercial shipping legislations.” *Okeanskiy menedzment* 1(15) (2022): 56–59.
29. Guy, Emmanuel, and Frederic Lasserre. “Commercial shipping in the Arctic: new perspectives, challenges and regulations.” *Polar Record* 52.3 (2016): 294–304. DOI: 10.1017/S0032247415001011.

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 6 ноября 2023 г.
Received: November 6, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63

ASSESSMENT OF THE MESHED SCREENS OPERABILITY TO REDUCE DUST EMISSIONS OF BULK CARGO FROM THE PORTS OPEN WAREHOUSES

D. N. Kostyunichev, N. S. Otdelkin

Volzhsky State University of Water Transport, N. Novgorod, Russian Federation

Currently, the coal terminals of sea and river ports have a significant negative impact on the environment through their activities. The operation of the terminals technological equipment leads to high concentrations of dust in the air and dust emissions of bulk cargo. The main sources of dust emissions and dust removal are open coal storage warehouses. Recently, dust screens have been used to combat dusting in open coal warehouses and port terminals. However, the processes of wind flows interaction with stacks of port open slads and meshed screens have not been studied enough. In this regard, the purpose of this work is to evaluate in laboratory conditions the operability of meshed screens to reduce the dustiness of the air and the dust emission of bulk cargo during its storage in port open warehouses. During laboratory studies, models of open warehouses stacks are carried out at a certain scale, which allows you to use the full-scale bulk cargo and real meshed screens. The main results of these studies are the following conclusions: meshed screens are workable and effective devices for reducing the speed of wind flow inside the perimeter of the screen; the shape of the stack cross-section does not affect the screen performance; the level of the meshed screen performance to reduce the air dustiness and the amount of dust emission from the warehouses stacks with the different shape of the cross-section depends on the direction and speed of the wind flow. The use of soft meshed screens located along the perimeter of the open coal warehouse stack makes it possible to reduce air dustiness and dust emission at a wind speed of 5 m/s by an average of 1.8 times, and at a wind speed of 10 m/s by an average of 2.5 times.

Keywords: coal terminal, dust emission, dustiness, open warehouse, meshed screen, stack model, methodology, research.

For citation:

Kostyunichev, Denis N., and Nikolay S. Otdelkin. "Assessment of the meshed screens operability to reduce dust emissions of bulk cargo from the ports open warehouses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 55–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63.

УДК 628.511.001.57:656.62.073.28

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ ПО СНИЖЕНИЮ ПЫЛЕВЫБРОСОВ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ С ОТКРЫТЫХ СКЛАДОВ ПОРТОВ

Д. Н. Костюничев, Н. С. Отделкин

ФГБОУ ВО «Волжский государственных университет водного транспорта»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

Темой работы является исследование отрицательного воздействия на окружающую среду угольных терминалов морских и речных портов в результате их деятельности. Отмечается, что работа технологического оборудования терминалов приводит к высоким концентрациям запыленности воздуха и пылевывбросам сыпучего груза. Основными источниками пылевывбросов и пылеуноса являются открытые склады хранения угля. В течение последних 8–10 лет для борьбы с пылением на открытых угольных складах и портовых терминалах получили применение пылезащитные экраны, однако процессы взаимодействия ветровых потоков со штабелями портовых открытых складов и сетчатыми экранами изучены недостаточно. В связи с указанными обстоятельствами целью настоящей работы является оценка в лабораторных условиях работоспособности сетчатых экранов по снижению запыленности воздуха и пылевывброса сыпучего груза при его хранении на портовых открытых складах. В процессе проведенного лабораторного исследования модели штабелей открытых складов выполнялись в определенном масштабе, что позволило использовать натуральный сыпучий груз и реальные сетчатые экраны. В работе представлены результаты исследований

работоспособности мягких сетчатых экранов по снижению пылевых выбросов с открытых портовых складов при хранении сыпучих грузов с учетом направлений и скорости ветровых потоков на штабели этих складов с различными формами поперечных сечений штабелей. В ходе проведения исследований были получены результаты, свидетельствующие о том, что сетчатые экраны являются эффективными устройствами, снижающими скорость ветрового потока внутри периметра экрана. При этом форма поперечного сечения штабеля не оказывает влияние на их работоспособность, а уровень работоспособности сетчатых экранов по уменьшению запыленности воздуха и размера выброса со штабелей складов с различной формой поперечного сечения зависит от направления и скорости ветрового потока. Применение мягких сетчатых экранов, расположенных по периметру штабеля открытого склада с углем, позволяет значительно уменьшить запыленность воздуха и пылевой выброс при воздействии ветра.

Ключевые слова: угольный терминал, пылевой выброс, запыленность, открытый склад, сетчатый экран, модель штабеля, методика, исследование.

Для цитирования:

Костюничев Д. Н. Оценка работоспособности сетчатых экранов по снижению пылевых выбросов сыпучих грузов с открытых складов портов / Д. Н. Костюничев, Н. С. Отделкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 55–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63.

Введение (Introduction)

Экологические вопросы природопользования и задачи инженерной экологии за последние десятилетия приобрели особую актуальность. Ужесточение экологических требований законодательными и нормативными актами как Российской Федерации, так и международных организаций предусматривают необходимость разработки конструкций и оборудования, обеспечивающих сокращение выбросов вредных веществ в акваторию порта, близлежащую территорию, прилегающую к порту, и окружающую среду в целом.

Основными источниками пылевыделения при действующих технологических способах хранения сыпучих грузов на сегодняшний день в портах являются открытые склады, как накопительные, так и оперативные. Результаты, полученные в работах [1]–[3], показывают, что объем загрязнений атмосферного воздуха и пылевых выбросов значительно превышает допустимые значения.

В настоящее время в портах доминируют угольные терминалы открытого типа. По данным работы [4], крупные порты Приморского края (Восточный, Находка, Владивосток, Посыет) ежегодно перегружают около 40 млн. т угля. Большинство из них эффективно функционируют, оказывая при этом приемлемое влияние на окружающую среду благодаря проведению мероприятий, направленных на снижение пыления. К таким мероприятиям относятся системы аспирации с фильтрами различных типов, применение устройств орошения и снеготенерации, а также технологий, основанных на смачивании угля с использованием специальных средств для обработки пылящего груза на транспорте, в узлах пересыпки и в местах хранения, при этом все они имеют свои достоинства и недостатки [5], [6]. Вместе с тем при высокой концентрации терминалов на относительно небольшой территории и постоянном росте объемов перевалки эти мероприятия могут оказаться неэффективными, и в этом случае возникает вопрос о более радикальном решении проблемы с угольной пылью.

В настоящее время для борьбы с пылением на угольных складах и портовых терминалах применяются пылезащитные экраны как мягкого, так и жесткого типа, которые получили определенное распространение в ряде российских портов Приморского края и за рубежом (Канаде, Китае). Причем, согласно исследованиям [7], [8], эффективность жестких пылеподавляющих экранов достигает 80 %, но при этом в работах [2] и [3] отмечается, что эффективность данных экранов не превышает 20 %.

В зависимости от расположения относительно ветра экран может выполнять ветрозащитную и пылезащитную функции. Уменьшение запыленности воздуха и пылевого выброса частиц груза со штабеля открытого склада обусловлено снижением скорости ветрового потока при его взаимодействии с сетчатым экраном. Однако процессы взаимодействия ветровых потоков со штабелями портовых открытых складов и сетчатыми экранами изучены недостаточно. Исследования в этом направлении в основном проводятся в натурных условиях, что связано с высокими материальными

затратами и технологическими трудностями. В связи с этим целью данной работы является оценка в лабораторных условиях работоспособности сетчатых экранов по снижению запыленности воздуха и пылевывброса сыпучего груза при его хранении на портовых открытых складах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования проводились на моделях штабелей с поперечными сечениями в форме призмы и обелиска с использованием натурального сыпучего груза. Методологически проведение исследований на моделях портового оборудования, включая открытые склады с натурным сыпучим грузом обосновано в работах [7], [8], в соответствии с которыми были определены размеры модельных штабелей открытых складов.

Исследования проводились в два этапа:

I этап — определение изменений скорости ветрового потока при обтекании им различной формы сечения штабелей с сетчатыми экранами;

II этап — исследование влияния скорости и направления ветровых потоков на процесс пылеуноса и запыленность воздуха при применении мягкого сетчатого экрана.

Рассмотрим этапы исследований более подробно.

Определение изменений скорости ветрового потока при обтекании им различной формы сечения штабелей с сетчатыми экранами.

Целью исследований I этапа являлась оценка снижения скорости ветрового потока при его взаимодействии со штабелем открытого склада и сетчатым экраном.

Исследования проводились на моделях штабелей с поперечными сечениями в форме призмы и обелиска без сыпучего груза, которые были выполнены из плотного картона в масштабе 1 : 100. Обоснование данного решения приведено в работах [9], [10]. Все схемы и фото оборудования в работе приведены в оригинальном исполнении. Размеры моделей штабелей без груза и схемы расположения точек замеров скоростей ветровых потоков представлены на рис. 1. Необходимо отметить, что угол наклона боковых граней модельных штабелей соответствовал углу естественного откоса такого сыпучего груза, как уголь марки АШ, т. е. 42° .

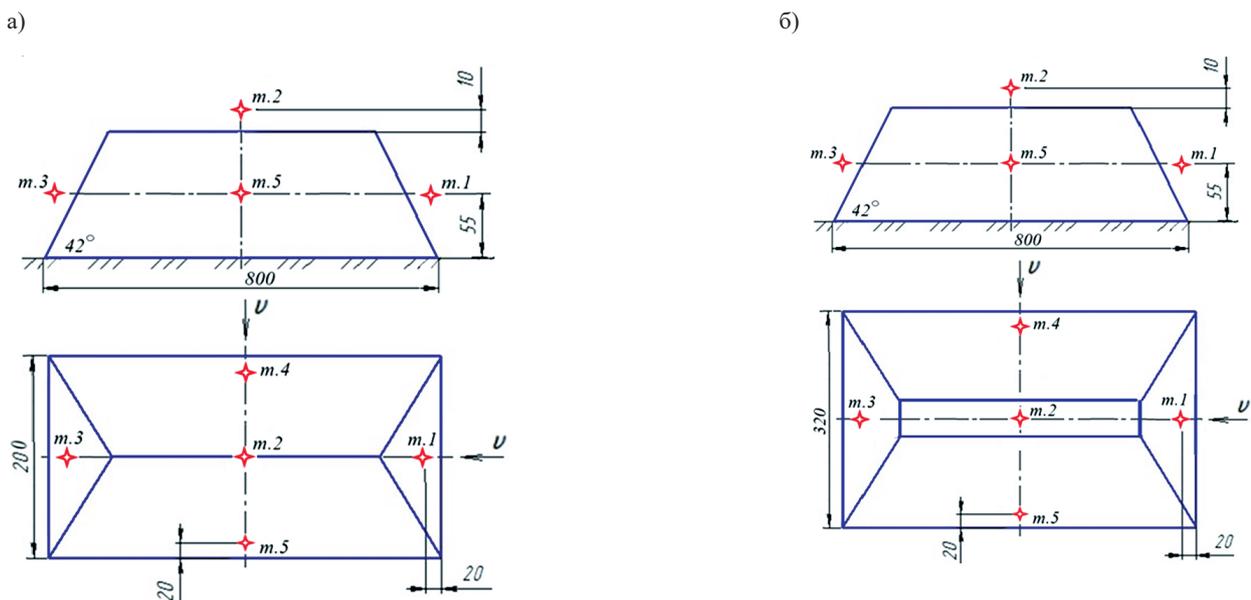


Рис. 1. Размеры моделей штабелей без груза и схемы расположения точек замеров скоростей ветровых потоков, обтекающих штабели:
 а — поперечное сечение в форме призмы; б — поперечное сечение в форме обелиска

Оборудование, использованное для проведения исследований I и II этапов исследований, представлено на рис. 2.

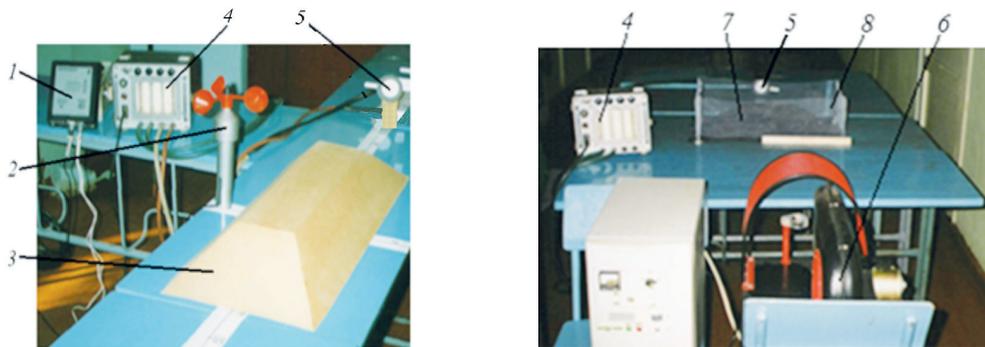


Рис. 2. Оборудование, использованное для проведения исследований I и II этапов:
1 — анемометр цифровой АСЦ-3; 2 — датчик анемометра; 3 — модель штабеля без груза;
4 — аспиратор В-822; 5 — фильтры АФА-В-10; 6 — воздуходувка СКМ-АС2;
7 — модель штабеля с грузом; 8 — сетчатый экран

Была принята следующая методика проведения исследований I этапа. Вначале воздуходувка марки СКМ-АС2 устанавливалась таким образом, чтобы ось ее выходного сопла совпадала с горизонтальной продольной или поперечной осью исследуемого штабеля. Затем при расположении воздуходувки вдоль продольной оси штабеля ею создавался ветровой поток со скоростью 5 м/с и 10 м/с в ближайшей точке от воздуходувки (точка 1 на рис. 1). После этого с помощью цифрового анемометра измерялись скорости ветрового потока в точках 2 и 3. При расположении воздуходувки поперек продольной оси штабеля в ближайшей от нее точке (точка 4 на рис. 1) создавался ветровой поток со скоростью 5 м/с и 10 м/с, после чего с помощью цифрового анемометра АСЦ-3 измерялись скорости ветрового потока в точках 2 и 5. Затем аналогичные замеры проводились на моделях штабелей без груза, но снабженных сетчатыми экранами. Причем расположение точек замера скоростей ветровых потоков оставалось неизменным, а сетчатый экран относительно исследуемого штабеля устанавливался так, как это показано на рис. 3.

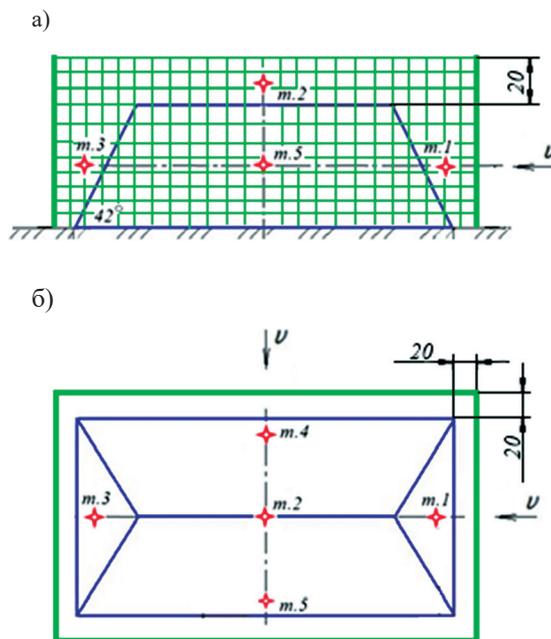


Рис. 3. Установка сетчатого экрана относительно исследуемого штабеля:
а — вид сбоку; б — вид в плане

В качестве сетчатых экранов применялась синтетическая сетка, имеющая коэффициент скважности, равный 0,56. Структура сетки состояла из цилиндрических волокон с размером

ячеек 4×4 мм, что соответствовало реальному сетчатому экрану, применяемому в реальных условиях порта. Продолжительность каждого замера составляла 2 мин. Повторяемость каждой серии замеров — пятикратная.

Исследования влияния скорости и направления ветровых потоков на процесс пылевыброса и запыленность воздуха при применении мягкого сетчатого экрана.

Целью исследований II этапа являлась оценка работоспособности мягкого сетчатого экрана по снижению пылевыброса сыпучего груза с поверхности открытого склада. В качестве сыпучего груза использовался уголь марки АШ с влажностью 0,5–1,0 %, из которого были сформированы модельные штабелы с поперечными сечениями в форме призмы и обелиска. При этом геометрические размеры модельных штабелей с углем соответствовали размерам моделей штабелей, выполненных из картона.

Была принята следующая методика проведения исследований. Сначала воздуходувка марки СКМ-АС2 устанавливалась таким образом, чтобы ось ее выходного сопла совпадала с горизонтальной продольной или поперечной осью исследуемого штабеля. При расположении воздуходувки вдоль продольной оси штабеля воздуходувкой создавался набегающий на штабель с углом ветровой поток со скоростью 5 м/с и 10 м/с (точка 6 на рис. 4). Затем с помощью аспиратора В-822 в точке 8 определялась весовым методом запыленность воздуха как отношение массы пыли на фильтре к объему прошедшего через него запыленного воздуха.

Вес фильтров до и после отбора проб воздуха определялся на аналитических весах марки ВЛА-200М, которые имеют погрешность $\pm 0,1$ мг. Причем аспиратор и воздуходувка включались одновременно. При расположении воздуходувки поперек продольной оси штабеля ею создавался набегающий на штабель с углом ветровой поток со скоростью 5 м/с и 10 м/с (точка 7 на рис. 4). После этого с помощью аспиратора В-822 в точке 9 определялась запыленность воздуха. Затем аналогичные замеры проводились на моделях штабелей с углем, снабженных мягкими сетчатыми экранами. Причем расположение точек замера запыленности воздуха оставалось неизменным, а сетчатый экран относительно исследуемого штабеля устанавливался так, как показано на рис. 4. В качестве сетчатых экранов применялась такая же синтетическая сетка, как и в исследованиях I этапа. Продолжительность каждого замера составляла 2 мин, повторяемость каждой серии замеров — пятикратная.

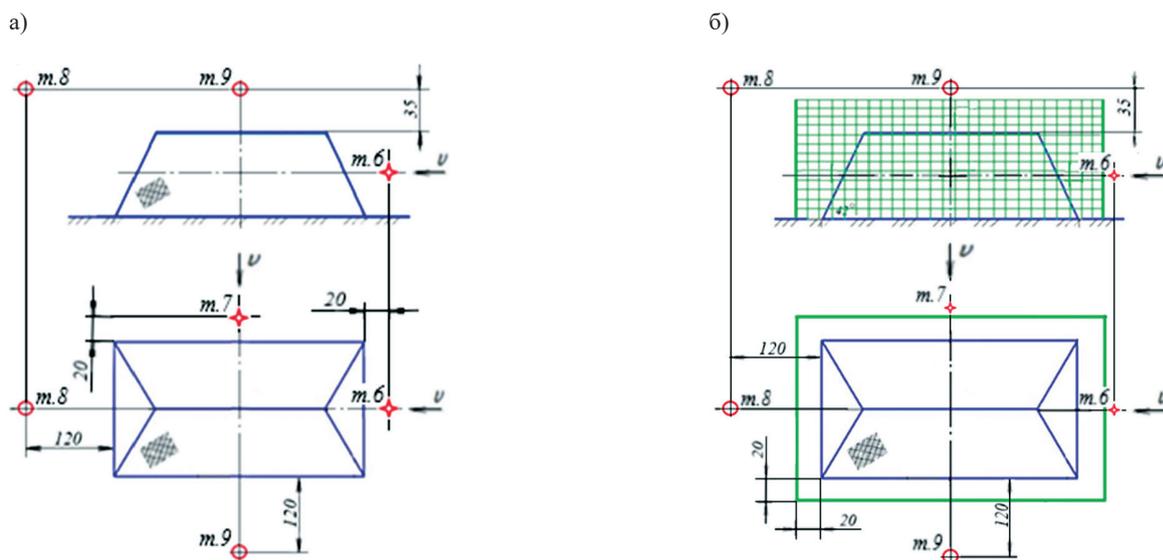


Рис. 4. Схемы расположения точек замера запыленности воздуха при воздействии ветровых потоков на модели исследуемых штабелей с углем: а — штабель без сетчатого экрана; б — штабель с сетчатым экраном

На рис. 5 приведены фото модельных штабелей с углем без сетчатого экрана и с сетчатым экраном.

а)



б)



Рис. 5. Фото модельных штабелей с углем:
а — без сетчатого экрана; б — с сетчатым экраном

Таким образом, предлагаемая методика позволяет оценить эффективность работоспособности мягкого сетчатого экрана по снижению скорости ветрового потока и пылевывоса сыпучего груза с поверхности открытого склада с помощью коэффициента снижения скорости ветра — k_i и коэффициента снижения запыленности — k (см. табл. 1 и табл. 2).

Результаты (Results)

Результаты исследований скорости ветрового потока при обтекании им штабелей различной формы сечения без сетчатых экранов и с сетчатыми экранами при скорости ветрового потока, соответственно, 5 м/с и 10 м/с приведены в табл. 1, составленной авторами работы на основании проведенного исследования.

Таблица 1

Результаты исследований скоростей ветрового потока при обтекании штабелей с различной формой сечения без сетчатых экранов и с сетчатыми экранами при скорости ветрового потока 5 м/с и 10 м/с

Скорость ветрового потока, м/с	Точка замера скорости ветра	Ветровой поток вдоль продольной оси штабеля			Точка замера скорости ветра	Ветровой поток поперек продольной оси штабеля		
		Скорость ветра в точке замера, м/с		Коэффициент снижения скорости ветра (k_i), $k_i = v_i / v_i^0$		Скорость ветра в точке замера, м/с		Коэффициент снижения скорости ветра (k_i), $k_i = v_i / v_i^0$
		v_i экрана нет	v_i^0 экран есть			v_i экрана нет	v_i^0 экран есть	
Штабель с поперечным сечением в форме призмы								
5	1	5,0	3,1	1,61	4	5,0	2,9	1,72
	2	1,9	0,1	19,0	2	1,1	0,2	5,5
	3	0,6	0,4	1,5	5	0,4	0,2	2,0
10	1	10	5,2	1,92	4	10	4,5	2,22
	2	3,5	1,9	1,84	2	4,2	0,7	6,0
	3	4,0	0,9	4,4	5	2,3	0,6	3,83
Штабель с поперечным сечением в форме обелиска								
5	1	5	3,0	1,67	4	5,0	2,8	1,79
	2	2	0,2	10,0	2	2,2	0,2	11,0
	3	0,5	0,3	1,67	5	0,7	0,3	2,33
10	1	10	5,5	1,82	4	10	4,4	2,27
	2	3,7	2,0	1,85	2	6,0	0,8	7,50
	3	4,2	1,0	4,2	5	2,6	0,9	2,89

Результаты исследований работоспособности мягкого сетчатого экрана по снижению запыленности воздуха при пылевывосе угля со штабелей с различной формой сечения при скорости ветрового потока, соответственно, 5 м/с и 10 м/с приведены в табл. 2, составленной авторами работы на основании проведенного исследования.

Таблица 2

Результаты исследований работоспособности мягкого сетчатого экрана по снижению запыленности воздуха при пылевывбросе угля со штабелей с различной формой сечения при скорости ветрового потока 5 м/с и 10 м/с

Скорость ветрового потока, м/с	Точка замера запыленности воздуха	Ветровой поток вдоль продольной оси штабеля			Точка замера запыленности воздуха	Ветровой поток поперек продольной оси штабеля		
		Запыленность воздуха в точке замера, мг/м ³		Коэффициент снижения запыленности (k), $k = q_i / q_i^{\circ}$		Запыленность воздуха в точке замера, мг/м ³		Коэффициент снижения скорости (k), $k = q_i / q_i^{\circ}$
		q_i экрана нет	q_i° экран есть			q_i экрана нет	q_i° экран есть	
Штабель с поперечным сечением в форме призмы								
5	8	80	42	1,9	9	26	15	1,7
10	8	308	134	2,3	9	91	35	2,6
Штабель с поперечным сечением в форме обелиска								
5	8	25	14	1,8	9	95	50	1,9
10	8	1960	726	2,7	9	588	235	2,5

Результат обработки данных показывает, что эффективность мягких сетчатых экранов по снижению скорости ветра и уменьшению запыленности воздуха существенным образом зависит от направлений и скоростей ветровых воздействий на штабеля портовых открытых складов.

Обсуждение (Discussion)

Анализ результатов I этапа исследований (см. табл. 1) позволяет утверждать следующее:

- при продольном воздействии ветрового потока 5 м/с на модели штабелей с сетчатым экраном скорости ветра внутри периметра экрана у боковых сторон штабеля снижаются в 1,5–1,67 раз, а над штабелем — в 10–19 раз;
- при поперечном воздействии ветрового потока 5 м/с на модели штабелей с сетчатым экраном скорости ветра внутри периметра экрана у торцевых сторон штабеля снижаются в 1,72–2,33 раза, а над штабелем — в 5,5–11 раз;
- при продольном воздействии ветрового потока 10 м/с на модели штабелей с сетчатым экраном скорости ветра внутри периметра экрана у боковых сторон штабеля снижаются в 1,8–4,4 раз, а над штабелем — в 1,84–1,85 раз;
- при поперечном воздействии ветрового потока 10 м/с на модели штабелей с сетчатым экраном скорости ветра внутри периметра экрана у торцевых сторон штабеля снижаются в 2,22–3,83 раза, а над штабелем — в 6,0–7,5 раз;
- с увеличением скорости ветрового потока с 5 м/с до 10 м/с работоспособность сетчатых экранов по снижению скоростей ветра внутри периметра экрана возрастает на 1,2–2,6 раз при продольном направлении ветрового потока и при поперечном направлении потока на 1,3–1,6 раз;
- форма поперечного сечения штабеля практически не оказывает влияния на работоспособность мягкого сетчатого экрана по снижению скорости ветра внутри периметра экрана.

Анализ результатов II этапа исследований (см. табл. 2) показывает следующее:

- при продольном воздействии ветрового потока 5 м/с на модели штабелей с углем сетчатый экран снижает запыленность воздуха в 1,8–1,9 раз, при поперечном воздействии — 1,7–1,9 раз;
- при продольном воздействии ветрового потока 10 м/с на модели штабелей с углем сетчатый экран снижает запыленность воздуха в 2,3–2,7 раз, при поперечном воздействии — 2,5–2,6 раз;
- с увеличением скорости ветрового потока с 5 м/с до 10 м/с работоспособность сетчатых экранов по снижению запыленности воздуха возрастает в 1,2–1,5 раз при продольном направлении ветрового потока, при поперечном направлении потока в 1,3–1,5 раз.

Выводы (Summary)

На основании основных результатов, полученных в настоящем исследовании, можно сделать следующие выводы:

1. Сетчатые экраны являются работоспособными и эффективными устройствами по снижению скорости ветрового потока внутри периметра экрана, что обеспечивает уменьшение пылевыбросов сыпучих грузов с портовых открытых складов.

2. Форма поперечного сечения штабеля, снабженного по периметру сетчатым экраном, не оказывает влияние на уровень его работоспособности по снижению скорости ветрового потока внутри периметра экрана, а также уменьшению запыленности воздуха и размера пылевыброса.

3. Уровень работоспособности сетчатого экрана по уменьшению запыленности воздуха и размера пылевыброса со штабелей складов с различной формой поперечного сечения зависит от направления и скорости ветрового потока.

4. Применение мягких сетчатых экранов, расположенных по периметру штабеля открытого склада с углем, позволяет уменьшить запыленность воздуха и пылевыброс при скорости ветрового воздействия 5 м/с в среднем в 1,8 раз, при скорости ветрового воздействия 10 м/с — в среднем в 2,5 раз.

5. Поскольку результаты получены в лабораторных условиях на моделях в соответствии с принципом воспроизводимости научных результатов, их целесообразно проверить с помощью проведения натуральных экспериментов. Кроме того, целесообразно продолжить работы по исследованию работоспособности как мягких, так и жестких экранов с учетом их параметров: скважности, конструкции, размеров, установки относительно штабеля и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голохваст К. С. Экологическое состояние малых населенных пунктов Дальнего Востока России по данным микроразмерного загрязнения атмосферы / К. С. Голохваст, П. А. Никифоров, В. В. Чайка [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т. 16. — № 1–3. — С. 624–627.

2. Голохваст К. С. Первые данные по вещественному составу атмосферных взвесей Владивостока / К. С. Голохваст, И. Ю. Чекрыжов, А. М. Паничев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 1–8. — С. 1853–1857.

3. Ревич Б. А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения / Б. А. Ревич // Проблемы прогнозирования. — 2010. — № 4 (121). — С. 87–99.

4. Васина Д. Решение экологических проблем угольных терминалов Владивостока / Д. Васина, И. Рапопорт, И. Тесленко // International journal of Professional Science. — 2021. — № 6. — С. 27–36.

5. Эпштейн С. А. Опыт применения полимерной эмульсии для снижения пыления углей при их перемещении / С. А. Эпштейн, Д. И. Гаврилова, И. Г. Завелев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 10. — С. 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-5-15.

6. Кожевникова О. М. Проблемы борьбы с пылью на морских угольных терминалах / О. М. Кожевникова, И. В. Московская, П. Е. Похил // Globus: Технические науки. — 2021. — Т. 7. — № 3 (39). — С. 25–28.

7. Балашова А. А. Особенности использования угля в Китае и возможные пути снижения негативного воздействия на окружающую среду / А. А. Балашова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2010. — Т. 6. — № 5 (62). — С. 92–96.

8. Мазуренко О. И. Оценка мирового опыта оснащения и эксплуатации экспортных перегрузочных комплексов по перевалке угля в морских портах / О. И. Мазуренко // Научное обозрение. Технические науки. — 2020. — № 5. — С. 48–57.

9. Костюничев Д. Н. Экспериментальный метод определения количественных характеристик потерь сыпучих грузов при перегрузке грейфером / Д. Н. Костюничев, Н. С. Отделкин, Д. О. Зименков // Научные проблемы водного транспорта. — 2023. — № 76. — С. 210–218. DOI: 10.37890/jwt.v76.396.

10. Отделкин Н. С. Эколого-экономическое обоснование параметров открытых складов навалочных грузов путем прогнозирования процесса пылеуноса / Н. С. Отделкин, Д. Н. Костюничев // Экологические системы и приборы. — 2005. — № 1. — С. 30–32.

REFERENCES

1. Golokhvast, K. S., P. A. Nikiforov, V. V. Chayka, N. G. Ostapenko, S. A. Razgonova, Ya. Yu. Blinovskaya, V. V. Slesarenko, Yu. S. Doroshev, N. V. Zemlyanaya, A. A. Fatkulin, and A. I. Agoshkov. "Ecological state of small settlements at Far East of Russia according to data of microdimensional pollution of the atmosphere." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 16.1–3 (2014): 624–627.
2. Golokhvast, K. S., I. Y. Chekryzhov, A. M. Panichev, P. F. Kiku, N. K. Khristoforova, and A. N. Gulkov. "The first data on the material composition of atmospheric suspensions in Vladivostok city." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 13.1–8 (2011): 1853–1857.
3. Revich, B. A. "Assessment of the effect produced by the fuel and energy complex on the environment and health." *Studies on Russian Economic Development* 21.4 (2010): 403–410.
4. Vasina, D., I. Rapoport, and I. Teslenko. "Solving environmental problems of open coal terminals in Vladivostok." *International Journal of Professional Science* 6 (2021): 27–36.
5. Epshtein, S. A., D. I. Gavrilova, I. G. Zavelev, S. A. Shamshin, and E. Yu. Yurin. "Application of polymer emulsion in dust emission control during coal haulage." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 10 (2019): 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-5-15.
6. Kozhevnikova, O. M., I. V. Moskovaya, and P. E. Pohil. "Problems of dust control at the sea coal terminals." *Globus: Technical Sciences* 7.3(39) (2021): 25–28.
7. Balashova, A. A. "Osobennosti ispol'zovaniya uglya v Kitae i vozmozhnye puti snizheniya negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredyu." *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'* 6. 5(62) (2010): 92–96.
8. Mazurenko, O. I. "World experience of equipping and operating of coal export transshipment complexes." *Scientific Review. Technical sciences* 5 (2020): 48–57.
9. Kostyunichev, D. N., N. S. Otdelkin, and D. O. Zimenkov. "Experimental method of determining bulk cargo losses quantitative characteristics during grappling overload." *Russian Journal of Water Transport* 76 (2023): 210–218. DOI: 10.37890/jwt.vi76.396/
10. Otdelkin, N. S., and D. N. Kostyunichev. "Ecological and economic substantiation of parameters of ground storages of bulk cargoes by forecasting of dust-priming process." *Ecological Systems and Devices* 1 (2005): 30–32.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костюничев Денис Николаевич —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «Волжский государственный
 университет водного транспорта»
 603950, Российская Федерация, Н. Новгород,
 ул. Нестерова, 5
 e-mail: kostyunichev.dn@vsuwt.ru

Отделкин Николай Станиславович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «Волжский государственный
 университет водного транспорта»
 603950, Российская Федерация, Н. Новгород,
 ул. Нестерова, 5
 e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kostyunichev, Denis N. —
 PhD, associate professor
 Volzhsky State University
 of Water Transport
 5 Nesterova Str., N. Novgorod, 603950,
 Russian Federation
 e-mail: kostyunichev.dn@vsuwt.ru

Otdelkin, Nikolay S. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Volzhsky State University
 of Water Transport
 5 Nesterova Str., N. Novgorod, 603950,
 Russian Federation.
 e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2023 г.
 Received: November 1, 2023.

LINER SHIPPING NETWORK DESIGN PROBLEM IN MODERN TRANSPORTATION SYSTEM OF RUSSIA

A. V. Galin, P. S. Rudny

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

The liner shipping network design problem is considered in the paper. This problem is particularly relevant in the current global political and economic conditions, where finding optimal solutions for business becomes crucial for survival. State-of-the-art formulations and methods for solving the problem in domestic and international scientific papers are discussed. Four types of liner services such as simple service, “butterfly”, “pendulum” and complex service are described. A simple service that can be reduced to the traveling salesman problem is primarily focused on. Our own formulation of the problem is proposed and an example of liner shipping network description, based on the proposed formulation, is provided. In the example, presented in the paper, a container line, based on a single domestic seaport (Vladivostok) and four seaports in China, is demonstrated. It should be noticed, that the problem includes several optimization sub-problems (such as multi-commodity flow problem), solving which is important for finding best solutions for the designed shipping line, but is outside the bounds of this research. The liner services as a sequence of vessel calls to ports are described; and some results of the foregoing generation process are discussed. The optimal solution is selected from the set of generated solutions. It represents a particular case that simultaneously has the lowest costs for implementing the container line and the highest number of serviced container flows. It is noted that this solution is optimal only within the generated solution space and may not be optimal for the considered example of the problem.

Keywords: container line, line shipping, liner shipping network design problem, shipping line optimization, container service, seaport.

For citation:

Galina, Aleksandr V., and Pavel S. Rudny. “Liner shipping network design problem in modern transportation system of Russia.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

УДК 656.6

ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛИНИИ В СОВРЕМЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ РОССИИ

А. В. Галин, П. С. Рудный

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

В статье рассмотрена задача проектирования контейнерной линии, являющаяся особенно актуальной в современных мировых политических и экономических условиях, когда поиск оптимальных решений для бизнеса жизненно необходимы. Обсуждаются современные подходы к формулировке задачи проектирования контейнерной линии и методы ее решения, рассматриваемые в отечественной и иностранной литературе. Описываются четыре вида линейных сервисов, встречающихся в рамках проектирования контейнерной линии: простой сервис, «бабочка», «маятник» и сложный сервис. Основное внимание в работе уделено простому сервису, который может быть сведен к задаче коммивояжера. Предложена новая формулировка задачи и на ее основе рассмотрен пример описания проектируемой линии: контейнерная линия, базирующаяся на один отечественный морской порт (Владивосток) и четыре морских порта КНР. Отмечается, что задача может включать другие оптимизационные подзадачи, в том числе задачу распределения множества грузопотоков, решение которых является важным для нахождения рациональных вариантов проектируемой контейнерной линии, но в данной работе не рассматривается, поскольку выходит за пределы настоящего исследования. Описана генерация вариантов линейных сервисов в виде последовательности обхода портов, проанализированы некоторые ее результаты. Среди сгенерированных вариантов выбран оптимальный,

который в виде частного случая одновременно имеет как наименьшие затраты на введение контейнерной линии в эксплуатацию, так и наибольшее количество обслуживаемых контейнеропотоков. Отмечается, что этот вариант является оптимальным лишь в сгенерированной области решений и может не являться оптимальным для рассмотренного примера задачи.

Ключевые слова: контейнерная линия, линейное судоходство, задача проектирования, контейнерная линия, оптимизация судоходной линии, контейнерный сервис, морской порт.

Для цитирования:

Галин А. В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А. В. Галин, П. С. Рудный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

Введение (Introduction)

В условиях современной мировой экономической и политической ситуации вопрос создания новых и развития существующих транспортных систем Российской Федерации является особенно актуальным. Разработка и внедрение новых технологий перевозки, перегрузки грузов, а также новых подходов к оптимизации их доставки играет немаловажную роль в экономической стабильности страны. Это относится также и к такой сфере, как *линейное контейнерное судоходство*, где оптимизация кругового рейса линии является одной из важнейших задач, от решения которой может зависеть успех целых предприятий.

Задача проектирования контейнерной линии, называемая в зарубежной литературе *Liner Shipping Network Design Problem (LSNDP)*, может быть сформулирована следующим образом: *при наличии множества портов захода, флота судов-контейнеровозов и множества заявок на перевозки между портами необходимо найти такое множество контейнерных сервисов, чтобы суммарные операционные расходы были минимизированы*. При этом все заявки на перевозки должны быть выполнены, т. е. все контейнеры доставлены до их пунктов назначения. Далее данная задача называется LSNDP.

Рассматриваемая задача является NP-трудной, что доказано авторами статьи [1] путем сведения LSNDP к задаче коммивояжера. Сведение данной задачи к задаче коммивояжера отмечается также и в работе [2]. Авторы исследования [3] отмечают, что каждые 3–6 месяцев линейный перевозчик должен адаптировать свой линейный сервис (менять ротацию портов, расстановку флота) в соответствии с прогнозом грузопотоков между портами на следующие 3–6 месяцев.

В зарубежных исследованиях задачи проектирования судоходного сервиса (Shipping Network Design Problem) разделены на два типа: задачи по разработке сервиса трампового судоходства (Tramp Shipping Service Network Design Problem) и задачи по разработке линейного сервиса (Liner Shipping Service Network Problem) [4]. В первом случае разрабатываемый сервис не имеет фиксированной последовательности заходов в порты и расписания работы, во втором — имеются как расписание, так и фиксированная последовательность обхода портов судами.

Авторы обзорной статьи [5] отмечают, что проанализированные ими исследования отличаются друг от друга в основном следующими четырьмя аспектами:

1. *Ограничения времени транзита.* Для каждой потребности в перевозке контейнеров устанавливается связанный с ней временной лимит, который необходимо соблюдать. Если временные ограничения не соблюдаются, то скоропортящиеся грузы могут испортиться.

2. *Стоимость транспортировки.* Затраты на перегрузки являются значительной частью операционных затрат [6], поэтому важно правильно учитывать их в модели.

3. *Отклоненные потребности.* Несмотря на то, что согласно стандартной формулировке LSNDP все заявки на перевозку контейнеров должны проходить через сеть, многие модели позволяют отклонять заявки.

4. *Оптимизация скорости.* Существует три основных подхода к оптимизации скорости судов при моделировании: модели, в которых скорость движения судов постоянна для всех сервисов; модели, в которых скорость подбирается для каждого сервиса отдельно; модели, в которых скорость

подбирается для каждого плеча перевозки внутри каждого сервиса отдельно. Поскольку расход топлива нелинейно зависит от скорости, обычно производится выбор из нескольких дискретных альтернатив скорости, каждая из которых имеет соответствующую стоимость.

Выделяют следующие разновидности вариантов схем организации сервисов [5]:

- *простой сервис* — суда, работающие на линии, заходят во все порты ровно один раз и возвращаются в исходный порт;
- *сервис «бабочка»* — один из портов является хабом, в который суда заходят несколько раз за время одного кругового рейса, в остальные порты суда заходят по одному разу;
- *сервис «маятник»* — суда заходят в каждый порт по два раза: один раз продвигаясь «вперед» по маршруту, второй раз — «назад»;
- *сложный сервис* (в общем случае) — любой сервис, в котором хотя бы один порт захода посещается судами более одного раза.

Данные виды линейных сервисов представлены на рис. 1.

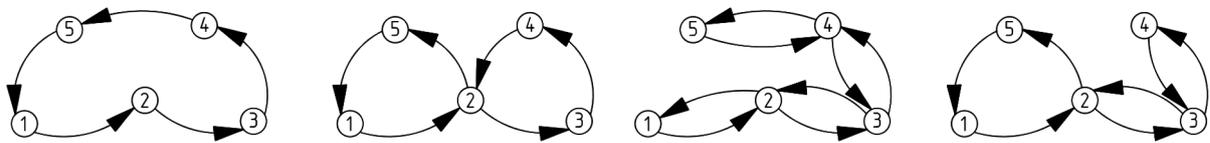


Рис. 1. Варианты схем организации сервисов контейнерных линий:
а — простой сервис; б — сложные сервисы (слева направо):
сервис «бабочка», сервис «маятник», сложный сервис в общем виде

Сервисы, представленные на рисунке, базируются на пять портов и могут быть записаны в виде приведенной последовательности:

- простой сервис: $s = \{1; 2; 3; 4; 5; 1\}$;
- сервис «бабочка»: $s = \{1; 2; 3; 4; 2; 5; 1\}$;
- сервис «маятник»: $s = \{1; 2; 3; 4; 5; 4; 3; 2; 1\}$;
- сложный сервис: $s = \{1; 2; 3; 4; 3; 2; 5; 1\}$.

Среди множества вариантов различных линейных сервисов, которые могут базироваться на заданное множество портов, нетрудно выделить такое подмножество S , в котором сервисы будут являться перспективными с точки зрения оптимальности. Однако при этом даже подмножество заранее выбранных сервисов может иметь значительные размеры — такие, что проверка всех вариантов решений методом полного перебора займет продолжительное время.

Выбор перспективных линейных сервисов может быть подкреплен аналитическими расчетами [7], [8]. Расчеты, представленные в исследовании [7], учитывают не только характеристики судов, размещаемых на линии и потребности в обслуживании контейнеропотоков, но и потребность в парке оборудования (в данном случае имеются ввиду сами контейнеры). В некоторых случаях (особенно при небольшом количестве портов базирования линии) применения таких аналитических методов будет достаточно для определения оптимального варианта организации сервиса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для решения задачи проектирования контейнерной линии необходимо ввести следующие параметры:

- v — экономическая скорость передвижения судна между портами, уз;
- P_{STS} — производительность перегружателя STS, конт./ ч;
- N — множество портов захода;
- A — матрица переходов между портами;
- a — переход $a = (i, j)$ между портами i и j , $a \in A$;
- D — матрица расстояний между портами;

- d_{ij} — расстояние перехода между портами $i, j \in N$, морские мили;
 T — матрица времени переходов между портами;
 t_{ij} — время перехода между портами $i, j \in N$, ч;
 K — множество контейнеропотоков;
 o_k — порт зарождения контейнеропотока $k \in K$;
 d_k — порт доставки контейнеропотока $k \in K$;
 q_k — размер потребности в обслуживании контейнеропотока $k \in K$, TEU;
 V — множество расчетных типов судов;
 u_v — контейнеровместимость расчетного типа судна $v \in V$, TEU;
 m_v — количество доступных для фрахтования судов типа $v \in V$, ед.;
 c_v — стоимость заключения чартера на работу судна типа $v \in V$ на линии, у. е.;
 KN — матрица потребностей в обслуживании контейнеропотоков из множества K между портами из множества V ;
 η_{ki} — потребность в обслуживании контейнеропотока $k \in K$ относительно порта $i \in N$, TEU;
 $c_{пер\ a}$ — стоимость перехода судна $a = (i, j)$ из порта i в порт j , у. е.;
 $c_{ПСi}$ — стоимость обслуживания судна в порту i , у. е.;
 S — множество сгенерированных линейных сервисов. При этом генерация сервисов может быть ограничена правилами (например, при генерации простого сервиса судно должно посетить все порты только один раз);
 s — линейный сервис $s \in S$ (записывается в виде последовательности обхода портов);
 q_{bs} — размер контейнеропотока $b \in K$, обслуженного сервисом $s \in S$, выраженный в TEU.

В матрицу D вносятся данные о расстояниях морских переходов между портами, имеющиеся в открытом доступе либо взятые из таблиц расстояний между морскими портами. В матрицу времени переходов между морскими портами i и j вносятся значения $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v}$. В матрицу потребностей в обслуживании контейнеропотоков между портами (KV) вносятся значения следующим образом:

$$\eta_{ki} = \begin{cases} q_k, & \text{если } i = o_k; \\ -q_k, & \text{если } i = d_k; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где η_{ki} — потребность в обслуживании контейнеропотока $k \in K$ в порту $i \in N$, TEU.

В соответствии с формулой (1), если порт i оказался источником зарождения грузопотока k ($i = o_k$), то значение потребности η_{ki} должно быть равно значению размера контейнеропотока q_k , TEU. Если порт i оказался местом доставки грузопотока k ($i = d_k$), то значение потребности η_{ki} должно быть равно по модулю и противоположно по знаку размеру контейнеропотока: $-q_k$, TEU. Во всех остальных случаях порт i не является ни источником, ни местом доставки грузопотока k и $\eta_{ki} = 0$.

При генерации сервиса $s \in S$ происходит подсчет расходов на сгенерированный сервис. Данные расходы состоят из трех основных составляющих: стоимость чартера судна при его размещении на линии (вычисляется один раз для сервиса), c_v ; стоимость обслуживания судна (портовые сборы) при совершении судозахода в порт, $c_{ПСi}$ (вычисляется для каждого судна и каждого порта); стоимость перехода судна $a = (i, j)$ из порта i в порт j (вычисляется для каждого плеча перехода $a = (i, j)$, входящего в состав сервиса s), $c_{пер\ a}$:

$$c_s = c_v + \sum_{i=1}^{n_s} c_{ПСi} + \sum_{a=1}^{m_s} c_a, \quad (2)$$

где c_s — суммарные расходы на работу сервиса s , у. е.;

n_s — количество портов захода, входящих в сервис s , ед. (при этом если порт захода повторяется в сервисе несколько раз (сложный сервис), то порт учитывается тоже несколько раз (при подсчете n_s и при подсчете расходов));

m_s — количество переходов между портами, входящими в сервис (зависит от количества портов захода, входящих в сервис, ед.)

Необходимо отметить, что в состав задачи проектирования контейнерной линии входит задача распределения грузов по проектируемой сети, называемая в иностранной литературе *задачей распределения множества грузопотоков* (Multi-Commodity Flow Problem, MCFP) [9]. В случае дробных грузопотоков эта задача может быть решена за полиномиальное время. При большом количестве разновидностей грузопотоков данная задача может быть достаточно ресурсоемкой для вычисления. В связи с этим она не решается в рамках настоящего исследования, так как в сформулированной задаче отсутствует необходимость максимизировать использование судов для транспортировки контейнеров — вместо этого вместимость одного судна делится на три равные части. Каждая часть предназначена для обслуживания лишь одного из всех возможных контейнеропотоков $k \in K$. При этом контейнеропотоки, обслуживаемые одним и тем же сервисом, не могут повторяться, т. е. $b_1 \neq b_2 \neq b_3$, где $b_1, b_2, b_3 \in K$. Контейнеропотоки b_1, b_2, b_3 генерируются для каждого сервиса случайным образом.

Отсутствие оптимизации задачи MCFP отражается на формулируемой задаче проектирования контейнерной линии в виде появления *нерациональных судозаходов*. Это означает, что согласно модели, разработанной в настоящем исследовании, судно заходит в некоторый порт несмотря на то, что в нем нет ни погрузки, ни выгрузки контейнеров.

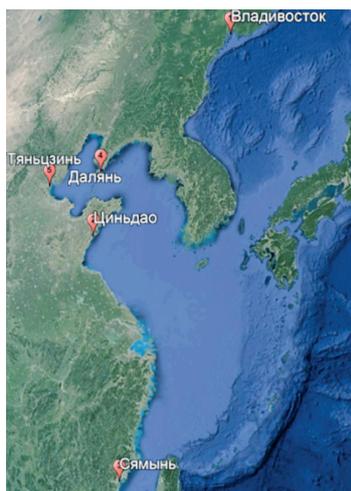
Для каждого порта, входящего в сервис s , определяется количество контейнеров, погружаемых на борт судна (q_k) или выгружаемых с борта судна ($-q_k$). Для этого применяется формула (1) для каждого из трех контейнеропотоков b_1, b_2, b_3 , обслуживаемых сервисом s . Однако для использования формулы (1) необходимо учитывать количество одновременно генерируемых сервисов.

В объеме формулируемой задачи количество одновременно генерируемых сервисов равно общему количеству доступных судов всех типов — $\sum_{v \in V} m_v$, т. е. всегда используется весь доступный флот. В этом случае, если контейнеропоток k имеет размер $q_k < \sum_{v \in V} u_v$, то одновременная генерация

сервисов может привести к некорректным решениям, поскольку несколько сервисов одновременно могут обслуживать один и тот же контейнеропоток, что может привести к тому, что суммарный обслуженный контейнеропоток по всем сервисам будет больше, чем потребность в его обслуживании, а это невозможно. Во избежание этого матрица потребностей в обслуживании контейнеропотоков между портами (KV) генерируется не один раз, а для каждого сервиса в отдельности. Один из сервисов (логично выбрать тот, на котором размещается самое крупное судно) имеет наиболее высокий приоритет. Для него матрица KV генерируется по формуле (1). Для каждого следующего сервиса z матрица KV генерируется пошагово с понижением приоритета, а также учетом того, какие контейнеропотоки и в каком размере были обслужены ранее.

Результаты (Results)

Предложенная формулировка задачи проектирования контейнерной линии продемонстрирована на следующем примере. Рассмотрим возможную контейнерную линию, базирующуюся на пяти морских портах. Выберем для этого порт Владивосток и четыре порта Китайской Народной Республики (КНР). Такой выбор обусловлен современными экономическими и политическими условиями, в которых товарооборот между РФ и КНР вырос на 30 % за 2022 г. [10], что способствует развитию транспортных коридоров именно на этом географическом направлении. Выбранные порты и информация о переходах между ними представлены на рис. 2.



		1	2	3	4	5
	<i>D</i> , мор. миль	Владивосток	Циньдао	Сямынь	Далянь	Тяньцзинь
1	Владивосток		1001	1390	1048	1193
2	Циньдао	1001		846	356	412
3	Сямынь	1390	846		1002	1147
4	Далянь	1048	356	1002		198
5	Тяньцзинь	1193	412	1147	198	
	<i>T</i> , ч	Владивосток	Циньдао	Сямынь	Далянь	Тяньцзинь
1	Владивосток		50,1	69,5	52,4	59,7
2	Циньдао	50,1		42,3	17,8	20,6
3	Сямынь	69,5	42,3		50,1	57,4
4	Далянь	52,4	17,8	50,1		9,9
5	Тяньцзинь	59,7	20,6	57,4	9,9	

Рис. 2. Пример базирования контейнерной линии в пяти портах

Предположим, что при проектировании линии доступно три типа судов с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики судов при проектировании контейнерной линии

Расчетный тип судна	Вместимость, TEU	Доступное кол-во судов, ед.	Стоимость чартера, у. е.	Регистровый тоннаж, рег. т
<i>V</i>	<i>u_v</i>	<i>m_v</i>	<i>c_v</i>	<i>GRT</i>
1	500	3	10000	7000
2	1000	2	20000	14000
3	2000	1	40000	28000

Информация о семи требующих обслуживания контейнеропотоках приведена в табл. 2.

Таблица 2

Данные о контейнеропотоках, требующих обслуживания

Контейнеропоток	Порт зарождения	Порт назначения	Размер контейнерного потока, TEU
<i>K</i>	<i>o_k</i>	<i>d_k</i>	<i>q_k</i>
1	1	5	150
2	2	4	400
3	1	3	550
4	3	1	1000
5	5	2	1500
6	4	2	500
7	2	5	350

Как видно из табл. 1, общее число доступных судов равно 6 ед. Это означает, что число одновременно генерируемых сервисов также равно шести. Экономическая скорость судна принята равной 20 уз для всех судов и переходов между портами. Стоимость топлива принята равной 80 у. е. за 1 т, стоимость портовых сборов за судозаход — около 0,33 у. е. за 1 рег. т для порта Владивосток. Для четырех портов КНР стоимость судозахода генерируется на основе стоимости судозахода во Владивосток, к которой добавляется случайное значение.

Пример генерируемого сервиса представлен в виде табл. 3. Данный сервис является простым, т. е. судно, размещенное в таком сервисе, должно совершить ровно по одному судозаходу в каждый порт. Генерировались только простые сервисы. В табл. 3 выделена последняя строка,

в которой генерируется последовательность судозаходов. Последний порт в последовательности совпадает с первым и, таким образом, сервис является *циклическим*. В столбце «Количество нерациональных судозаходов» указывается количество судозаходов, смысл которых, как отмечалось ранее, отсутствует из-за отказа от решения задачи МСФР. Для приведенного примера таким судозаходом является заход в порт 4 (Далянь), где судно не производит операций по погрузке / выгрузке контейнеров. Данный недостаток предложенной формулировки задачи требует дальнейшего решения.

Таблица 3

Пример генерируемого сервиса

Тип судна $v = 3$	Контейнеропотоки портов сервиса						Расходы всего, у. е.	Кол-во нерациональных судозаходов	Всего конт. обслужено, TEU
	1-й порт	2-й порт	3-й порт	4-й порт	5-й порт	1-й порт			
Контейнеропоток b1,	5								
TEU	0	-667	0	0	667				667
Контейнеропоток b2,	7								
TEU	0	350	0	0	350				350
Контейнеропоток b2,	4								
TEU	-667	0	667	0	0				667
Количество слотов для одного контейнеропотока, $uv / 3$	667								
Сумма контейнеропотоков	-667	-317	667	0	317				
Нерациональные судно-заходы	0	0	0	1	0			1	
Расходы на чартер судна							40000		
Расходы на переходы между портами	0	6265	6776	6677	5060	5928	30707		
Расходы на судозаходы	0	2836	2951	2555	2274	2259	12875		
Сервис 6	1	2	3	4	5	1	83582	1	1684

Генерации сервисов могут быть многократно повторены, например, благодаря средствам VBA для Excel. В рамках данного примера повтор генерации шести сервисов выполнен 100 раз. По результатам собраны данные о составе каждого сгенерированного простого сервиса (по шесть сервисов в одной генерации), о суммарных расходах на шесть сервисов, определенных по формуле (2), о суммарном количестве нерациональных судозаходов и о суммарном размере контейнеропотока, обслуженного шестью сервисами. Результаты генераций в графической форме представлены на рис. 3.

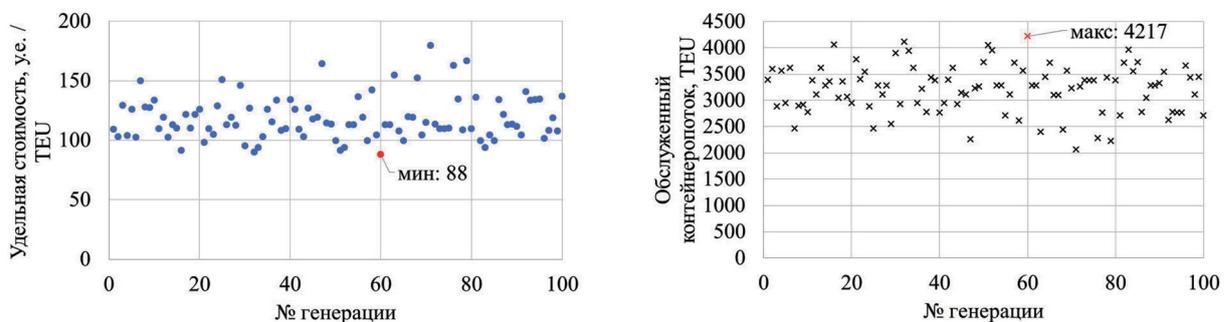


Рис. 3. Результаты ста повторных генераций шести сервисов, базирующихся на пять портов

Помимо указанных ранее показателей для каждой генерации выведен показатель удельных расходов на введение в работу шести сервисов, который определяется как отношение суммарных расходов для шести сервисов к суммарному обслуженному контейнеропотоку шести сервисов и выражается в у. е. / TEU.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее успешной генерацией сервисов может считаться та, для которой удельные расходы (у. е. / TEU) являются минимальными. Такой генерацией в рассматриваемом случае является № 59, для которой удельные расходы составляют 88 у. е. / TEU. Поскольку суммарные расходы для генераций отличаются несущественно, так как генерируются только простые сервисы, в которые входят одни и те же порты заходов, № 59 также является генерацией с максимальным обслуженным контейнеро-поток, равным 4217 TEU. В нее входят следующие шесть сервисов:

- Далянь → Тяньцзинь → Циньдао → Владивосток → Сямынь → Далянь (судно 1);
- Циньдао → Тяньцзинь → Далянь → Владивосток → Сямынь → Циньдао (судно 1);
- Циньдао → Сямынь → Далянь → Тяньцзинь → Владивосток → Циньдао (судно 1);
- Сямынь → Далянь → Владивосток → Циньдао → Тяньцзинь → Сямынь (судно 2);
- Сямынь → Циньдао → Владивосток → Далянь → Тяньцзинь → Сямынь (судно 2);
- Тяньцзинь → Сямынь → Далянь → Владивосток → Циньдао → Тяньцзинь (судно 3).

Представленные варианты размещения судов являются наиболее рациональными для сгенерированных ста вариантов расстановок судов по шести сервисам. Однако необходимо отметить, что указанные варианты расстановки не исчерпывают область возможных решений. Оптимальное решение может находиться за пределами рассматриваемых случаев, предназначенных лишь для демонстрации разнообразия сервисов с точки зрения их показателей даже для небольшого числа портов. Кроме того, в генерациях не участвуют сложные сервисы, наличие которых многократно усложняет задачу оптимизации проектируемой контейнерной линии.

Заключение (Conclusion)

На основе результатов проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. В настоящей статье сформулирована задача проектирования контейнерной линии. Были обсуждены основные положения данной проблемы, отмеченные в отечественной и иностранной литературе. Сформулированная задача является лишь первым шагом на пути к построению оптимальной контейнерной линии.
2. В рамках данного исследования не рассматриваются алгоритмы оптимизации контейнерной линии. Задача оптимизации линии включает необходимость решения оптимизационных задач нескольких уровней, в том числе задачи распределения множества грузопотоков (MCFP).
3. Для рассмотренного примера построения контейнерной линии на основе введенной формулировки с пятью портами: портом Владивосток и четырьмя портами КНР, выполнено сто повторных генераций построения контейнерной линии со случайными комбинациями сервисов; предлагается оценивать эффективность варианта построения контейнерной линии на основе показателя удельных расходов на перемещение 1 TEU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brouer B. D. A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design / B. D. Brouer, J. F. Alvarez, C. E. Plum, D. Pisinger, M. M. Sigurd // *Transportation Science*. — 2014. — Vol. 48. — Is. 2. — Pp. 281–312. DOI: 10.1287/trsc.2013.0471.
2. Галин А. В. Модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма / А. В. Галин, А. С. Малыхин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.
3. Huang Y. F. Liner services network design and fleet deployment with empty container repositioning / Y. F. Huang, J. K. Hu, B. Yang // *Computers & Industrial Engineering*. — 2015. — Vol. 89. — Pp. 116–124. DOI: 10.1016/j.cie.2015.01.021.

4. *Ulhaq M. N. D.* A Liner Shipping Network Design Problem: A Systematic Literature Review / M. N. D. Ulhaq, A. Sudiarso // *Journal of Industrial Engineering and Education*. — 2023. — Vol. 1. — Is. 2. — Pp. 171–184.
5. *Christiansen M.* Liner shipping network design / M. Christiansen, E. Hellsten, D. Pisinger, D. Sacramento, C. Vilhelmsen // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Is. 1. — Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
6. *Karsten C. V.* The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design / C. V. Karsten, D. Pisinger, S. Ropke, B. D. Brouer // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2015. — Vol. 76. — Pp. 122–138. DOI: 10.1016/j.tre.2015.01.005.
7. *Кузнецов А. Л.* Расчет флота и парка контейнерного оборудования судоходной линии / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
8. *Чан Нгок Ту.* Обоснование состава контейнерного флота при линейной организации транспортно-го судоходства / Н. Т. Чан // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2012. — № 1. — С. 62–69.
9. *Salimifard K.* The multicommodity network flow problem: state of the art classification, applications and solution methods / K. Salimifard, S. Bigharaz // *Operational Research*. — 2022. — Vol. 22. — Pp. 1–47. DOI: 10.1007/s12351-020-00564-8.
10. *Цыганов В. В.* Модели и методы адаптации транспортной инфраструктуры России в условиях санкций / В. В. Цыганов // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022). Труды Пятнадцатой международной конференции / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна*. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2022. — С. 87–99. DOI: 10.25728/mlsd.2022.0087.

REFERENCES

1. Brouer, Berit D., J. Fernando Alvarez, Christian E. M. Plum, David Pisinger, and Mikkel M. Sigurd. “A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design.” *Transportation Science* 48.2 (2014): 281–312. DOI: 10.1287/trsc.2013.0471.
2. Galin, Aleksandr V., and Aleksandr S. Malykhin. “Genetic algorithm-based linear routes optimization model.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 530–538. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-530-538.
3. Huang, You-Fang, Jian-Kun Hu, and Bin Yang. “Liner services network design and fleet deployment with empty container repositioning.” *Computers & Industrial Engineering* 89 (2015): 116–124. DOI: 10.1016/j.cie.2015.01.021.
4. Ulhaq, Muhammad Naufal Daffa, and Andi Sudiarso. “A Liner Shipping Network Design Problem: A Systematic Literature Review.” *Journal of Industrial Engineering and Education* 1.2 (2023): 171–184.
5. Christiansen, Marielle, Erik Hellsten, David Pisinger, David Sacramento, and Charlotte Vilhelmsen. “Liner shipping network design.” *European Journal of Operational Research* 286.1 (2020): 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
6. Karsten, Christian Vad, David Pisinger, Stefan Ropke, and Berit Dangaard Brouer. “The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 76 (2015): 122–138. DOI: 10.1016/j.tre.2015.01.005.
7. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. “Assessment of container ship and equipment fleet size.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 539–547. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-539-547.
8. Tran Ngoc Tu. “Substantiation of container fleet’s structure at the linear organization of transport navigation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2012): 62–69.
9. Salimifard, Khodakaram, and Sara Bigharaz. “The multicommodity network flow problem: state of the art classification, applications, and solution methods.” *Operational Research* 22 (2022): 1–47. DOI: 10.1007/s12351-020-00564-8.
10. Tsyganov, V.V. “Modeli i metody adaptatsii transportnoi infrastruktury Rossii v usloviyakh sanktsii.” *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2022). Trudy Pyatnadsatoy mezhdunarodnoi konferentsii*. Edited by S. N. Vasil'ev, and A. D. Tsvirkun. M.: Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN, 2022. 87–99. DOI: 10.25728/mlsd.2022.0087.

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

*Статья поступила в редакцию 4 декабря 2023 г.
Received: December 4, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83

METHODOLOGY FOR PLANNING TRANSPORTATION AND CONTAINERIZED CARGO UNLOADING IN OFF-PORT CONDITIONS

V. S. Gorenkova

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

A methodology for planning the transportation and unloading of containerized cargo in off-port conditions, aimed at achieving the most labor-efficient result is presented in the paper. The effectiveness of using maritime transport facilities for transportation largely depends on the availability and technical condition of ports and port facilities. The study of ways to prepare an unequipped seashore for the organization of temporary transshipment points is of urgent importance due to the constant need to carry out supply transportation to Arctic destinations. In the specific conditions of the Russian Federation Arctic zone, a special transportation subsystem is formed by regular northern (expeditionary) delivery. Despite a significant amount of scientific research in the field of transport support, the specific tasks of scientific substantiation of transport and technological transportation systems in off-port conditions are currently insufficiently investigated. To solve the problem under consideration, it is necessary to develop new technical and technological solutions. Modern conditions for the cargo transportation implementation generally involve the use of two technological schemes for transporting containerized cargo units from the vessel hold to the coastal zone at each of the destinations by moving each individual unit using a pontoon or helicopter. To improve the transport and technological transportation system efficiency in off-port conditions, in addition to the existing ones, an alternative scheme based on the use of self-disassembling pontoons (lighters) when unloading cargo on an unequipped coast is proposed. The methodology for planning the transportation and unloading of containerized cargo in off-port conditions is based on the fact that the particular object of research is technological schemes for transporting certain volumes of batches of containerized cargo units of various categories, implemented within a given destination. The initial data and design characteristics used in the methodology implementation, as well as the structure of the developed methodology described in the form of a flowchart are presented in the paper. The methodology calculates a complex preference indicator for each technological scheme under consideration. The considered technique allows us to determine the most preferred technological scheme from a set of alternative schemes.

Keywords: off-port conditions, Arctic zone of the Russian Federation, transport and logistics system, sea transport, containerized cargo, unequipped coast, planning methodology, technological scheme, complex preference indicator, navigational delivery, roll-on equipment.

For citation:

Gorenkova, Victoria S. "Methodology for planning transportation and containerized cargo unloading in off-port conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.

УДК 51–74, 656.61

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗКИ И ВЫГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРИЗОВАННЫХ ГРУЗОВ ВО ВНЕПОРТОВЫХ УСЛОВИЯХ

В. С. Горенькова

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

В статье представлена методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях, направленная на достижение наиболее эффективного по трудозатратам результата. Отмечается, что эффективность использования средств морского транспорта для обеспечения перевозок в значительной степени зависит от наличия и технического состояния портов и портовых сооружений. Исследование способов подготовки необорудованного морского побережья для организации временных перегрузочных пунктов имеет актуальное значение в связи с постоянной необходимостью осуществления снабженческих перевозок в арктические пункты назначения. В специфических условиях Арктической зоны Российской Федерации особую специальную подсистему перевозок формирует регулярный северный

(экспедиционный) завод. Подчеркивается, что несмотря на значительный объем научных исследований в области транспортного обеспечения частные задачи научного обоснования транспортно-технологических систем перевозок во внепортовых условиях в настоящее время исследованы недостаточно. Обоснована необходимость разработки новых технических решений для выполнения рассматриваемой задачи с учетом того, что современные условия реализации перевозок грузов предполагают в общем случае применение двух технологических схем транспортировки контейнеризованных грузовых единиц из трюма судна в прибрежную зону в каждом из пунктов назначения перемещением каждой отдельной единицы с использованием плашкоута или вертолета. Для повышения эффективности функционирования транспортно-технологической системы перевозок во внепортовых условиях в дополнение к существующим предлагается альтернативная схема, основанная на использовании саморазборных понтонов (лихтеров) при выгрузке грузов на необорудованное побережье. Отмечается, что методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях базируется на том, что частным объектом исследования являются технологические схемы транспортировки определенных объемов партий контейнеризованных грузовых единиц различных категорий, реализуемые в рамках заданного пункта назначения. В статье представлены исходные данные и расчетные характеристики, используемые в процессе реализации методики, а также структура разработанной методики, описанной в виде блок-схемы. В предложенной методике выполнено вычисление комплексного показателя предпочтительности для каждой рассматриваемой технологической схемы. Рассматриваемая методика позволяет определить наиболее предпочтительную технологическую схему из набора альтернативных схем.

Ключевые слова: внепортовые условия, транспортно-логистическая система, морской транспорт, контейнеризованный груз, необорудованное побережье, методика планирования, технологическая схема, комплексный показатель, зона предпочтительности, северный (экспедиционный) завод, накатная техника.

Для цитирования:

Горенькова В. С. Методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях / В. С. Горенькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.

Введение (Introduction)

Большое количество грузополучателей в Арктической зоне Российской Федерации находится вне доступности наземных магистральных видов транспорта. Исторически их комплексное обеспечение осуществляется морским и внутренним водным транспортом. Однако географическое положение требуемых пунктов выгрузки не совпадает и не может совпадать с существующими и развивающимися морскими портами. Таким образом, выгрузка снабженческих грузов для так называемых «точек» вынужденно выполняется во внепортовых условиях — с морских рейдов — различными способами на пляжи или на ледовый припай. Вместе с тем значимость подобных перевозок является критичной, так как именно от них полностью зависит жизнеспособность пунктов снабжения, как и возможность реализации в этих малых, но достаточно многочисленных пунктах, а также их деятельности по предназначению^{1,2,3}.

Освоение Арктики — последовательный и многоэтапный процесс, предусматривающий выполнение ряда инфраструктурных и технологических задач, от реализации которых в ближайшей перспективе зависит дальнейшее развитие региона. Эффективность использования средств морского транспорта для обеспечения перевозок в значительной степени зависит от наличия и технического состояния в том числе пунктов внепортовой выгрузки судов. Исследование способов подготовки необорудованного морского побережья для организации временных перегрузочных пунктов имеет актуальное значение⁴, так как особую специальную подсистему перевозок формирует

¹ Указ Президента РФ от 31.07.2022 № 512 «Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/xBBH7DL0RicfdtdWPoI32UekiLMTAycW.pdf> (дата обращения: 15.01.2024).

² Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения: 15.01.2024).

³ Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р (ред. от 28.04.2023) «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/StA6ySKbBceANLRA6V2sF6wbOKSyxNzw.pdf> (дата обращения: 15.01.2024).

⁴ Федеральный закон «О северном завозе» от 04.08.2023 № 411-ФЗ (последняя редакция) (документ не вступил в силу) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_453883/ (дата обращения: 15.01.2024).

регулярный «северный (экспедиционный) завод» — комплекс ежегодных государственных мероприятий по обеспечению пунктов, расположенных на территории Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока и Европейской части Российской Федерации, основными жизненно важными товарами в преддверии зимнего сезона в соответствии с действующими указами и распоряжениями Правительства РФ.

Анализ современных исследований в области выгрузки доставки контейнеризированных грузов в Арктической зоне РФ показывает, что данная тема недостаточно разработана и требует модернизации устоявшихся способов доставки и выгрузки подвижной техники. Кроме того, во внепортовых условиях погрузка / выгрузка грузов на морском транспорте существующими методами влечет за собой большие временные и материальные затраты на обработку судна [1]. Так, увеличение необходимости производства выгрузок именно контейнеризованных грузов на необорудованное побережье Арктической зоны РФ в связи с объективной тенденцией развития общей контейнеризации обосновано в монографиях [2], [3]. Там же проанализированы используемые внепортовые технологии. Однако они не предусматривают применение специализированных контейнерных судов, поскольку имеется возможность необходимые технологические средства доставлять, сгружать и принимать обратно только традиционными универсальными судами с грузовым вооружением. Выполненный анализ методов и моделей транспортно-технологических систем перевозок в Арктической зоне РФ показал, что в области изучения процессов выгрузки судов во внепортовых условиях выполнены актуальные исследования [4]–[10] и др.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Настоящая разработка направлена на первичную оценку эффективности технологических средств, предложенных в патентах [11], [12]. Выполненный анализ доступных отечественных и зарубежных источников показывает отсутствие прямых технологических аналогов исследуемого подхода. Так, в исследовании [13] проанализирована рентабельность морских операций при выполнении контейнерных перевозок в рамках гарантируемого *Actual Annual Transits via the Arctic Northeast Passage* (NEP). На основе указанных наблюдений с помощью моделирования методом Монте-Карло получено распределение прибыли за один рейс по NEP для судов различных ледовых классов (Arc4 и Arc7) при различных режимах судоходства (прямой режим и режим перевалки). Исследование показало, что влияние различных стоимостных факторов, рассмотренных в процессе анализа, имеет существенные различия в зависимости от видов перевозок и ледовых классов контейнеровозов. Прямой режим имеет бóльшую прибыльность, чем режим перевалки, а судно класса Arc4 — более высокую рентабельность, чем судно класса Arc7 при разумных условиях. Установлено, что перевозки по NEP станут прибыльными лишь тогда, когда ставка контейнерных перевозок по NEP увеличится на 60 % по сравнению с традиционными маршрутами.

Выполнение перегрузок контейнеров во внепортовых условиях Северо-Западного прохода признано нерентабельным. Подобные результаты получены в работе [14], в которой авторами обобщена доступная информация по теме арктических портов и выполняемых ими функций в качестве пунктов выгрузки и перевалочных узлов для полярных маршрутов. Следуя методологии систематического обзора литературы и используя конфигурационный синтез, в работе проанализирована выборка из 47 рецензируемых статей, проиндексированных в академических базах данных для разносторонней оценки эксплуатационных и конструктивных особенностей перевалочных терминалов, геополитических и управленческих требований, связанных с развитием глубоководных перегрузочных терминалов, а также возможностей финансирования процессов эксплуатации перегрузочных терминалов и развития портовой сети в интересах всего Арктического региона [14]. При этом в данном исследовании вопросы технологий работы пунктов внепортовой обработки судов не рассматривались. В работе [15] рассмотрена перспективная роботизированная система выгрузки контейнеров, основанная на применении так называемых *цифровых двойников операторов*. Однако данная высокотехнологичная система применима в условиях

специализированных терминалов, а кроме того, предлагаемые решения касаются непосредственно работы операторов. В данном случае технологии перемещения груза остались за границами исследования.

Несмотря на значительный объем научных исследований в области транспортного обеспечения комплекс задач научного обоснования транспортно-технологической системы (ТТС) перевозок во внепортовых условиях в настоящее время изучен недостаточно. Для решения выбранной частной задачи необходимо численно оценить разработанные технические и технологические решения. ТТС доставки грузов на побережье, где отсутствует портовая инфраструктура, представляет собой совокупность транспортных средств и путей сообщения, а также погрузочно-выгрузочного оборудования, систем анализа, планирования и управления процессами подготовки и доставки грузов. Под контейнеризированными грузовыми единицами (КГЕ) в настоящей работе понимаются отдельные грузовые места, приведенные в соответствие с установленными габаритами и снабженные стандартными узлами крепления, соответствующими грузовым контейнерам ISO.

Современные условия реализации перевозок грузов предполагают в общем случае применение двух технологических схем транспортировки КГЕ из трюма судна в прибрежную зону в каждом из пунктов назначения перемещением каждой отдельной КГЕ с использованием плашкоута или вертолета [7]. Для повышения эффективности функционирования ТТС перевозок во внепортовых условиях, в дополнение к существующим технологическим схемам транспортировки КГЕ из трюма судна в прибрежную зону, предлагается альтернативная схема, основанная на использовании саморазборных понтонов (лихтеров) при выгрузке грузов на необорудованное побережье.

Методика планирования погрузки / выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях базируется на том, что частным объектом исследования являются технологические схемы транспортировки определенных объемов партий КГЕ различных категорий (контейнеров и единиц техники 1-й и 2-й категорий: тяжелой (10 т и более)) и легкой (до 10 т) соответственно, реализуемые в рамках заданного пункта назначения.

Обоснование состава ТТС перевозок во внепортовых условиях сводится к оперативно решаемой общей задаче смешанного целочисленного линейного программирования и служит основой для расчета оптимальных вариантов каждого временного перегрузочного пункта в условиях конкретных операций. При наличии временных возможностей на этапе планирования модель может быть решена параметрически с дополнительным анализом разброса значений целевой функции. Остальные компоненты предназначены для моделирования процесса адаптации исходной версии к изменяющимся условиям выполнения задач и интерпретации результатов моделирования. Задача выбора лучшего варианта структуры ТТС во внепортовых условиях, применяемого ко всем возможным (неоднозначным) условиям функционирования, является элементом теории принятия решений в условиях неопределенности, решаемой ее методами. При этом главное значение имеет критерий выбора. В рассматриваемых условиях оптимальным является вариант технологической схемы выгрузки, обладающий минимальными суммарными затратами.

Результаты (Results)

Объективная оценка предпочтительности технологической схемы количественно определяется значением комплексного показателя предпочтительности, прямо пропорциональным значению каждой ключевой его характеристики. При этом в качестве соответствующего коэффициента пропорциональности рассматривается количественная характеристика — коэффициент значимости указанной характеристики. По результатам объективной оценки предпочтительности технологических схем может быть определена в общем случае единственная наиболее приоритетная технологическая схема, которой будет соответствовать максимальное значение комплексного показателя предпочтительности.

Исходные данные и расчетные характеристики, используемые в процессе реализации методики, приведены в табл. 1 и 2 соответственно. В математических обозначениях этих таблиц использованы технологические схемы: для саморазборных понтонов (лихтеров), для плашкоута, для вертолета.

Таблица 1

Исходные данные для реализации разработанной методики

№ пп.	Наименование элемента исходных данных	Ед. изм.	Обозначение / выражение
1	Основные исходные данные		
1.1	Количество рассматриваемых технологических схем	Ед.	z
1.2	Количество расчетных характеристик предпочтительности технологической схемы	Ед.	m
1.3	Значение каждой расчетной характеристики i ($i = 1, 2, \dots, m$) предпочтительности для каждой рассматриваемой технологической схемы r ($r = 1, 2, \dots, z$) ^{1,2}	Различные	q_i^r
2	Индексы		
2.1	Индекс технологической схемы	–	$r = 1, 2, \dots, z$
2.2	Индекс расчетной характеристики предпочтительности технологической схемы	–	$i = 1, 2, \dots, m$
3	Дополнительные исходные данные		
3.1	Множество индексов расчётных характеристик предпочтительности технологической схемы, соответствующих ключевым категориям	–	I
3.2	Коэффициент значимости влияния каждой отдельной ключевой характеристики i ($i \in I$) на предпочтительность технологической схемы ³	–	α_i

¹Диапазоны изменения индексов определяются пп. 2.1 и 2.2 таблицы.

²Для предложенных технологических схем значения вычисляются с использованием выражений, представленных в математических моделях пп. 1–3 блок-схемы.

³Значения элементов исходных данных должны удовлетворять следующим условиям: $\alpha_i \geq 0$, $i \in I$; $\sum_{i \in I} \alpha_i = 1$.

Таблица 2

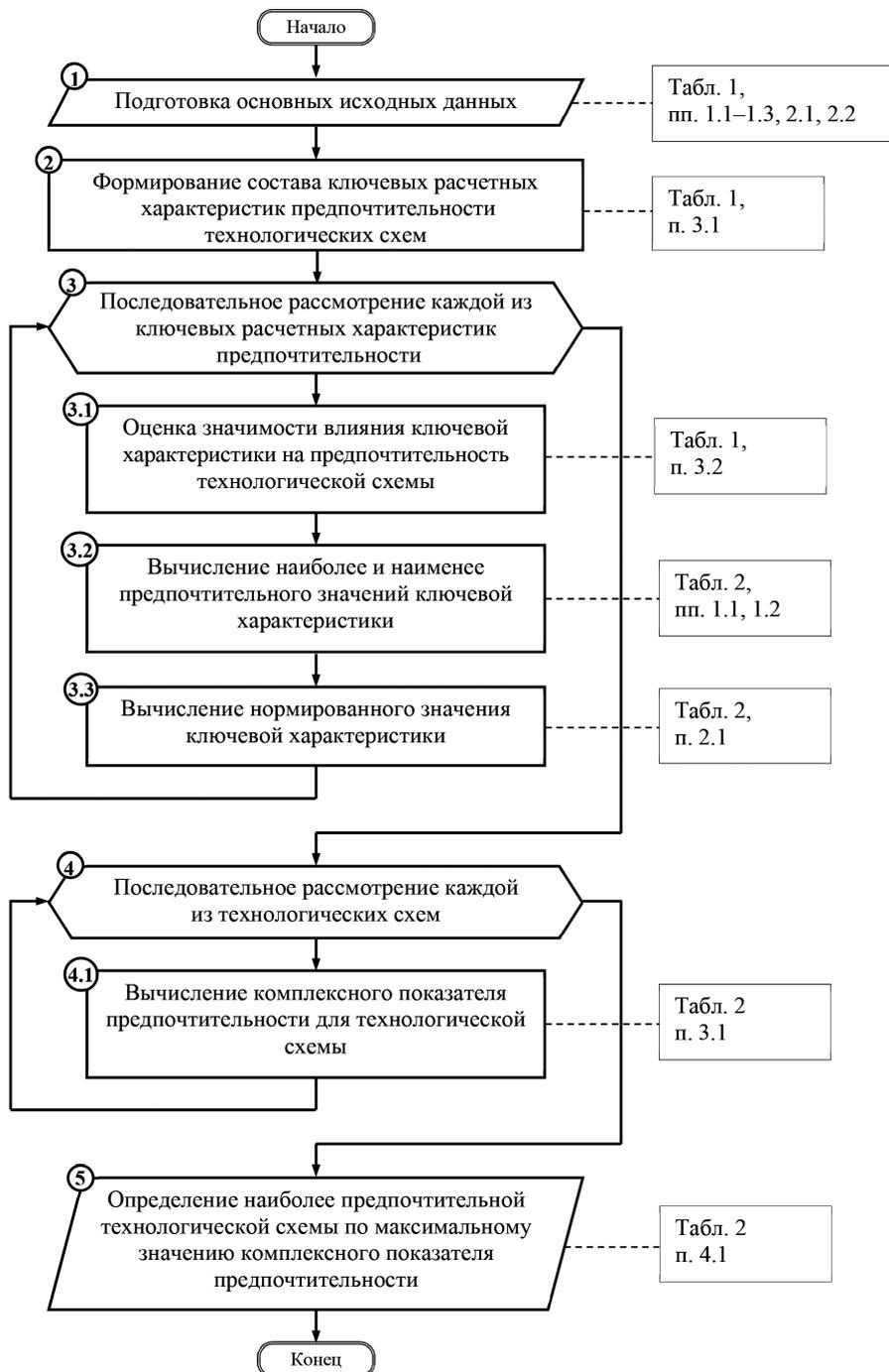
Расчетные характеристики, используемые при реализации методики

№ пп.	Наименование элемента исходных данных	Единица изм.	Формульный вид
1	Расчетные характеристики, определяемые для каждой ключевой характеристики предпочтительности технологических схем i ($i \in I$)		
1.1	Наиболее предпочтительное значение ключевой характеристики	Различные ¹	$q_i^{\text{best}} = \begin{cases} \max_r \{q_i^r\}, & \text{если увеличение характеристики} \\ & \text{определяет повышение} \\ & \text{предпочтительности схемы;} \\ \min_r \{q_i^r\} - & \text{в противном случае} \end{cases}$
1.2	Наименее предпочтительное значение ключевой характеристики	Различные	$q_i^{\text{worst}} = \begin{cases} \min_r \{q_i^r\}, & \text{если увеличение характеристики} \\ & \text{определяет повышение} \\ & \text{предпочтительности схемы;} \\ \max_r \{q_i^r\} - & \text{в противном случае} \end{cases}$
2	Расчетные характеристики, определяемые для каждой ключевой характеристики предпочтительности i ($i \in I$) в рамках каждой рассматриваемой технологической схемы r ($r = 1, 2, \dots, z$)		
2.1	Нормированное значение ключевой характеристики ²	–	$q_i^{rN} = \begin{cases} \frac{q_i^r - q_i^{\text{worst}}}{q_i^{\text{best}} - q_i^{\text{worst}}}, & \text{если } q_i^{\text{best}} \neq q_i^{\text{worst}}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$
3	Расчетные характеристики, определяемые для каждой рассматриваемой технологической схемы r ($r = 1, 2, \dots, z$)		
3.1	Комплексный показатель предпочтительности технологической схемы	–	$\Psi_r = \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot q_i^{rN}$

4	Обобщенные расчетные характеристики	
4.1	Индекс (порядковый номер) наиболее предпочтительной технологической схемы	$r^* : \Psi_{r^*} = \max_r \{ \Psi_r \}$

¹Единицы измерения расчетных характеристик предпочтительности в общем случае имеют различную природу, определяемую назначением каждой отдельной характеристики.

²При выполнении условия $q_i^{\text{best}} = q_i^{\text{worst}}$ нормированные значения ключевой характеристики i для каждой из рассматриваемых технологических схем принимают значение $q_i^{r^*} = 0, r = 1, 2, \dots, z$, что определяет отсутствие учета указанной характеристики при расчете комплексного показателя предпочтительности каждой технологической схемы.



Укрупненная блок-схема методики планирования процессов погрузки / выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях

Структура разработанной методики, определяемая блок-схемой, приведенной на с. 79, предполагает последовательное выполнение следующих основных этапов:

1-й этап — подготовка основных исходных данных (пп. 1 блок-схемы) [13], в том числе в части состава рассматриваемых технологических схем транспортировки КГЕ из трюма грузового судна в место назначения в прибрежной зоне, состава расчетных характеристик предпочтительности технологических схем и предварительно вычисленных значений указанных характеристик.

2-й этап — формирование состава ключевых расчетных характеристик предпочтительности технологических схем (пп. 2 блок-схемы) — определяется на основе соблюдения следующих основных принципов:

- ключевые характеристики должны по возможности вычисляться в рамках каждой из рассматриваемых технологических схем;
- значение каждой из ключевых характеристик не должно быть взаимосвязано явным образом (прямо или обратно пропорционально) со значением любой другой ключевой характеристики.

Обсуждение (Discussion)

Следует отметить, что в качестве альтернативы указанному ранее перечню ключевых характеристик предпочтительности технологических схем можно использовать совокупность всех остальных (кроме указанных ранее) расчетных характеристик, однако в этом случае возможно уменьшение адекватности результатов реализации методики ввиду невозможности вычисления большинства ключевых расчетных характеристик по отношению к каждой из рассматриваемых технологических схем.

Оценка значимости влияния каждой ключевой характеристики на предпочтительность технологической схемы (пп. 3.1 блок-схемы) в использовании метода прямого оценивания, методов экспертных оценок, попарных сравнений и т. д. Необходимо отметить, что полученные по результатам выполнения этапа значения коэффициентов значимости должны быть *долевыми*, т. е. удовлетворяющими условиям, указанным в примечаниях к табл. 1.

Вычисление наиболее и наименее предпочтительных значений для каждой соответствующей ключевой характеристики технологических схем (пп. 3.2 блок-схемы) выполняется в соответствии с выражениями пп. 1.1 и 1.2 табл. 2. Следует отметить, что при наличии идентичных друг другу значений ключевой характеристики для всех технологических схем при вычислении наиболее предпочтительного значения необходимо использовать дополнительный параметр разброса ϵ в соответствии с указаниями, приведенными в примечаниях к табл. 1. Вычисление нормированного значения для каждой ключевой характеристики предпочтительности технологических схем (пп. 3.3 блок-схемы) выполняется в соответствии с выражением пп. 2.1 табл. 2 с целью перехода от исходных единиц измерения ключевой характеристики к безразмерным, что позволит определять агрегированный показатель на базе полученных нормированных (безразмерных) значений ключевых характеристик. Вычисление комплексного показателя предпочтительности для каждой рассматриваемой технологической схемы (пп. 4.1 блок-схемы) выполняется в соответствии с пп. 3.1 табл. 2 с последующим определением наиболее предпочтительной технологической схемы по максимальному значению указанного комплексного показателя (пп. 5 блок-схемы) в соответствии с пп. 4.1 табл. 2.

По результатам реализации методики в частном случае могут иметь место несколько технологических схем, каждая из которых будет удовлетворять условию, соответствующему пп. 4.1 табл. 2. В этом случае определение единственной наиболее предпочтительной технологической схемы осуществляется лицом, решающим задачу, на основе дополнительных (в том числе качественных, т. е. не выраженных числовыми значениями) характеристик предпочтительности, не учитываемых в разработанной методике.

Заключение (Conclusion)

В работе обоснована необходимость разработки новых технических решений для выполнения процессов перевозки и выгрузки КГЕ во внепортовых условиях, а именно предложена альтернативная

транспортно-технологическая схема, основанная на использовании саморазборных понтонов (лихтеров). В представленной методике выполнено вычисление комплексного показателя предпочтительности для трех рассматриваемых технологических схем, одной альтернативной и двух действующих, соответственно с использованием саморазборных понтонов (лихтеров), плашкоута и вертолета.

Рассмотренная в работе методика позволяет определить наиболее предпочтительную технологическую схему из набора альтернативных схем при наличии определенного количества пунктов назначения в рамках единого транспортного маршрута грузового судна с ограничением по времени выполнения технологических операций выгрузки КГЕ или другим расчетным характеристикам технологических схем. Использование данной методики может быть некорректным в части соответствия полученных результатов указанным в работе ограничениям, где для недопущения этого применяется оптимизационная модель обоснования характеристик ТТС перевозок во внепортовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экономическая безопасность российской Арктики: особенности и проблемы обеспечения: монография / под науч. ред. В. С. Селина, Т. П. Скуфьиной, Е. П. Башмаковой, М. В. Ульченко. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2018. — 103 с.
2. Технология и безопасность транспортных операций. Обработка судов в необорудованных пунктах российской Арктики: монография / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, С. В. Латухов, В. А. Никитин; под ред. А. В. Кириченко, В. М. Ушакова. — СПб.: Островитянин, 2013. — 308 с.
3. *Кузнецов А. Л.* Морские контейнерные перевозки: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семёнов. — М.: Моркнига, 2019. — 412 с.
4. *Тезиков А. Л.* Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
5. *Кравец Ю. Д.* Организация перевозки колесной, гусеничной техники и грузов снабжения по Северному морскому пути (по опыту Министерства обороны Российской Федерации) / Ю. Д. Кравец, А. А. Давыденко // Портоориентированная логистика — 2018: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. 1–2 ноября 2018 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — С. 111–116.
6. *Зайкин Д. А.* Планирование работы флота обеспечения морской ледостойкой стационарной платформы методами имитационного моделирования грузораспределения: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Дмитрий Аркадьевич Зайкин. — СПб., 2019. — 183 с.
7. *Исаулова К. Я.* Исследование маршрутов движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 726–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733.
8. *Горенькова В. С.* Технология комплексного подхода к планированию перевозок и выгрузки колесной и гусеничной техники в Арктической зоне Российской Федерации / В. С. Горенькова, Ю. Д. Кравец // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2020. — № 8. — С. 42–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-08-7.
9. *Могилевский В. И.* Разработка методики оптимизации морского комплекса транспортных средств доставки грузов в пункты с необорудованным берегом: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.03 / Валерий Иосифович Могилевский. — СПб., 2005. — 275 с.
10. *Попов А. С.* Совершенствование организации завоза грузов на территорию Республики Саха (Якутия) через воднотранспортные узлы: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Александр Степанович Попов. — Новосибирск, 2005. — 143 с.
11. Пат. 196342 Российская Федерация, МПК В63В 35/44, В65G 67/60. Плавпричал из лихтеров для погрузки и выгрузки грузов во внепортовых условиях / Ю. Д. Кравец, Д. Ю. Кравец, А. В. Кириченко, В. С. Горенькова; заяв. и патентообл. Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации. — № 2019137687; заявл. 21.11.2019, опубл. 26.02.2020, Бюл. № 6.

12. Пат. 2716381 Российская Федерация, МПК B63B 35/36, B63B 35/44, B65G 67/60, E02B 3/06, E01D 15/14. Способ формирования плавпричала на необорудованном побережье при помощи саморазборных понтонов / Ю. Д. Кравец, Д. В. Шувалов, Д. Ю. Кравец, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации. — № 2019122002; заявл. 09.07.2019, опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8.

13. Jiang M. Profitability of container shipping via the Arctic Northeast passage: A simulation and regression analysis / M. Jiang, M. Hu, M. Leibrecht // *Marine Policy*. — 2021. — Vol. 133. — Pp. 104738. DOI: 10.1016/j.marpol.2021.104738.

14. Hermann R. R. Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure / R. R. Hermann, N. Lin, J. Lebel, A. Kovalenko // *Marine Policy*. — 2022. — Vol. 145. — Pp. 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.

15. Petzoldt C. Control architecture for digital twin-based human-machine interaction in a novel container unloading system / C. Petzoldt, J. Wilhelm, N. H. Hoppe, L. Rolfs, T. Beinke, M. Freitag // *Procedia manufacturing*. — 2020. — Vol. 52. — Pp. 215–220. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.037.

REFERENCES

1. Selin, V. S., T. P. Skuf'ina, E. P. Bashmakova, and M. V. Ul'chenko, eds. *Ekonomicheskaya bezopasnost' rossiiskoi Arktiki: osobennosti i problemy obespecheniya*. Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2018.

2. Izotov, O. A., A. V. Kirichenko, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Tekhnologiya i bezopasnost' transportnykh operatsii. Obrabotka sudov v neoborudovannykh punktakh rossiiskoi Arktiki: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko, V. M. Ushakov. SPb.: Ostrovityanin, 2013.

3. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Morskie konteinernye perezovki: monografiya*. M.: Morkniga, 2019.

4. Tezikov, Aleksandr L., and Evgeniy O. Ol'khovik. "Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.

5. Kravets, Yu. D., and A. A. Davydenko. "Organizatsiya perezovki kolesnoi, gusenichnoi tekhniki i gruzov snabzheniya po Severnomu morskomu puti (po opytu Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii)." *Porto-orientirovannaya logistika — 2018: Materialy 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2018. 111–116.

6. Zaikin, D. A. Planirovanie raboty flota obespecheniya morskoi ledostoikoii stacionarnoi platformy metodami imitatsionnogo modelirovaniya gruzoraspredeleniya PhD diss. SPb., 2019.

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

8. Gorenkova, V. S., and Yu. D. Kravets. "Technology of an integrated approach to planning transportation and unloading of wheeled and tracked vehicles in the Arctic zone of the Russian Federation." *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 8 (2020): 42–50.

9. Mogilevskii, V. I. Razrabotka metodiki optimizatsii morskogo kompleksa transportnykh sredstv dostavki gruzov v punkty s neoborudovannym beregom. PhD diss. SPb., 2005.

10. Popov, A. S. Sovershenstvovanie organizatsii zavoza gruzov na territoriyu Respubliki Sakha (Yakutiya) cherez vodnotransportnye uzly. PhD diss. Novosibirsk, 2005.

11. Kravets, Yu. D., D. Yu. Kravets, A. V. Kirichenko, and V. S. Goren'kova. RU 196 342 U1, IPC B63B 35/44, B65G 67/60. Plavprichal iz likhterov dlya pogruzki i vygruzki gruzov vo vneportovykh usloviyakh. Russian Federation, assignee. Publ. 26 Feb. 2020.

12. Kravets, Yu. D., D. V. Shuvalov, D. Yu. Kravets, A. V. Kirichenko, and A. L. Kuznetsov. RU 2 716 381 C1, IPC B63B 35/36, B63B 35/44, B65G 67/60, E02B 3/06, E01D 15/14. Sposob formirovaniya plavprichala na neoborudovannom poberezh'e pri pomoshchi samorazbornykh pontonov. Russian Federation, assignee. Publ. 11 March 2020.

13. Jiang, Miaomiao, Maixiu Hu, and Markus Leibrecht. "Profitability of container shipping via the Arctic Northeast passage: A simulation and regression analysis." *Marine Policy* 133 (2021): 104738. DOI: 10.1016/j.marpol.2021.104738.

14. Hermann, Roberto Rivas, Ning Lin, Julien Lebel, and Alina Kovalenko. “Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure.” *Marine Policy* 145 (2022): 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.

15. Petzoldt, Christoph, Jasper Wilhelm, Nils Hendrik Hoppe, Lennart Rolfs, Thies Beinke, and Michael Freitag. “Control architecture for digital twin-based human-machine interaction in a novel container unloading system.” *Procedia manufacturing* 52 (2020): 215–220. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.037.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Горенькова Виктория Сергеевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gorenkovavs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gorenkova, Victoria S. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gorenkovavs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2024 г.

Received: January 29, 2024.

VALIDATION OF JSC “TROITSA” BERTHS BOLLARDS IN THE “CHAYKA” PORT OF SEVERODVINSK

P. A. Garibin¹, A. A. Butsanets¹, S. V. Egorov^{1,2}

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

² — Association of Ports and River Transport Shipowners, Moscow, Russian Federation

Berthing equipment of two berths of JSC “Troitsa” is considered. They are “Berth for petroleum products transshipment” and “Reinforced concrete berth with crane tracks” of “Chayka” port (Severodvinsk). The berths were put into operation half a century ago. Due to the regulatory service life expiration, the Scientific Research Association “Pleiada” LLC (Novorossiysk) carried out in 2021 a theoretical calculation to determine the bearing capacity of bollards. The purpose of the planned research is to check the safe functioning of the available mooring devices in the existing conditions of berthing facilities operation. The object of research is non-standard mooring bollards, for which there was no documentation on operational control during construction and commissioning certificates. The process of changing the technical condition and determining the bearing capacity of the bollards is considered as the subject of the research. It has been established that the mooring bollards of the studied berths are suitable for operation to ensure the mooring of vessels that do not exceed the design parameters and comply with the requirements of subparagraph (a) of paragraph 191 of the technical regulations on the safety of maritime transport facilities dated August 12, 2010 No. 620 (as amended on October 7, 2019). The results of organoleptic and instrumental examinations using a high-precision electronic dynamometer ACD/IR-250/7I-2 are presented. It is concluded that a correct assessment of the berthing equipment technical condition is achieved with proper organization of the expert service in combination with continuous deformation monitoring.

Keywords: water transport, organoleptic examination, instrumental field experiment, mooring bollards, monitoring of technical condition.

For citation:

Garibin, Pavel A., Artem A. Butsanets, and Sergey V. Egorov. “Validation of JSC “Troitsa” berths bollards in the “Chayka” port of Severodvinsk.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 84–96. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-84-96.

УДК 627.341

ВАЛИДАЦИЯ ШВАРТОВНЫХ ТУМБ ПРИЧАЛОВ АО «ТРОИЦА» В ПОРТУ «ЧАЙКА» (СЕВЕРОДВИНСК) С ПРОВЕДЕНИЕМ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

П. А. Гарибин¹, А. А. Буцанец¹, С. В. Егоров^{1,2}

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

² — Ассоциация портов и судовладельцев речного транспорта,
Москва, Российская Федерация

Рассмотрено причальное оборудование двух причалов АО «Троица»: «Причал перегрузки нефтепродуктов» и «Железобетонный причал с подкрановыми путями» порта Чайка (г. Северодвинск), которые были введены в эксплуатацию более пятидесяти лет назад. В связи с частичным отсутствием проектной и полным отсутствием исполнительной документации, а также установкой на причалах нестандартных причальных устройств было принято решение о проведении валидации (проверки в целях доказательства того, что оборудованием можно пользоваться по назначению) швартовных тумб путем выполнения натуральных экспериментальных исследований. В связи с истечением нормативного срока службы ООО Научно-исследовательское объединение «Плеяда» (г. Новороссийск) в 2021 г. был выполнен теоре-

технический расчет для определения несущей способности швартовых тумб. Целью исследования являлась проверка безопасности функционирования имеющихся в наличии швартовых устройств в существующих условиях работы причальных сооружений. Объектом исследований являлись нестандартные швартовые тумбы, на которые отсутствовала документация об операционном контроле в период строительства, и акты ввода в эксплуатацию. В качестве предмета исследований рассматривались процессы изменения технического состояния и определения несущей способности тумб. Было установлено, что швартовые тумбы исследованных причалов пригодны к эксплуатации для обеспечения швартовки судов, не превышающих по своим параметрам расчетное значение, и соответствуют требованиям пп. а п. 191 «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта» от 12 августа 2010 г. № 620 (с изм. на 7 октября 2019 г.). Приведены результаты органолептического и инструментального обследований с применением электронного динамометра АЦД/ІР-250/7И-2. Сделан вывод о том, что корректная оценка технического состояния причального оборудования достигается при должной организации экспертной службы в сочетании с непрерывным деформационным мониторингом.

Ключевые слова: водный транспорт, органолептическое обследование, инструментальный натурный эксперимент, швартовые тумбы, мониторинг технического состояния.

Для цитирования:

Гарибин П. А. Валидация швартовых тумб причалов АО «Троица» в порту «Чайка» (Северодвинск) с проведением натурального эксперимента / П. А. Гарибин, А. А. Буцанец, С. В. Егоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 84–96. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-84-96.

Введение (Introduction)

Во время эксплуатационной фазы жизненного цикла причал и причальное оборудование подвергаются физическому и моральному износу, что требует различных видов ремонта и модернизации, ввиду возможного увеличения проектного срока их эксплуатации. В положениях технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта (Утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 г. № 623 (далее — ТР 623)) отмечается следующее:

«493. С целью обеспечения безопасности гидротехнические сооружения порта должны подвергаться техническому контролю, осуществляемому не реже одного раза в 5 лет.

494. Объектами технического контроля являются причальные, оградительные и берегоукрепительные сооружения, рельсовые подкрановые пути, покрытия территорий в пределах гидротехнических сооружений и дно примыкающих к сооружениям участков акваторий портов.

495. Целью технического контроля гидротехнических сооружений порта является проверка соответствия установленным техническим требованиям и (или) проектным параметрам режимов работы этого гидротехнического сооружения и элементов конструкций».

Следует отметить отсутствие необходимого количества научно-технической литературы и нормативно-правовых актов, регламентирующих эксплуатацию швартовых устройств. В настоящее время для некоторой номенклатуры швартовых устройств действует ГОСТ 17424-72 «Тумбы швартовые морские. Технические условия». Однако данный стандарт распространяется на морские швартовые тумбы типов ТСО, ТСД и ТСС, предназначенные для установки на причальных сооружениях, изготавливаемые для нужд народного хозяйства и поставки на экспорт. При этом существует обширная номенклатура иных видов швартовых устройств, не подпадающих под действие данного ГОСТа (например, в случае, когда часть причальных сооружений была построена и введена в эксплуатацию до введения в действие ГОСТа 17424–72 (1 января 1973 г.) или когда были рассчитаны и приняты иные технические решения, такие как установка кнехтов, швартовых уток на яхтенных маринах [1] или рымов [2] либо изготовленных хозспособом).

При этом изготовление швартовых устройств хозспособом не запрещено, но многие сооружения были спроектированы и построены до введения в действие ТР 623, ГОСТа Р 54523–2011 «Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»

и ГОСТа Р 55561–2013 «Внутренний водный транспорт. Портовые гидротехнические сооружения. Требования безопасности». В некоторых случаях у организации, эксплуатирующей портовое гидротехническое сооружение, утрачена часть проектной документации, что приводит к отсутствию фактических сведений, регламентированных указанными ГОСТами, для заполнения форм паспорта портового гидротехнического сооружения, соответственно, возникает проблема валидации элементов причальных сооружений с неустановленными техническими характеристиками или с характеристиками, полученными расчетным способом. При этом следует отметить, что использование расчетного способа [3], [4] не всегда является объективным, поскольку реальные габаритные размеры элемента и материалы неизвестны (например, когда часть конструкции с неустановленными размерами забетонирована). Таким образом, единственным способом валидации элементов причального сооружения является проведение натурного эксперимента. Следует отметить, что в научной литературе подобного рода исследования встречаются крайне редко и в основном без проведения натуральных экспериментов (например, [5]–[7]).

Частичное отсутствие проектной и исполнительной документации, а также установленные на причалах нестандартные швартовные тумбы с неподтвержденными сведениями о несущей способности обусловили необходимость проведения валидации причального оборудования двух причалов АО «Троица»: причала перегрузки нефтепродуктов и железобетонного причала с подкрановыми путями (порт Чайка, г. Северодвинск).

Целью исследований является проверка безопасного функционирования имеющихся в наличии швартовных устройств в существующих условиях работы причальных сооружений. Объектом исследований являлись нестандартные швартовные тумбы, для которых отсутствовали документация об операционном контроле в период строительства и акты ввода в эксплуатацию. В качестве предмета исследований рассматривался процесс изменения технического состояния и определение несущей способности швартовных тумб для валидации теоретических оценок ООО «Научно-исследовательское объединение “Плеяда”» (г. Новороссийск), выполненных в 2021 г. [3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Перед выполнением испытаний следует разработать программу и методику испытаний, а также выбрать способ нагружения конструкции. Для проведения натуральных испытаний на причальном сооружении возможно использование следующих вариантов:

1. Сварить вокруг швартовной тумбы металлический каркас с гидравлическими домкратами для нагружения тумбы до необходимых значений (подобный подход рассмотрен, например, в работе [8]).
2. Закрепить на причале устройство нагружения, используя подход, приведенный в работах [9]–[12].
3. Установить канат с известной прочностью и нагрузить его до разрыва.
4. Создать нагрузку со стороны акватории с привлечением судна.

Вариант 1 был отклонен, поскольку разрабатывать раму экономически нецелесообразно и ее изготовление должно сопровождаться серией математических расчетов. Варианты 2 и 3 не являются предпочтительными, поскольку в них отсутствует возможность создать безопасные условия для проведения эксперимента. Ввиду наличия пришвартованных судов (барж) на причалах с необходимым лебедочным оборудованием был выбран вариант 4. Следует отметить, что все варианты проведения испытаний предусматривают контроль геометрических параметров. Исследования проводились на нефтяном терминале АО «Троица» (рис. 2), расположенном в Архангельской области (г. Северодвинск, Чаячий проезд, 18).

Валидация причального оборудования была проведена на двух причалах АО «Троица»: причале перегрузки нефтепродуктов и железобетонном причале с подкрановыми и железнодорожными путями (рис. 1).



Рис. 1. Ситуационный план причала перегрузки нефтепродуктов (отмечен в виде круга) и железобетонного причала с железнодорожными и подкрановыми путями (отмечен в виде овала)

Причал перегрузки нефтепродуктов (рис. 2) — причал эстакадного типа на железобетонных призматических сваях и сваях-оболочках с тыловой шпунтовой стенкой. Год постройки — 1977. Год реконструкции — 1980. Класс сооружения III. Основные размеры: длина 69,20 м, ширина 13,5 м, навигационная глубина 4,1 м. На причале перегрузки нефтепродуктов главным объектом исследования является нетиповая тумба (рис. 3). На причале установлены пять швартовных крестовых тумб.

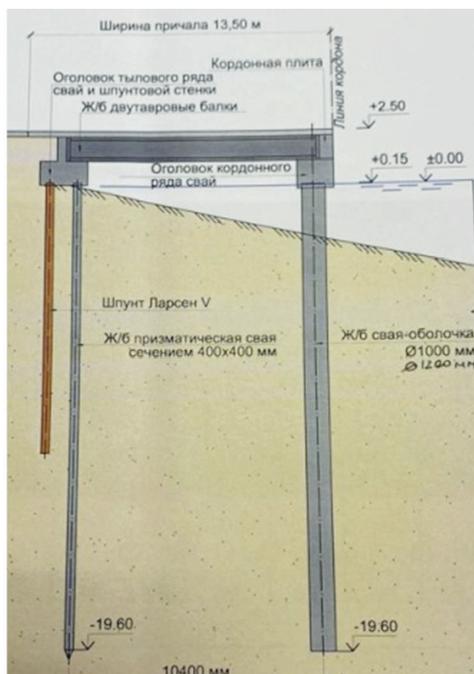


Рис. 2. Конструкция причала перегрузки нефтепродуктов



Рис. 3. Нетиповая швартовная тумба

Железобетонный причал с подкрановыми и железнодорожными путями (рис. 4) — причал эстакадного типа на железобетонных сваях-оболочках и призматических сваях с тыловой

шпунтовой стенкой. Железобетонный причал построен над деревянной эстакадой. На железобетонном причале с подкрановыми и железнодорожными путями объектом исследования является нетиповой кнехт (рис. 5). Год постройки — 1977. Год последней реконструкции — 1983. Класс сооружения — III. Основные размеры: длина 156,8 м, ширина 14,70 м, навигационная глубина 4,25 м.

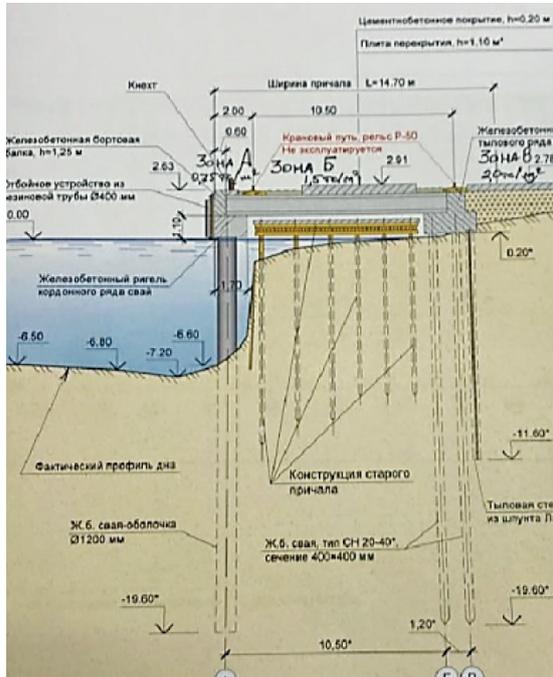


Рис. 4. Конструкция железобетонного причала с подкрановыми и железнодорожными путями



Рис. 5. Нетиповой швартовый кнехт железобетонного причала с подкрановыми и железнодорожными путями

На причале были установлены 18 швартовых крестовых тумб с переменным шагом 4,35–13,12 м, расчетное усилие которых в паспортах не указано и подлежало определению в результате проведения данного натурного эксперимента. При проведении органолептического и измерительного контроля было выявлено, что на причале перегрузки нефтепродуктов эксплуатируются швартовые тумбы двух типоразмеров: диаметром 325 мм и 380 мм с одинаковой высотой 390 мм. На причале было установлено пять швартовых тумб, которые по классификации можно отнести к одноголовым, выполненным наподобие тумб ТСО-25. На железобетонном причале с подкрановыми путями выявлены замятия крестовин (тумбы № 7, 9, 10, 12) и крышки (№ 9) швартовых тумб (нумерация выполнена со стороны причала перегрузки нефтепродуктов). Швартовые тумбы заполнены бетоном. На основе полученных результатов инструментального контроля выявлено два типоразмера швартовых тумб: диаметром 320 мм и 380 мм и высотой 660 мм и 430 мм соответственно с толщиной стенки 10 мм. На основе визуального осмотра был сделан вывод о том, что швартовые устройства причала изготовлены хозспособом, находятся в исправном техническом состоянии на всем протяжении причалов и могут быть подвергнуты натурным испытаниям для определения их несущей способности.

Во время проведения испытания швартовых тумб были задействованы лебедки судов «Пинега» (1994 г. постройки), «Онега» (1997 г. постройки). Технические характеристики судна приведены в табл. 1. Параметры расчетного судна: водоизмещение — 6500 т, ширина — 13,46 м, осадка в грузу — 3,57 м.

Таблица 1

Технические характеристики судов

Технический показатель	Данные
Символ класса	К ⊗ III нефтеналивное
Место постройки	Schiffswerft, Hugo Peters, Wewelsfleth
Длина	43,95 м
Ширина	18,40 м
Высота борта	3,75 м
Осадка на миделе в грузу	2,001 м
Осадка на миделе без груза	0,73 м
Валовая вместимость	859 т
Дедвейт	1089 т
Вместимость грузовых танков	1345 м ³ в восьми танках
Подруливающее устройство	360° гидравлический привод

До и после проведения эксперимента были выполнены измерения с помощью инклинометра Bosch GLM 80 C Professional с фиксацией параметров отклонений от вертикальности. Прибором зафиксированы уклоны тумбы в сторону воды и вдоль линии кордона, результаты измерений представлены в табл. 2. Вокруг швартовной тумбы в пределах ее основания (0,22 м²) осуществляется визуальный осмотр и инструментальный контроль с документальной фиксацией размеров появившихся или увеличившихся трещин. Новых трещин в железобетоне и деформации корпуса швартовных тумб выявлено не было.

Таблица 2

Результаты измерений уклонов швартовных тумб

Номер тумбы	Уклон в сторону акватории, град.		Уклон вдоль линии кордона, град.	
	до измерений	после измерений	до измерений	после измерений
ШТ1	0,3	0,3	0,1	0,1
ШТ3	1	1	0,4	0,4

При выполнении инструментальных измерений была использована контрольно-измерительная аппаратура, приведенная в табл. 3.

Таблица 3

Технические средства измерений

№ п/п.	Наименование измеряемых параметров	Наименование средств измерений, тип (марка)	Метрологические характеристики средств измерений	
			Диапазон измерений	Класс точности, погрешность измерений
1	Измерение толщины металла	Толщиномер ультразвуковой Булат-1S	0,6–100 мм	$\pm (0,005 T + 0,05)$ мм, где h — толщина измеряемого металла
2	Измерение усилия	Динамометр АЦД/1P-250/7И-2	От 25 до 250 кН	$\pm 0,45 \%$
3	Измерение уклона	Инклинометр Bosch GLM 50 C Professional	Угол наклона 0–360° (4 × 90°), расстояние 0,05–50,00 м	Угол $\pm 0,2^\circ$, расстояние $\pm 1,5$ мм
4	Измерение толщины металла, диаметра, глубины и ширины объекта	Штангенциркуль нониусный (ГОСТ 166–89)	0–150 мм	50 мкм

Во время проведения испытания швартовной тумбы для замера заданного усилия был использован электронный динамометр АЦД/1Р-250/7И-2 (рис. 6), предназначенный для измерения усилий на растяжения.

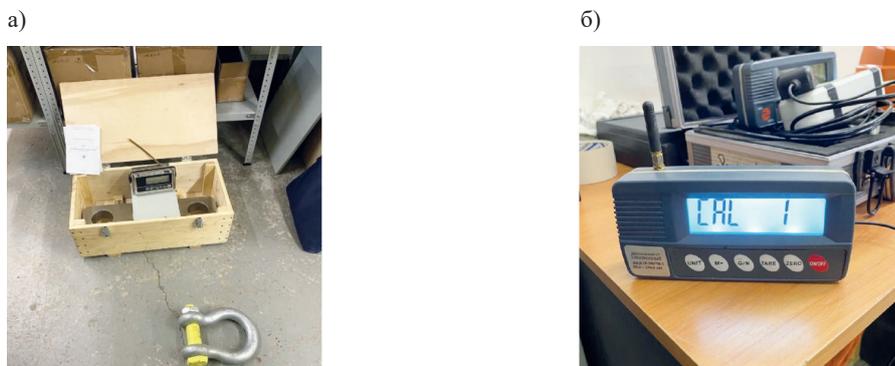


Рис. 6. Динамометр АЦД/1Р-250/7И-2:
а — комплектация; б — электронный блок прибора

Функциональные особенности прибора позволяют фиксировать пиковые значения в диапазоне от 25 до 250 кН (~ 2,5 т до 25 т). В комплект входит сетевой адаптер, однако может применяться альтернативный источник питания в виде аккумуляторных батарей, что позволяет использовать прибор вне лаборатории. Динамометр АЦД/1Р-250/7И-2 зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений, его технические характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики электронного динамометра АЦД/1Р-250/7И-2

Наименование характеристики	Значение
Наибольший предел измерения, кН	250
Наименьший предел измерения, кН	25
Дискретность, кН	0,05
Температурный диапазон, °С	От +15 °С до +25
Предел допускаемой суммарной погрешности, %	± 0,45
Дисплей	Жидкокристаллический с подсветкой
Питание	От аккумуляторных батарей напряжением 7,2 В или от сетевого адаптера
Габаритные размеры электронного блока, мм	175 × 84 × 39
Масса электронного блока, г	500

Подготовка к работе динамометра предусматривает выполнение следующих операций:

1. Установка упругого элемента (рис. 7, а) с силовводящими элементами (рис. 7, б) в рабочую область испытываемой системы с совмещением оси нагружения упругого элемента с осью нагружения установки (без перекосов и смещения). Опорная поверхность под упругий элемент сжатия должна быть ровной, с размерами, превышающими размер упругого элемента.



Рис. 7. Силовые элементы динамометра:
а — упругий элемент; б — силовводящий элемент

2. Проверка крепления силовводящих элементов на упругом элементе с исключением возможности его смещения во время нагружения.
3. Прокладка кабеля питания и связи упругого элемента к электронному блоку динамометра по возможности на максимальном расстоянии от подвижных и токоведущих частей испытываемой системы.
4. Установка электронного блока на максимально возможном расстоянии от обогревательных и электрических приборов, расположенных в зоне видимости оператора.
5. Включение прибора в сеть и прогрев рабочим напряжением в течение десяти минут.
6. Обжатие упругого элемент максимальной нагрузкой трижды длительностью 3–5 мин.
7. Обнуление показаний динамометра, после чего прибор готов к работе (рис. 8).

а)



б)



Рис. 8. Установка динамометра АЦД/1Р-250/7И-2 на судах:
 а — «Пинега»; б — «Онега»

Лазерный измеритель длины Bosch GLM 80 C Professional является профессиональным инструментом для измерения высоты, расстояния и вертикального угла наклона. Технические характеристики прибора, зарегистрированного в Государственном реестре средств измерений, приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Технические характеристики лазерного измерителя длины
 Bosch GLM 80 C Professional**

Наименование характеристики	Значение
Максимальная дальность измерения, м	80
Bluetooth	Да
Элементы питания	AAA (R03; LR03; FR03)
Количество и напряжение элементов питания	2 × 1,5 В
Габариты без упаковки, мм	106 × 45 × 24
Длина волны, нм	635
Погрешность, мм	±1,5
Рабочая температура	От –10 до +45 С°

Методика проведения натурного эксперимента. Определение натуральных усилий на швартовные тумбы у объектов осуществлялось при помощи лебедки, создающей усилие. Конец троса лебедки был пропущен через блок и прикреплен к швартовной тумбе, а в разрыв троса смонтирован упругий элемент динамометра (см. рис. 7, а) с помощью двух силовводящих элементов (см. рис. 7, б), отображающий на электронном блоке результат нагружения. Установка динамометра АЦД/1Р-250/7И-2 на судне приведена на рис. 10, а, общая схема натурной экспериментальной установки для проведения испытания швартовных тумб, рассчитанных на расчетную нагрузку 15 т представлена на рис. 9.

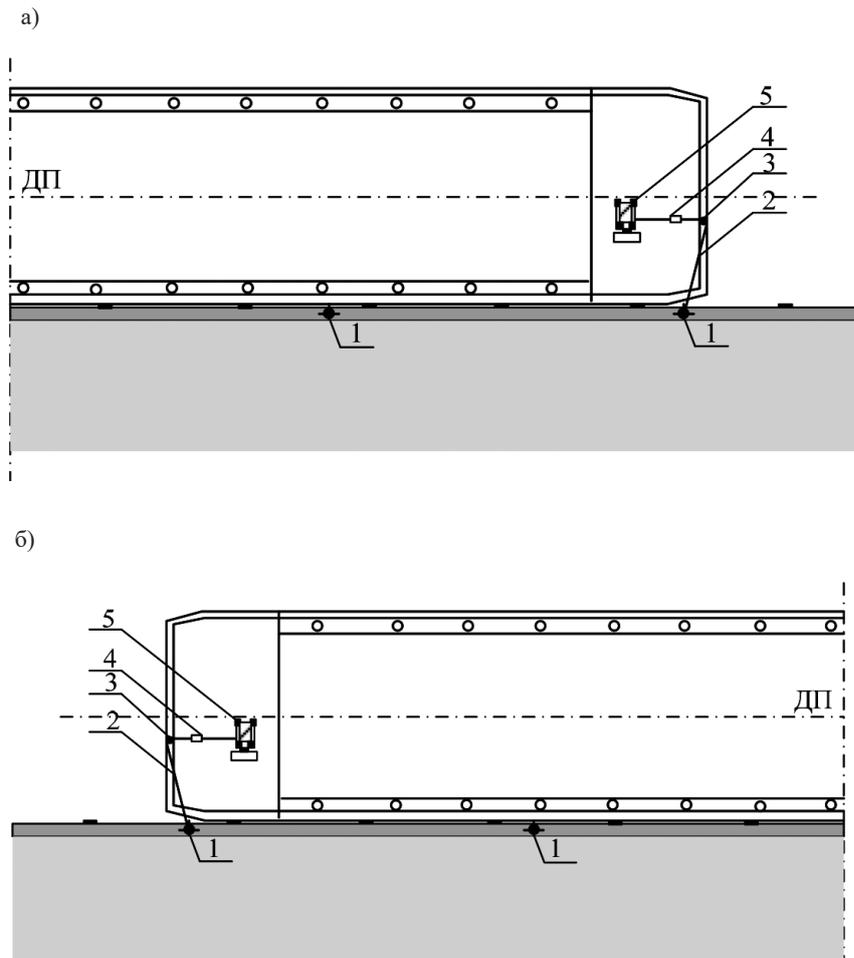


Рис. 9. Схема натурной экспериментальной установки для проведения испытания швартовных тумб на расчетную нагрузку:
а — причал перегрузки нефтепродуктов;
б — железобетонный причал с железнодорожными и подкрановыми путями:
1 — швартовная тумба; *2* — стальной трос; *3* — блок (ролик);
4 — динамометр АЦД/1Р-250/7И-2; *5* — лебедка на раме

В связи с тем, что объекты испытаний подвергались сильному физическому воздействию, был предусмотрен контроль признаков деформаций швартовной тумбы на месте ее установки. До проведения эксперимента лазерным измерителем длины Bosch GLM 80 C Professional фиксировался уклон тумбы в сторону воды и вдоль причала. Аналогичные измерения были выполнены после завершения измерений. Изменение уклона не должно превышать 5° . До и после проведения испытаний вокруг швартовной тумбы в пределах ее основания ($0,22 \text{ м}^2$) осуществлялся визуальный осмотр и инструментальный контроль с фиксацией размеров появившихся или увеличившихся трещин. Осуществлялся визуальный осмотр и инструментальный контроль с фиксацией размеров появившихся или увеличившихся трещин корпуса, крестовин (козырька) и сварного шва основания тумбы и ригеля верхней надстройки причала.

Полная сохранность технического состояния тумбы и швартовного массива являлась критерием безопасного восприятия прикладываемого силового воздействия и основанием для положительного заключения о возможности дальнейшей эксплуатации.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Валидации подверглись результаты теоретических расчетов, выполненных ООО «Научно-исследовательское объединение «Плеяда»» [3]. [3].

Расчет нагрузок на сооружение от натяжения швартовов выполнен в соответствии с пп. 6.4, 6.5, 6.11 СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»¹.

Результаты расчетов нагрузок от натяжения швартовов для расчетного судна (длина — 115,10 м, ширина — 18,55 м, состояние загрузки — в балласте, осадка — 5,3 м), ошвартованного у причалов АО «Троица» (г. Северодвинск), приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета нагрузок от натяжения швартовов для расчетного судна

Параметры	Скорость ветра, м/с						
	12	14	16	18	20	22	24
Поперечная составляющая суммарной силы Q_{tot} , тс	5,01	6,82	8,91	11,28	13,92	16,84	20,04
Нагрузка в поперечной проекции S_q , тс	1,25	1,71	2,23	2,82	3,48	4,21	5,01
Нагрузка в продольной проекции S_n , тс	2,17	2,95	3,86	4,88	6,03	7,29	8,68
Нагрузка в вертикальной проекции S_v , тс	2,10	2,86	3,74	4,73	5,84	7,07	8,41
Сила, воспринимаемая одним швартовым устройством S , тс	3,27	4,45	5,81	7,36	9,09	10,99	13,08

Результаты расчетов нагрузок от натяжения швартовов для расчетного судна (длина — 115,10 м, ширина — 18,55 м, состояние загрузки — в грузу, осадка — 7,50 м), ошвартованного у причалов АО «Троица» (г. Северодвинск), приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчета нагрузок от натяжения швартовов для расчетного судна

Параметры	Скорость ветра, м/с						
	12	14	16	18	20	22	24
Поперечная составляющая суммарной силы Q_{tot} , тс	3,13	4,26	5,57	7,05	8,70	10,53	12,53
Нагрузка в поперечной проекции S_q , тс	0,78	1,07	1,39	1,76	2,18	2,63	3,13
Нагрузка в продольной проекции S_n , тс	1,36	1,85	2,41	3,05	3,77	4,56	5,42
Нагрузка в вертикальной проекции S_v , тс	1,31	1,79	2,34	2,96	3,65	4,42	5,26
Сила, воспринимаемая одним швартовым устройством S , тс	3,13	4,26	5,57	7,05	8,70	10,53	12,53

Расчетная нагрузка на швартовные устройства причалов АО «Троица» (г. Северодвинск) от натяжения швартовных канатов расчетного судна при максимальной скорости ветра (поперечного, КУ = 90°) 24 м/с составляет 13,08 т (судно в балласте) и 12,53 т (судно в грузу).

Проведенные натурные исследования подтвердили адекватность использованного теоретического решения. Было доказано, что при внешнем усилии до 15,5 т причальные тумбы находятся в работоспособном состоянии, и на основании этого сделан следующий вывод: в настоящее время швартовные тумбы пригодны к эксплуатации для расчетных судов, описанных в паспортах на причалы: «Причал перегрузки нефтепродуктов» и «Железобетонный причал с подкрановыми путями» согласно табл. 13 СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»².

¹ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стандартинформ, 2019. С. 19–22.

² СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стандартинформ, 2019. С. 23.

Заключение (Conclusion)

Причалное оборудование в целом и швартовные тумбы в частности являются одним из важнейших элементов причального сооружения, при неисправности или отсутствии которого эксплуатация причала запрещается. Следует отметить, что большое разнообразие типов тумб и отсутствие общей классификации, существенно затрудняет их сертификацию при идентификации причалов. Еще одним фактором, затрудняющим оценку, является большое количество швартовных устройств, выполненных хозяйственным способом. При этом проектная и исполнительная документация, как правило, отсутствует. Также не способствует разрешению ситуации отсутствие необходимой технической информации и терминологическое разнообразие, когда одни и те же понятия интерпретируются по-разному и обозначаются различными символами [1].

Для определения реальной несущей способности швартовной тумбы необходимо проведение статических испытаний и обязательная организация непрерывного деформационного мониторинга. С появлением большого количества новых типов сооружений и автоматической швартовки [2] необходима разработка нормативного документа по выбору типа эффективного для каждого конкретного случая швартовного устройства. При этом для конкретных типов тумб должны быть нормированы варианты конструкций крепления к причалу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарибин П. А.* Некоторые проблемы обследования плавучих причалов яхтенных марин / П. А. Гарибин, С. В. Егоров, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 783–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-783-797.
2. *Буцанец А. А.* Исследование проблемы построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуса безэкипажных судов через судоходные шлюзы / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.
3. Заключение о возможности и условиях проведения безопасных швартовных операций и стоянки наливных судов у причалов АО «Троица»: Пояснительная записка ГСТ/2021-02-1; ООО «Научно-исследовательское объединение «Плеяда»». — Новороссийск, 2021.
4. *Wu L.* Dynamic Inversion Model of the Mooring Force on a Floating Bollard of a Sea Lock / L. Wu, Z. Xiang, D. Shu, M. Liu, J. Yang, M. Li // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 7. — Pp. 1374. DOI: 10.3390/jmse11071374.
5. *Черкасов А. В.* Влияние точности естественных условий на определение швартовной нагрузки / А. В. Черкасов, А. В. Евсеев, П. А. Веселова // Перспективы науки. — 2020. — № 11 (134). — С. 259–261.
6. *Волков Д. В.* Расчет статической прочности brackets швартовной / Д. В. Волков, Т. Ф. Гаврильева // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — № S1. — С. 102–104. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-102-104.
7. Экспериментальное и численное исследование динамики ошвартованных объектов на волнении / М. Н. Богданов, И. К. Бородай, А. А. Кузнецов [и др.] // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2015. — № 88 (372). — С. 293–306.
8. *McGeady F. X.* In-Situ Testing of Mooring Bollards / F. X. McGeady // Ports 2013: Success through Diversification. — 2013. — Pp. 1375–1384. DOI: 10.1061/9780784413067.141.
9. *Cho S. R.* Ultimate load capacities of mooring bollards and hull foundation structures / S. R. Cho, J. Choung, C. M. Oh, K. S. Lee, J. Y. Kim // Ocean Engineering. — 2010. — Vol. 37. — Is. 8–9. — Pp. 770–776. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.02.011.
10. *Воронин Н. В.* Про тумбы, гаки и другие швартовные устройства / Н. В. Воронин. — М.: СВИВТ, 2020. — 160 с.
11. *Schelfn T. E.* The vessel in port: Mooring problems / T. E. Schelfn, C. Östergaard // Marine structures. — 1995. — Vol. 8. — Is. 5. — Pp. 451–479. DOI: 10.1016/0951-8339(95)97304-Q.

12. Савельев С. В. Определение действующих нагрузок от судов на причальные сооружения / С. В. Савельев // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2017. — № 4 (21). — С. 43–46.

REFERENCES

1. Garibin, Pavel A., Sergey V. Egorov, and Artem A. Butsanets. “Some issues of surveying floating berths of yacht marinas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 783–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-783-797.
2. Butsanets, Artem A., Nikolay M. Ksenofontov, and Tamara A. Volkova. “Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.
3. *Zaklyuchenie o vozmozhnosti i usloviyakh provedeniya bezopasnykh shvartovnykh operatsii i stoyanki nalivnykh sudov u prichalov AO «Troitsa», OOO Nauchno-issledovatel'skoe ob"edinenie «PLEYaDA»*. Poyasnitel'naya zapiska GST/2021–02–1. Novorossiisk 2021.
4. Wu, Linjian, Zhouyu Xiang, Dan Shu, Mingwei Liu, Jia Yang, and Minglong Li. “Dynamic Inversion Model of the Mooring Force on a Floating Bollard of a Sea Lock.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.7 (2023): 1374. DOI: 10.3390/jmse11071374.
5. Cherkasov, A. V., A. V. Evseev, and P. A. Veselova. “The effect of accuracy of natural conditions on determination of mooring load.” *Science Prospects* 11(134) (2020): 259–261.
6. Volkov, D. V., and T. F. Gavril'eva. “Raschet staticheskoi prochnosti brakety shvartovnoi.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* S1 (2022): 102–104. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-102-104.
7. Bogdanov, M. N., I. K. Borodaj, A. A. Kuznetsov, K. V. Kurchukov, E. S. Reshetkin, and B. N. Smirnov. “Experimental and numerical investigation of mooring ships dynamics on the waves.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 88(372) (2015): 293–306.
8. McGeedy, F.X. “In-Situ Testing of Mooring Bollards.” *Ports 2013: Success through Diversification*. 2013. 1375–1384. DOI: 10.1061/9780784413067.141.
9. Cho, Sang-Rai, Joonmo Choung, Chang-Min Oh, Kang-Su Lee, and Jung-Yeob Kim. “Ultimate load capacities of mooring bollards and hull foundation structures.” *Ocean Engineering* 37.8–9 (2010): 770–776. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.02.011.
10. Voronin, N. V. *Pro tumby, gaki i drugie shvartovnye ustroistva*. M.: SVIVT, 2020.
11. Schelfn, T. E., and C. Östergaard. “The vessel in port: Mooring problems.” *Marine structures* 8.5 (1995): 451–479. DOI: 10.1016/0951-8339(95)97304-Q.
12. Saveljev, S. V. “Determining existing loads from ships at docking facilities.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 4(21) (2017): 43–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарибин Павел Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: garibin@mail.ru,
kaf_gsk@gumrf.ru
Буцанец Артем Александрович —
кандидат технических наук,
начальник отдела НТИ и ИС
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Garibin, Pavel A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: garibin@mail.ru,
kaf_gsk@gumrf.ru
Butsanets, Artem A. —
PhD,
Head of the Department
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Егоров Сергей Вячеславович —
аспирант, вице-президент
Научный руководитель:
Гарибин Павел Андреевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
Ассоциация портов и судовладельцев
речного транспорта
125026, Российская Федерация, Москва,
ш. Ленинградское, 57
e-mail: egorovsv78@mail.ru

Egorov, Sergey V. —
Postgraduate, Vice-President
Supervisor:
Garibin, Pavel A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Association of Ports
and River Transport Shipowners
57 Leningradskoye Highway, Moscow, 125026,
Russian Federation
e-mail: egorovsv78@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17 января 2024 г.
Received: January 17, 2024.*

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108

HYDROABRASIVE WEAR OF JET PUMP NOZZLES

Y. N. Tsvetkov¹, V. A. Petrov¹, I. Y. Ivko²

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

² — Joint-Stock Company “Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”,
St. Petersburg, Russian Federation

The measurements of hydroabrasive wear of the jet pumps nozzles, used on dredges operating on transferring pulp, are carried out. The measurement result is compared with the result of modelling the flow in the pump suction chamber near the nozzles. The modelling is carried out using the Fluent program complex as a part of the Ansys program; the pure water is being modelled in the suction pipe. This assumption is made taking into account that pulp contains approximately 10 percent by volume of sand, therefore the trajectories of sand particles movement coincide with the streamlines of water. The results of modeling have shown, that the angle of attack on the surface of nozzle nose part nearest to the pulpline outlet is close to zero, whereas the angles of attack on the surface of the nozzle nose part furthest from the pipeline outlet differ considerably from the zero and range from 20 to 50 degrees, that is the values at which the hydroabrasive wear increases severalfold compared to the angles close to zero. The results of modelling are confirmed by the examination of the worn nozzles. It is turned out that the nose part of the nozzles wears out along a circle unevenly, the part furthest from the pipeline outlet wears at higher rate, that leads to the bevel of the plane of the nozzle nose opening, the bevel angle reaches 20–25 degrees. The microhardness values of the nose part of the worn nozzle are also in agreement with the results of modelling. The measurements have shown, that the microhardness of the nose part of the worn nozzle is uneven along a circle, and the microhardness of the most worn side of the nozzle nose is least. This fact indicates that the different zones of the surface of the nozzle nose part differ from each other by the rigidity of stress state scheme in hydroabrasive attack. It can be used later in choosing the regime of laboratory tests on hydroabrasive wear.

Keywords: jet pump, nozzle, hydroabrasive wear, wear of nozzles, angle of attack, microhardness of worn surface.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Vasiliy A. Petrov, and Ivan Ye. Ivko. “Hydroabrasive wear of jet pump nozzles.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 97–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108.

УДК 621.43.032.69: 532.525.3

ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ФОРСУНОК СТРУЙНОГО НАСОСА

Ю. Н. Цветков¹, В. А. Петров¹, И. Е. Ивко²

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

² — Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро
морской техники «Рубин», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнен сравнительный анализ результатов измерений гидроабразивного износа форсунок струйных насосов, используемых на гидрорегуляторах, задействованных на перекачке суспензии воды с песком, и результатов моделирования потока в камере всасывания насоса в районе форсунок. Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса Fluent в составе программного продукта Ansys.

При этом вместо пульпы во всасывающем патрубке смоделирована чистая вода с учетом того, что концентрация песка в суспензии составляет примерно 10 % по объему, поэтому траектории движения частиц песка совпадают с линиями тока воды. Результаты моделирования показали, что углы атаки на ближнюю к пульпопроводу поверхность форсунки, примыкающую к ее выходному отверстию, близки к нулю, тогда как углы атаки на поверхность форсунки, дальнюю от пульпопровода, существенно отличаются от нуля и составляют 20–50° — значения, при которых гидроабразивный износ возрастает в несколько раз по сравнению с углами атаки, близкими к нулю. Результаты моделирования подтверждены также обследованием изношенных форсунок: их носовая часть изнашивается по окружности неравномерно — с большей скоростью изнашивается сторона, дальняя от пульпопровода, что приводит к появлению скоса плоскости носового отверстия форсунок, при этом угол скоса достигает 20–25°. Значения микротвердости носовой части изношенной форсунки также соответствуют результатам моделирования. Измерения показали, что микротвердость носовой части форсунок неравномерна по окружности и наиболее изнашиваемая сторона носика форсунки имеет наименьшую микротвердость. Данный факт свидетельствует о том, что разные районы поверхности носовой части форсунок отличаются друг от друга жесткостью схемы напряженного состояния при гидроабразивном воздействии, что может быть в дальнейшем использовано при выборе режимов лабораторных испытаний на гидроабразивный износ.

Ключевые слова: струйный насос, форсунка, гидроабразивное изнашивание, износ форсунок, угол атаки, микротвердость изношенной поверхности.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Гидроабразивный износ форсунок струйного насоса / Ю. Н. Цветков, В. А. Петров, И. Е. Ивко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 97–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108.

Введение (Introduction)

Обеспечение износостойкости деталей машин является ключевой проблемой в ходе повышения эффективности эксплуатации техники. На водном транспорте, эксплуатация которого осуществляется в водной среде, данная проблема является наиболее актуальной, так как помимо традиционных видов изнашивания судовое оборудование также подвергается ряду специфических видов разрушающего воздействия, включая гидроабразивное [1]–[3]. Например, гидроабразивный (ГА) износ является основной причиной ремонта оборудования судов технического флота: грунтовых насосов, пульпопроводов и струйных насосов [4].

ГА-воздействие характеризуется высокой скоростью изнашивания, при этом конструктивные мероприятия, основанные на изменении геометрических характеристик изнашиваемых деталей и режима их эксплуатации, не могут привести к существенному снижению ГА-износов без потерь производительности оборудования. В настоящее время наиболее распространенным способом снижения ГА-износов является способ, основанный на применении износостойких материалов [3], [5]–[7]. Однако сложность выбора материала для ремонта или изготовления деталей указанного оборудования обусловлена тем, что износостойкость конкретного материала не является его абсолютной характеристикой, и даже в условиях одного вида изнашивания при изменении его режима происходит изменение относительной износостойкости материалов и ГА-изнашивание в данном случае не является исключением.

Выбор износостойкого материала производится по результатам лабораторных испытаний. Для того чтобы результаты испытаний достоверно описывали износостойкость материала в условиях эксплуатации, необходимо обеспечить режим, характеризующийся аналогичной последовательностью материалов в ряду износостойкостей, которая подобна реализуемой в натуральных условиях [8]. Можно предположить, что последнего можно добиться, если обеспечить при испытаниях такую же жесткость схемы напряженного состояния поверхностных слоев, как и при ГА-изнашивании в условиях эксплуатации.

Очевидно, что схема напряженного состояния поверхностных слоев изнашиваемой поверхности зависит от сочетания основных параметров ГА-воздействия: скорости потока, угла атаки, размеров абразивных частиц и их концентрации в несущей жидкости и т. д. [9], [10]. В лабораторных условиях невозможно воспроизвести в точности все значения указанных ранее параметров.

В данном случае наиболее разумным представляется оценивать адекватность условий изнашивания в лаборатории условиям эксплуатации по какому-либо одному параметру, представляющему собой интегральную характеристику ГА-воздействия и характеризующему реакцию материала на изнашивающее воздействие. Известно, например, что к жесткости схемы напряженного состояния поверхностных слоев изношенной поверхности очень чувствительна пластичность металлических материалов [11], [12], а значит, и степень упрочнения изнашиваемой поверхности при гидроабразивном воздействии также зависит от жесткости схемы ее напряженного состояния. Поэтому в качестве такой интегральной характеристики реакции материала можно использовать увеличение микротвердости изнашиваемой поверхности, для чего необходимо вначале оценить принципиальную возможность данного подхода. С этой целью удобнее всего использовать форсунки струйных насосов, небольшие габариты которых позволяют произвести на них необходимые измерения.

Целью работы является оценка чувствительности метода микротвердости изнашиваемой поверхности к изменению условий ГА-изнашивания (на примере форсунок струйных насосов). Иными словами, необходимо оценить перспективность метода микротвердости с точки зрения применения его в будущем для оценки жесткости схемы напряженного состояния поверхностных слоев деталей при ГА-изнашивании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) смоделировать течение жидкости в рабочей камере струйного насоса, чтобы установить характер ГА-воздействия на разные участки поверхности форсунки;
- 2) провести измерения параметров ГА-износа форсунок струйного насоса;
- 3) оценить степень упрочнения разных районов поверхности металлических форсунок при ГА-воздействии;
- 4) выполнить сравнительный анализ результатов моделирования и измерений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Струйные насосы (рис. 1), установленные на гидроперегрузателях ГП-1, ГП-14, ГП-18 и других моделей, служат для облегчения заполнения участка пульпопровода от входного отверстия наконечника, всасывающего грунт, до грунтового насоса в начальный период работы и подачи пульпы к грунтовому насосу. Форсунки 1 установлены по окружности (8 шт.) круговой камеры 2, в которую вода подается по трубопроводу 3 под рабочим давлением. Вода из форсунок подается в камеру всасывания 4, создавая разрежение, под действием которого поток пульпы движется по пульпопроводу 5. В камере 4 возникает сложная картина течения, при этом частицы песка попадают и в зону форсунок 3, вызывая их изнашивание (скорость изнашивания зависит от крупности частиц добываемого песка и режима работы). Износ форсунок приводит к отклонению направления струи и, как следствие, снижению производительности насоса и повышению скорости изнашивания корпуса насоса, поэтому изношенные форсунки периодически заменяют на новые.

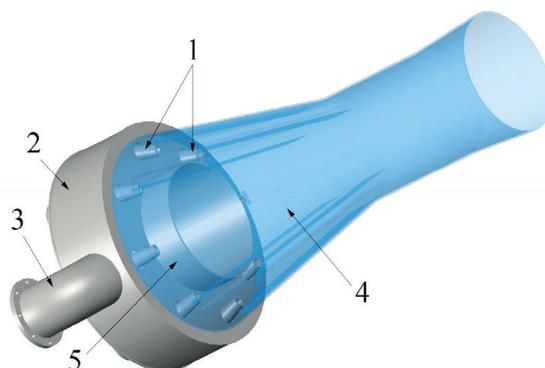


Рис. 1. Схема (3D-модель) струйного насоса

Моделирование течения жидкости в рабочей камере струйного насоса осуществлялось с использованием программного комплекса Fluent (в составе Ansys Student 2023 R1) с учетом рекомендаций [13], [14]. Была построена конечно-элементная модель струйного насоса. Базовый размер элемента сетки составляет 50 мм со сгущением в районах форсунок и созданием поверхностного слоя. В расчетах была использована модель $k-\epsilon$ турбулентности с опцией Enhanced Wall Treatment с учетом следующих граничных условий:

- условие симметрии;
- mass-flow-inlet для моделирования подачи чистой воды к форсункам;
- pressure-inlet на всасывающем патрубке;
- pressure-outlet на напорном патрубке;
- расход воды Q_p постоянный и равный 1250 м³/с (348 кг/с).

При моделировании вместо пульпы во всасывающем патрубке смоделирована чистая вода. Последнее допущение принято в связи с тем, что, как показывает опыт эксплуатации гидрорегрузателей, пульпа содержит песок с концентрацией примерно 10 % по объему, поэтому траектории движения частиц песка совпадают с линиями тока воды.

Традиционно форсунки изготавливаются из низкоуглеродистой нелегированной стали, однако при ремонте насосов стальные форсунки нередко заменяют фторопластовыми ввиду существенного облегчения процесса замены изношенной фторопластовой форсунки на новую по сравнению со стальными форсунками. Поэтому для проведения анализа изношенной поверхности были выбраны пять форсунок, бывших в эксплуатации: три форсунки из стали 20 и две — из фторопласта. Определение размеров изношенных форсунок при их визуальном осмотре выполняли с использованием штангенциркуля.

Наряду с измерением износа определяли шероховатость и микротвердость изношенной поверхности стальной форсунки. Для измерения шероховатости и микротвердости из трех форсунок выбрали имеющую наименьшие коррозионные повреждения поверхности, поскольку коррозия могла разрушить верхний наклепанный слой. Эту форсунку разрезали на отдельные части для удобства проведения измерений. Оценка шероховатости выполняли с помощью профилометра *MarSurfPS1*, на котором регистрировали среднее арифметическое отклонение профиля Ra (ИСО 4287–1997). Во всех измерениях шероховатости базовая длина была одинаковой и равной 0,8 мм, длина оценки включала пять базовых длин, а длина трассирования составила 5,6 мм. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Отпечатки наносили на те участки стальной форсунки, которые сохранили металлический блеск. Значения микротвердости определяли при трех нагрузках на индентор Виккерса: 0,49; 0,98 и 1,96 Н. При каждой нагрузке наносили шесть отпечатков — по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов — всего 18 отпечатков, и за результат брали среднее арифметическое значение.

Результаты и их обсуждения (Results and Discussion)

Как видно из результатов моделирования на рис. 2, угол атаки потока на наружную поверхность форсунки в районах, расположенных у выходного отверстия, отличается в зависимости от того, какая сторона рассматривается, — ближняя к всасывающему пульпопроводу или дальняя от него. Из представленного на рис. 2 распределения скоростей следует, что углы атаки на ближнюю к пульпопроводу поверхность 1, примыкающую к выходному отверстию форсунки, близки к нулю, тогда как углы атаки на поверхность 2 форсунки, дальнюю от пульпопровода, существенно отличаются от нуля. Для наглядности на рис. 3 в увеличенном виде представлено распределение скоростей потока в районе носовой части форсунки, изображенной сверху на рис. 2.

Как видно из рис. 3, а, для поверхности, наиболее близкой к выходному отверстию пульпопровода, векторы скоростей потока направлены вдоль поверхности, т. е. угол атаки близок к 0°, а для поверхности, наиболее удаленной от выходного отверстия пульпопровода (рис. 3, б) векторы скоростей потока направлены под углом к поверхности, при этом значения углов колеблются от 10 до 50°.

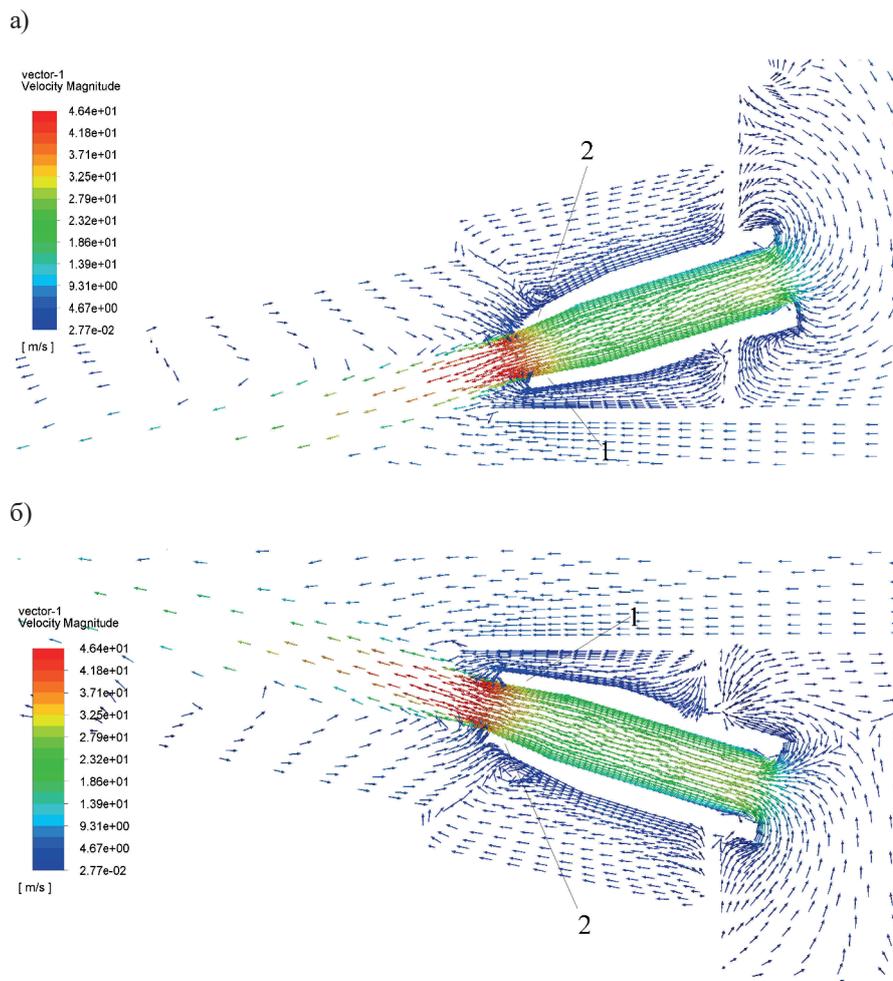


Рис. 2. Результаты моделирования течения жидкости в струйном насосе в районе расположения форсунок: а — сверху от пульпопровода; б — снизу от пульпопровода



Рис. 3. Распределение скоростей потока на границе с носовой частью 1 (а) и носовой частью 2 (б): I — поток воды в канале форсунки; II — стенка форсунки; III — поток снаружи форсунки

Известно, что зависимость износа от угла атаки абразивных частиц при гидроабразивном [15], [16] и газоабразивном [17] видах изнашивания большинства сплавов, за исключением сравнительно хрупких таких как белый чугун [17], имеет максимум. При ГА-изнашивании указанный максимум в зависимости от вида сплава и условий воздействия соответствует значению угла атаки в диапазоне от 20° до 50°. Например, в работах [15] и [16] были испытаны углеродистые стали,

близкие по составу к стали форсунок: износ имел максимум на углах атаки 30° и 45° соответственно. При этом износ для углов атаки, близких к 0° и 90° , снижается по сравнению с максимумом в несколько раз. Таким образом, распределение скоростей потока на рис. 2 указывает на то, что носовая часть форсунок изнашивается по окружности неравномерно, и с большей скоростью будет изнашиваться сторона, дальняя от пульпопровода.

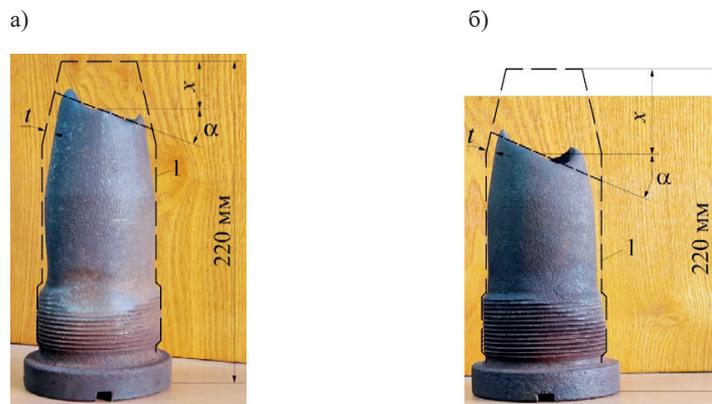


Рис. 4. Общий вид изношенных форсунок из стали 20 с контуром l исходной формы до ГА-воздействия:
а — форсунка с малым износом;
б — форсунка со сравнительно большим износом

Данный вывод подтверждается осмотром изношенных форсунок (рис. 4) — видно, что неравномерность износа носика форсунок приводит к появлению скоса плоскости носового отверстия форсунок, характеризуемого углом α (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики ГА-изнашивания форсунок из низкоуглеродистой стали после эксплуатации) в течение одной навигации (около 1400 ч работы)

Материал форсунки	Номер рисунка	Параметры износа			Средние скорости изнашивания	
		Угол скоса α , град.	Укорочение x , мм	Утонение t стенки, мм	$\Delta x/\Delta \tau$, мм/ч	$\Delta t/\Delta \tau$, мм/ч
Сталь 20	Рис. 3, а	20	30	7	0,021	0,0050
Сталь 20	Рис. 3, б	25	55	6	0,039	0,0043

При этом меньше изнашивается сторона носика форсунки, расположенная ближе к пульпопроводу (рис. 5).

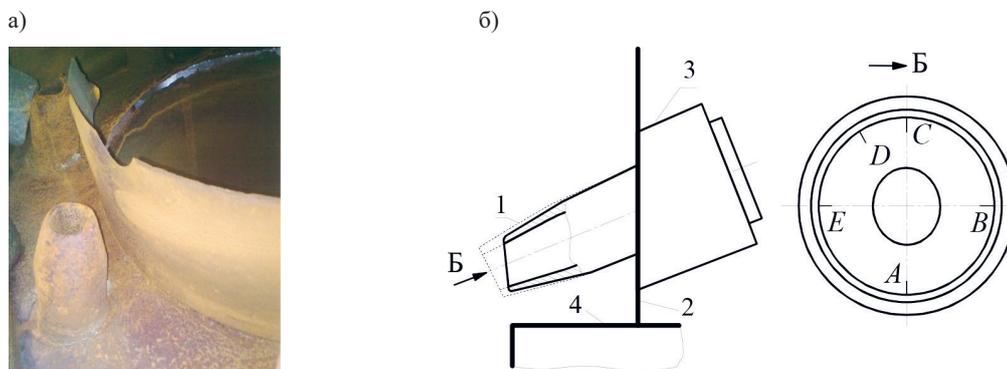


Рис. 5. Вид изношенных форсунок (а) внутри камеры всасывания и схема расположения форсунки (б) в насосе:
1 — контуры новой форсунки; 2 — передняя стенка круговой камеры;
3 — переходник с внутренней резьбой для установки форсунки; 4 — пульпопровод;
A, B, C, D, E — районы поверхности носовой части, в которых происходили измерения микротвердости

Стремление снизить влияние износа форсунок на производительность насоса привело к использованию в ряде случаев форсунок цилиндрической формы (рис. 6, б). Увеличение толщины стенки форсунки в районе выходного отверстия способствовало существенному увеличению времени до полного износа (полного разрушения) стенки форсунки, поэтому укорочение форсунки цилиндрической формы (см. рис. 6, б справа) за одинаковое время эксплуатации не такое существенное, как в случае с форсункой, имеющей сужающийся носик (рис. 6, а). Для сравнения слева от изношенной фторопластовой форсунки на рис. 6, б показана новая форсунка из стали 20 аналогичных исходных размеров.

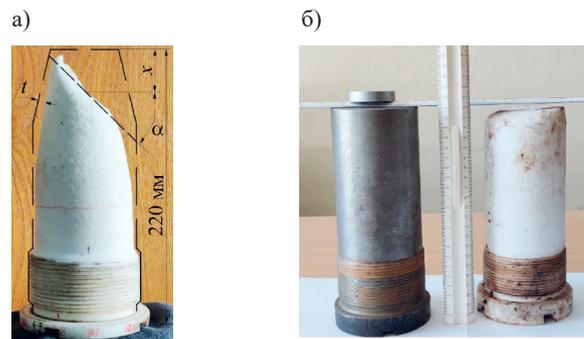


Рис. 6. Вид изношенных форсунок из фторопласта с конической носовой частью (а) и цилиндрической формой (б)

Значения микротвердости носовой части изношенной форсунки также соответствуют результатам измерения, которые показали, что микротвердость носовой части форсунок неравномерна по окружности и наиболее изнашиваемая сторона носика форсунки имеет наименьшую микротвердость (рис. 7). В статье [18] показано, что независимо от угла атаки гидроабразивного потока износ сталей изменяется прямо пропорционально продолжительности воздействия, т. е. изнашивание происходит без инкубационного периода. Это свидетельствует о том, что основным механизмом потери материала с поверхности является микрорезание. Тем не менее в рамках одного механизма разрушения поверхности при гидроабразивном воздействии разные районы поверхности носовой части форсунок отличаются друг от друга жесткостью схемы напряженного состояния.

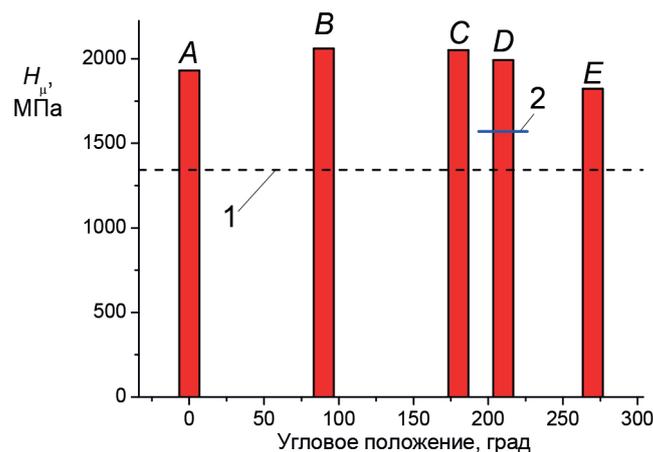


Рис. 7. Распределение микротвердости по окружности носовой части изношенной форсунки в районах А, В, С, D и E поверхности:
 1 — микротвердость поверхности в исходном состоянии;
 2 — микротвердость «сползшего» слоя

Изменение микротвердости изношенной форсунки по окружности ее носовой части подтверждено результатами оценки шероховатости этих районов (табл. 2).

Значения параметра Ra , мкм, на поверхности изношенной форсунки из стали 20

Район	Измерения при движении шупа		Среднее значение
	в окружном направлении	в продольном направлении	
<i>A</i>	6,149	10,70	8,42
<i>B</i>	5,758	5,793	5,78
<i>C</i>	3,744	4,459	4,10
<i>D</i>	3,715	4,247	3,98
<i>E</i>	6,440	5,964	6,20

Как видно, зоны, в которых наблюдается минимальное упрочнение (*A* и *E*), имеют бóльшую шероховатость, которую действительно можно объяснить бóльшими углами атаки абразивных частиц на эти зоны. Зоны *C* и *D* подвергаются скользящему воздействию абразивных частиц, оставляя неглубокие борозды на поверхности. Такому воздействию соответствуют невысокие скорости изнашивания (см. значения $\Delta l/\Delta t$ в табл. 1). На поверхности зон *A* и *E* абразивные частицы, по всей видимости, оставляют из-за большего угла атаки более короткие и более глубокие вмятины с наплывами по периферии.

Интересное явление, зарегистрированное при ГА-изнашивании форсунок, — «сползший» слой (рис. 8), при котором создается впечатление, что поверхностные слои *1* теряют устойчивость и подобно слоям, сдуваемым с поверхности воды, налитой в блюдце, сползают с нее, образуя участок в виде тонкой пластинки *2*, выступающей за пределы поверхности. Схожие явления наблюдались и в других исследованиях. Например, в работе [3] при испытании сталей и других сплавов на установке лоткового типа в результате значительных пластических деформаций было замечено сползание поверхностного слоя толщиной несколько микрометров так, что он выступал на 1–2 мм за плоскость грани, перпендикулярной изнашиваемой поверхности образца.

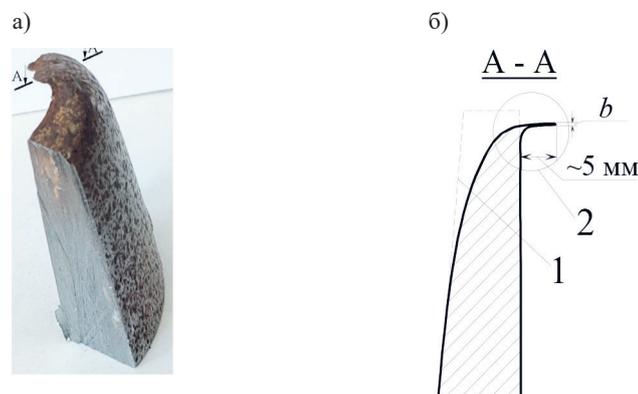


Рис. 8. Общий вид (а) и схема (б) «сползшего» слоя с носика стальной форсунки

Возможность рассматриваемого явления обусловлена окатанной формой частиц речного песка [4], [10] и фактически при ГА-воздействии имеет место не микрорезание, а выглаживание поверхности в результате интенсивной пластической деформации поверхности. Такой механизм повреждающего воздействия подтверждается образованием ряби на металлической поверхности [10], являющейся признаком пластического течения металла поверхности. Образование ряби как индикатора пластического течения отмечалось также при газоабразивной эрозии. Например, в статье [19] подробно исследовано образование регулярных микроволн (ряби) на поверхности алюминия и силумина при газоабразивном воздействии. В качестве эродента использовались стеклянные шарики диаметром 0,4 мм и частицы корунда Al_2O_3 средним диаметром 0,406 мм, имеющие угловатую форму. Изнашивание металла стеклянными шариками характеризовалось наличием инкубационного периода, в течение которого потери массы отсутствовали, и именно в инкубационный период про-

исходило образование ряби. Исследования поверхности на электронном сканирующем микроскопе показали, что рябь образуется складками пластически вытесненного металла, при последующих ударах частиц происходит его отделение в виде чешуек с задней поверхности гребней. При воздействии только угловатых частиц Al_2O_3 были зарегистрированы явные признаки микрорезания, причем при изнашивании смесью стеклянных шариков и частиц корунда при постепенном увеличении относительной доли частиц корунда в смеси интенсивность проявления ряби уменьшалась. Тем не менее сравнительно большие протяженность и толщина «сползшего» слоя (см. рис. 8, б) позволяют усомниться в том, что причиной такого образования являются пластические деформации тончайшего поверхностного слоя.

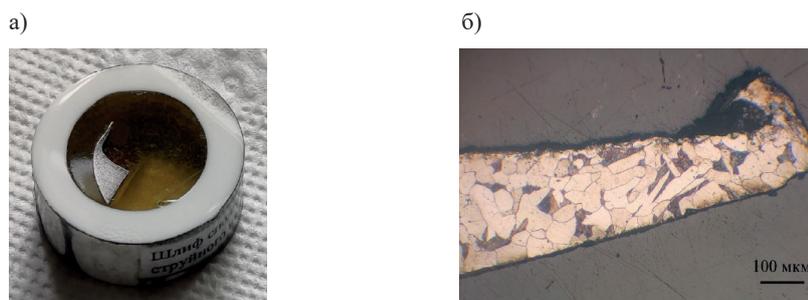


Рис. 9. Микрошлиф (а) «сползшего» слоя и его структура (б), выявленная травлением микрошлифа в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты

С целью определения истинной причины этого явления был изготовлен микрошлиф (рис. 9, а) сечения *A-A* (см. рис. 8, а) этого слоя. Была измерена микротвердость шлифа и травлением в 4 %-м спиртовом растворе HNO_3 исследована форма зерен (рис. 9, б) в пределах этого слоя. Микротвердость «сползшего» слоя оказалась сравнительно невысокой, т. е. заметно ниже микротвердости, измеренной в зонах *A*, *B*, *C*, *B*, *D* и *E*, что противоречит предположению о большой пластической деформации, испытанной этим слоем при течении. Анализ формы зерен на микрошлифе (см. рис. 9, б) не выявил искажения их формы (отсутствовала вытянутость зерен в направлении, соответствующем направлению атаки ГА-потока), характерной для больших пластических деформаций. Таким образом, обнаруженный «сползший» появился не в результате течения поверхностного слоя при больших пластических деформациях, а по всей видимости, явился следствием того, что после того как стенка носовой части форсунки в результате изнашивания превратилась в тонкую пластину, энергии ГА-потока оказалось достаточно для того, чтобы согнуть эту пластинку.

Заключение (Conclusion)

Носовая часть форсунок струйных насосов, используемых на гидрперегрузателях, задействованных на перекачке пульпы, изнашивается неравномерно по окружности при ГА-воздействии: с большей скоростью изнашивается сторона форсунки, дальняя от пульпопровода, что приводит к появлению скоса носовой части форсунки. Результаты моделирования потока жидкости в камере всасывания насоса показали, что большая скорость ГА-изнашивания дальней от пульпопровода стороны форсунки объясняется тем, что углы атаки потока на нее составляют $20-50^\circ$, в то время как углы атаки потока на сторону форсунки, ближнюю к пульпопроводу, близки к нулю.

Микротвердость поверхности носовой части изношенной форсунки также переменна по окружности: минимальна в тех районах поверхности, скорость которых наибольшая, и максимальна в тех районах, где скорость изнашивания минимальная. Различие значений упрочнения разных зон носовой части форсунки указывает на то, что в разных зонах поверхности реализуется разная жесткость схемы напряженного состояния при гидроабразивном воздействии, что может быть в дальнейшем использовано при выборе режимов лабораторных испытаний на гидроабразивный износ.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают глубокую благодарность начальнику РЭБ флота в г. Отрадное Ленинградской области А. М. Олейнику за предоставленную возможность провести обследование форсунок струйных насосов на действующих судах технического флота и оказанное при этом содействие в предоставлении необходимой информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С. П. Козырев. — М.: Машиностроение, 1971. — 240 с.
2. Супрун В. К. Абразивный износ грунтовых насосов и борьба с ним / В. К. Супрун. — М.: Машиностроение, 1972. — 104 с.
3. Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
4. Петров В. А. Гидроабразивное изнашивание оборудования судов технического флота / В. А. Петров, А. М. Олейник, Ю. Е. Ежов, Ю. Н. Цветков // 67-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета. — Астрахань: Астраханский гос. техн. ун-т, 2023. — С. 583–587.
5. Антоев К. П. Исследование стойкости к гидроабразивному воздействию перспективных полимерных футеровочных материалов / К. П. Антоев, С. Н. Попов, Б. Н. Заровняев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 1. — С. 185–191.
6. Атрощенко В. А. Повышение эффективности транспортных трубопроводов закладочного комплекса применением полиуретанового покрытия / В. А. Атрощенко, В. И. Александров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 10–1. — С. 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.
7. Felix D. Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment — a century of research and development / D. Felix, I. Albayrak, A. Abgottsporn, R. M. Boes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2016. — Vol. 49. — Is. 12. — Pp. 122001. DOI: 10.1088/1755-1315/49/12/122001.
8. Тененбаум М. М. Сопротивление гидроабразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
9. Цветков Ю. Н. Определение коэффициента жёсткости напряжённого состояния поверхности металлов при гидроабразивном изнашивании / Ю. Н. Цветков, Л. И. Погодаев // Проблемы машиностроения и надёжности машин (Машиноведение). — 1994. — № 6. — С. 109–114.
10. Цветков Ю. Н. Напряжённое состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива / Ю. Н. Цветков, Л. И. Погодаев. — СПб.: СПбГУВК, 2004. — 94 с.
11. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. — М.: Металлургиздат, 1970. — 196 с.
12. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. — Л.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
13. Никущенко Д. В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT: учеб. пособие / Д. В. Никущенко. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2004. — 94 с.
14. Клюев А. С. Сравнение результатов численного расчёта струйного насоса в CFD пакетах ANSYS и OpenFOAM / А. С. Клюев, Я. И. Чернышев, Е. А. Иванов, И. О. Борщев // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. — С. 388–403. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-367.
15. Javaheria V. Slurry erosion of steel — Review of tests, mechanisms and materials / V. Javaheria, D. Portera, V. T. Kuokkala // Wear. — 2018. — Vol. 408–409. — Pp. 248–273. DOI: 10.1016/j.wear.2018.05.010.
16. Al-Bukhaiti M. A. Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron / M. A. Al-Bukhaiti, S. M. Ahmed, F. M. F. Badran, K. M. Emara // Wear. — 2007. — Vol. 262. — Is. 9–10. — Pp. 1187–1198. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.018.
17. Young J. P. Particle erosion measurements on metals / J. P. Young, A. W. Ruff // Journal of Engineering Materials and Technology. — 1977. — Vol. 99. — Is. 2. — Pp. 121–125. DOI: 10.1115/1.3443420.

18. Yao J. Experimental Investigation of Erosion of Stainless Steel by Liquid-solid Flow Jet Impingement / J. Yao, F. Zhou, Y. Zhao, H. Yina, Q. Guo, N. Li // *Procedia engineering*. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 1083–1091. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.

19. Talia J. E. Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys / J. E. Talia, Y. A. Ballout, R. O. Scattergood // *Wear*. — 1996. — Vol. 196. — Is. 1–2. — Pp. 285–294. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06928-1.

REFERENCES

1. Kozyrev, S. P. *Gidroabrazivnyy iznos metallov pri kavitatsii*. M.: Mashinostroyeniye, 1971.
2. Suprun, V. K. *Abrazivnyy iznos gruntovykh nasosov I bor'ba s nim*. M.: Mashinostroyeniye, 1972.
3. Pogodayev, L. I., and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivnyy i kavitatsionnyy iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroyeniye, 1984.
4. Petrov, V. A., A. M. Oleynik, Y. E. Ezhov, and Y. N. Tsvetkov. “Gidroabrazivnoye iznashivaniye oborudovaniya sudov tekhnicheskogo flota.” *67th Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya AGTU*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2023. 583–587.
5. Antoyev, K. P., S. N. Popov, and B. N. Zarovnyayev. “A study of promising polymer lining materials resistance to hydroabrasive effects.” *Izvestiya Tula State University 1* (2019): 185–191.
6. Atroshchenko, V. A., and V. I. Alexandrov. “Increasing the Efficiency of the Transport Pipelines of the Stowing Complex with the Application of a Polyurethane Coating.” *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)* 10–1 (2022): 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.
7. Felix, David, I. Albayrak, A. Abgottspon, and R. M. Boes. “Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment—a century of research and development.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 49. Is. 12. IOP Publishing, 2016. DOI: 10.1088/1755-1315/49/12/122001.
8. Tenenbaum, M. M. *Soprotivlenie gidroabrazivnomu iznashivaniyu*. M.: Mashinostroenie, 1976.
9. Tsvetkov, Yu. N., and L. I. Pogodaev. “Opredelenie koeffitsienta zhestkosti napryazhennogo sostoyaniya poverkhnosti metallov pri gidroabrazivnom iznashivanii.” *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin (Mashinovedenie)* 6 (1994): 109–114.
10. Tsvetkov, Yu. N., and L. I. Pogodaev. *Napryazhennoe sostoyanie metallov pri iznashivayushchem vozdeystvii abraziva*. SPb.: SPbGUVK, 2004.
11. Kolmogorov, V. L. *Napryazheniya, deformatsii, razrusheniye*. M.: Metallurgizdat, 1970.
12. Smirnov-Alyayev, G. A. *Mekhanicheskie osnovy plasticheskoi obrabotki metallov*. L.: Mashinostroenie, 1968.
13. Nikushchenko, D. V. *Issledovanie techenii vyazkoi neszhimaemoi zhidkosti na osnove raschetnogo kompleksa FLUENT*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2004.
14. Klyuyev, A., Ya. Chernyshev, E. Ivanov, and I. Borshchev. “Comparison of jet pump numerical calculation results in Ansys and Openfoam CFD packages.” *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmomatika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2020. 388–403. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-367.
15. Javaheri, Vahid, David Porter, and Veli-Tapani Kuokkala. “Slurry erosion of steel—Review of tests, mechanisms and materials.” *Wear* 408–409 (2018): 248–273. DOI: 10.1016/j.wear.2018.05.010.
16. Al-Bukhaiti, M. A., S. M. Ahmed, F. M. F. Badran, and K. M. Emara. “Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron.” *Wear* 262.9–10 (2007): 1187–1198. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.018.
17. Young, J. P., and A. W. Ruff. “Particle erosion measurements on metals.” *Journal of Engineering Materials and Technology* 99.2 (1977): 121–125. DOI: 10.1115/1.3443420.
18. Yao, Jun, Fang Zhou, Yanlin Zhao, Hao Yin, Qixun Guo, and Ning Li. “Experimental investigation of erosion of stainless steel by liquid-solid flow jet impingement.” *Procedia engineering* 102 (2015): 1083–1091. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.
19. Talia, J. E., Y. A. Ballout, and R. O. Scattergood. “Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys.” *Wear* 196.1–2 (1996): 285–294. DOI: 10.1016/0043-1648(96)06928-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Петров Василий Андреевич — аспирант
Научный руководитель: Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: 9522114620w@gmail.com

Ивко Иван Евгеньевич — инженер-конструктор
Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»
191119, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 90
e-mail: ivkoie@live.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Petrov, Vasilii A. — Postgraduate
Supervisor: Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: 9522114620w@gmail.com

Ivko, Ivan Ye. — Structural engineer
Joint-Stock Company “Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”
90 Marata Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
e-mail: ivkoie@live.com

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.
Received: November 17, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120

THE RISK MATRIX APPLICATION TO ASSESS THE INSTALLATION OF TORSIONAL VIBRATION MONITORING SYSTEMS ON SHIPS

M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

According to statistics, the number of accidents related to the failures of ship engine and propulsion systems remains in second place among the total number of accidents. One of the reasons for the destruction of diesel crankshafts, intermediate and propeller shafts, elastic couplings and other elements of shaft lines are torsional vibrations in combination with other types of fluctuations and vibrations. The main method for monitoring the level of torsional vibrations in ship's shaft lines remains periodic torsiography or strain measurement. The widespread introduction of diagnostic and control systems on ships leads to the technical possibility of constant monitoring of the level of torsional vibrations, which will allow you to reduce the risks of accidents in the periods between torsiography. Like any new technical solution, the introduction of torsional vibration monitoring systems requires a scientific justification of the need for their application, which can be carried out with using risk theory. The results of applying the risk matrix to justify the installation of torsional vibration monitoring systems in marine propulsion systems are presented in the paper. As a result, a risk matrix with quantitative parameters is obtained to justify the installation of torsional vibration monitoring systems and reduce the risks of ship's shaft line breakdowns. As an example, the application of the risk matrix for "OT" type tugs, which are widely used for various operations on the Russian waterways, is considered. It is established that for these types of vessels, the use of a monitoring system will be justified to reduce the risks of accidents, serious accidents and catastrophes that may arise from the development of dangerous torsional vibrations. A method for applying the assessment of the damage degree from an accident occurrence to determine the reduction of economic costs when using torsional vibration monitoring systems is proposed in the paper. It is found that for the "OT" type tugs, the installation of torsional vibration monitoring systems will be justified, both from the point of view of economics and reducing the accidents risks of ship engine and propulsion systems.

Keywords: risk matrix, torsional vibration monitoring, marine power plants, machine-propulsion systems, risk assessment.

For citation:

Pokusaev, Mikhail N., and Maksim M. Gorbachev. "The risk matrix application to assess the installation of torsional vibration monitoring systems on ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 109–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120.

УДК 629.12

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ РИСКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАНОВКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СУДАХ

М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

В статье рассмотрены причины аварийных ситуаций, связанных с отказами судовых машинно-двигательных комплексов, которые, согласно статистике, находятся на втором месте среди общего количества аварий. Подтверждено, что одной из причин разрушения коленчатых валов дизелей, промежуточных и гребных валов, материалов упругих муфт и других элементов валопроводов являются крутильные колебания в сочетании с другими видами колебаний и вибраций. Основным методом контроля уровня крутильных колебаний в судовых валопроводах является периодическое торсиографирование. Широкое внедрение систем диагностики и контроля на судах обеспечивает техническую возможность постоянного мониторинга уровня крутильных колебаний, что способствует снижению рисков возникновения аварий в периоды между торсиографированием. Отмечается, что, как и любое новое техническое решение, внедрение систем мониторинга крутильных колебаний требует научного обоснования необходимости их применения и его можно

реализовать при помощи теории рисков. В статье приведены результаты применения матрицы рисков для обоснования установки систем мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах. В результате исследования получена матрица рисков с количественными параметрами для обоснования установки систем мониторинга крутильных колебаний и снижения рисков возникновения поломок судовых валопроводов. В качестве примера рассмотрено применение матрицы рисков для буксиров типа «ОТ», которые широко применяются при проведении различных операций на водных путях России. Установлено, что для судов данного типа применение системы мониторинга обеспечит снижение рисков возникновения аварий, серьезных аварий и катастроф, которые могут являться причиной развития опасных крутильных колебаний. В статье предложен метод применения оценки степени ущерба от возникновения аварии для определения снижения экономических издержек при использовании систем мониторинга крутильных колебаний. Установлено, что для буксиров типа «ОТ» установка систем мониторинга крутильных колебаний будет обоснована как экономически, так и с точки зрения снижения рисков возникновения аварий судовых машинно-двигательных комплексов.

Ключевые слова: матрица рисков, мониторинг крутильных колебаний, судовые энергетические установки, машинно-двигательные комплексы, оценка рисков.

Для цитирования:

Покусаев М. Н. Применение матрицы рисков для оценки установки систем мониторинга крутильных колебаний на судах / М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 109–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120.

Введение (Introduction)

Поломки элементов судовых машинно-двигательных комплексов (далее — МДК), возникающие в результате совокупности различных факторов, в том числе влияния крутильных колебаний, которые периодически наблюдаются и в настоящее время несмотря на применение современных методов проектирования и изготовления судов, их энергетических установок и использования демпферов для снижения крутильных колебаний. Среди причин сохранения рисков возникновения таких аварий можно выделить следующие:

- сложность конструктивных схем МДК современных судов с применением редукторов, винторулевых колонок, винтов регулируемого шага, упругих муфт и т. д., способствующая повышению количества опасных валопроводных форм крутильных колебаний;
- применение двигателей повышенной «оборотности», позволяющее увеличить диапазон резонансных частот крутильных колебаний, входящих в рабочий диапазон частот вращения колчатых валов главных двигателей (далее — ГД);
- отказы демпферов крутильных колебаний ввиду различных причин: вытекание жидкости наполнителя, повреждение пружин, заклинка маховой массы и др.

Кроме того, все чаще судовладельцев при диагностике технических средств интересует процесс перехода от концепции «по регламенту» к концепции «по состоянию», что в настоящее время возможно в связи с широким применением на судах систем автоматизации и анализа больших объемов информации, в том числе с использованием технологий нейросетей и Big Data. Для снижения рисков возникновения аварий в судовых МДК из-за развития крутильных колебаний необходима периодическая оценка технического состояния и эффективности работы демпферов, как гидравлических, так и пружинных.

Существует несколько методов оценки технического состояния демпферов и назначения их остаточного ресурса, однако все они имеют общий недостаток, такой как отсутствие полной гарантии безотказной работы демпферов в периоды от 10 000 до 15 000 ч эксплуатации между инспекциями. Это вызвано наличием вероятности случайных эксплуатационных факторов, которые могут привести к повышению напряжений в элементах МДК. К таким факторам можно отнести работу МДК в запретной зоне частот вращения (при их наличии), перегрузку элементов МДК при посадке судна на мель и попытках его самостоятельного схода, высокие динамические нагрузки на МДК в режимах работы *пуск – стоп* и реверсирования ГД, характерных для буксирных судов, работу в сложных метеорологических и ледовых условиях и т. д.

Предлагаемым техническим решением указанной проблемы является мониторинг параметров, возникающих из-за крутильных колебаний, таких как угловые амплитуды крутильных колебаний, напряжения в валах, напряжения или температуры в материале упругих муфт, переменный момент в редукторах и т. д. Мониторинг параметров осуществляется при помощи системы, разработанной для решения этой задачи. Фактически данные параметры периодически контролируются при проведении процедуры *торсиографирования судовых МДК* в соответствии с требованиями классификационных обществ (в России это Российский морской регистр судоходства (далее — РС) и Российское классификационное общество (далее — РКО), при этом система мониторинга должна постоянно осуществлять их контроль. Кроме того, предлагается выполнение системой мониторинга дополнительных задач и наличие в системе умных (Smart) функций: запись, анализ и передача данных, обеспечение звуковой и визуальной сигнализации для экипажа судна при превышении допустимых норм.

Внедрение систем мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК должно быть обосновано, поскольку на данном этапе развития подобных систем их установка будет *добровольным решением судовладельца*. Обоснование должно свидетельствовать не только об экономической выгоде, но и показывать результаты сравнительной оценки рисков для судна без применения и с применением системы мониторинга крутильных колебаний. В работе М. Д. Емельянова [1] отмечается, что использование защитных мер по снижению рисков может существенно снизить масштаб тяжести последствий при наступлении аварии, что свидетельствует о прогнозируемом снижении риска для судов при внедрении системы мониторинга крутильных колебаний.

Оценка рисков от крутильных колебаний для судов предназначена для решения следующих важных задач:

- оценить допустимые риски возникновения инцидентов, аварий и серьезных аварий на судах от развития крутильных колебаний, что будет востребовано как судовладельцами, так и классификационными обществами для обеспечения безопасности мореплавания;
- оценить наиболее опасные причины возникновения аварийных ситуаций при развитии крутильных колебаний на судах и обосновать необходимость разработки и внедрения защитных и предупреждающих мер;
- выполнить научное и экономическое обоснование для судовладельцев применения систем мониторинга крутильных колебаний на судах с повышенными значениями рисков.

Оценка рисков для проведения формализованной оценки безопасности на судах может осуществляться разными методами, которые подробно рассматриваются в работах [2], [3] и др. Таким образом, можно сформулировать цель и задачи данного исследования.

Цель исследования — рассмотреть применение матрицы рисков для обоснования применения системы мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ метода матрицы рисков и возможность его применения для обоснования установки системы мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК.
2. Рассмотреть и применить метод оценки степени ущерба от возникновения аварии для определения снижения экономического ущерба при использовании системы мониторинга крутильных колебаний.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общий анализ риска для судна с определением возможных экономических потерь для судовладельца от развития крутильных колебаний можно выполнить достаточно наглядным способом с использованием *матрицы риска*, которая является базовым методом согласно рекомендациям Международной морской организации (далее — ИМО) и РС.

Величина риска R определяется по формуле

$$R = PC,$$

где P — вероятность возникновения риска;

C — тяжесть последствий возникновения риска (в данном случае величина экономических потерь).

Согласно рекомендациям ИМО и [3], ранжирование тяжести (уровня) последствий может осуществляться с присвоением индексов от одного до пяти и обозначением соответствующих статусов: 1 — незначительное происшествие; 2 — происшествие; 3 — авария; 4 — серьезная авария; 5 — катастрофа.

Вероятность события также ранжируется с присвоением индексов от 1 до 5 и обозначением соответствующих статусов: 1 — очень низкая; 2 — низкая; 3 — средняя; 4 — высокая; 5 — очень высокая.

В результате расчета по приведенной ранее формуле формируется матрица рисков в виде табл. 1.

Таблица 1

Качественная двухмерная матрица рисков

Очень высокая	Вероятность события	5	5	10	15	20	25
		4	4	8	12	16	20
		3	3	6	9	12	15
		2	2	4	6	8	10
		1	1	2	3	4	5
Двухмерная матрица рисков		1	2	3	4	5	
		Уровень последствий					
		Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа	

Ранжирование полученных рисков предлагается выполнять в соответствии с табл. 2, составленной на основе проведенного исследования.

Таблица 2

Ранжирование количественной оценки рисков

Качественная оценка рисков		
Степень риска	Очень низкий	1...2
	Низкий	3...4
	Средний	5...9
	Высокий	10...16
	Очень высокий	20...25

Нижняя граница риска составит $R = 2$, при $R < 2$ на риск не следует обращать внимание. Верхняя граница допустимого риска составит $R_{\text{доп}} = 10$, соответственно, высокий и очень высокий риск при $R > 10$ будет являться недопустимым. Риск при условии $2 < R < 10$ может регулироваться для повышения безопасности. Если применить полученную матрицу рисков для оценки опасности крутильных колебаний для судна и МДК, то очевидно, что при этом необходимы количественные показатели как для вероятности, так и тяжести последствий событий.

Количественные показатели вероятности для одного судна в год, согласно рекомендациям ИМО (при отсутствии реальных статистических данных), будут следующими: очень низкая вероятность 0,00001; низкая вероятность 0,0001; средняя вероятность 0,001; высокая вероятность 0,01; очень высокая вероятность 0,1. Таким образом, для количественной оценки рисков необходимо знать количественную величину уровня последствий. Применительно к случаю возникновения аварийных ситуаций от развития крутильных колебаний предлагается в качестве количественных параметров уровней последствий использовать следующие соответствия:

– $C_{\text{нп}}$ (при незначительном происшествии) — цена простоя судна в течение одних суток (например, контрольное торсиографирование МДК при превышении величины крутильных колебаний на отдельных режимах работы ГД);

– $C_{\text{п}}$ (при происшествии) — цена простоя судна в течение трех суток (например, замена демпфера крутильных колебаний);

– $C_{\text{а}}$ (при аварии) — стоимость ремонта гребного или промежуточного вала, упругой муфты с простоем судна;

– $C_{\text{са}}$ (при серьезной аварии) — стоимость ремонта ГД или нескольких элементов МДК с простоем судна;

– $C_{\text{к}}$ (при катастрофе) — полная стоимость судна при его затоплении от поступившей воды при выходе сломанного гребного вала из дейдвудного устройства.

Таким образом, двухмерная матрица рисков, приведенная в табл. 1, преобразована в виде табл. 3.

Таблица 3

Количественная двухмерная матрица рисков

Очень высокая	Вероятность события	5	$5C_{\text{нп}}$	$5C_{\text{п}}$	$5C_{\text{а}}$	$5C_{\text{са}}$	$5C_{\text{к}}$
Высокая		4	$4C_{\text{нп}}$	$4C_{\text{п}}$	$4C_{\text{а}}$	$4C_{\text{са}}$	$4C_{\text{к}}$
Средняя		3	$3C_{\text{нп}}$	$3C_{\text{п}}$	$3C_{\text{а}}$	$3C_{\text{са}}$	$3C_{\text{к}}$
Низкая		2	$2C_{\text{нп}}$	$2C_{\text{п}}$	$2C_{\text{а}}$	$2C_{\text{са}}$	$2C_{\text{к}}$
Очень низкая		1	$C_{\text{нп}}$	$C_{\text{п}}$	$C_{\text{а}}$	$C_{\text{са}}$	$C_{\text{к}}$
Двухмерная матрица рисков			$C_{\text{нп}}$	$C_{\text{п}}$	$C_{\text{а}}$	$C_{\text{са}}$	$C_{\text{к}}$
		Уровень последствий					
		Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа	

Полученная в табл. 3 матрица рисков позволяет определить риски (в отличие от табл. 1) при наличии статистических данных по убыткам судовладельца от последствий возникновения негативной ситуации из-за развития крутильных колебаний.

Результаты (Results)

В качестве объекта для применения выработанного подхода оценки рисков было выбрано судно-буксир типа «ОТ» ввиду следующих причин:

– достаточно большая распространенность данного типа судов для буксировки несамоходных транспортных средств не только на внутренних водных путях РФ, но и в секторе *река – море*, что подтверждается наличием их большого количества под надзором РС и РКО;

– работа МДК буксиров в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, включая режимы пуска и остановки, реверсирования ГД, что приводит к развитию достаточно больших амплитуд крутильных колебаний (подтверждено торсиограммой, полученной при измерениях крутильных колебаний МДК судна типа «ОТ» пр. Н3290 (ГД правого борта с пуском, постепенным набором частоты вращения и последующим снижением до остановки), полученной авторами исследования в 2022 г. при проведении торсиографирования МДК буксира «Зубр») — рис. 1;

– факты аварий промежуточных, гребных и коленчатых валов буксиров типа «ОТ» с характерными признаками поломки от усталостных напряжений, вызванных крутильными колебаниями (рис. 2).

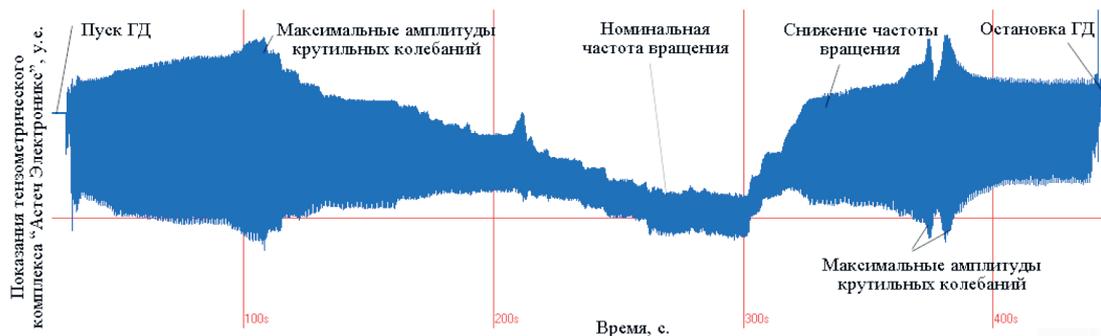


Рис. 1. Вид торсиограммы ГД (правый борт) судов типа «ОТ» пр. Н3290



Рис. 2. Поломка МДК буксира типа «ОТ» пр. 428.2

На основании данных, полученных авторами исследования при проведении торсиографирований судовых МДК, анализа научных работ и технической литературы, была сформирована табл. 4 по аналогии с рассмотренными работе [3].

Таблица 4

Таблица тяжести последствий от развития КК для буксира типа «ОТ»

Индекс	Тяжесть последствий	Описание события	Цена последствий, руб.
1	Незначительное происшествие	Простой судна в течение одних суток	250000
2	Происшествие	Простой судна в течение трех суток	750000
3	Авария	Ремонт валопровода	5000000
4	Серьезная авария	Ремонт ГД или МДК	12000000
5	Катастрофа	Потеря судна	25000000

Приведем необходимые пояснения к этой таблице. Стоимость аренды буксиров типа «ОТ» составляет 250 тыс. руб. в день, что может соответствовать стоимости простоя судна из-за незначительного происшествия. Происшествие может привести к ремонту и простоя судна до трех дней и убыткам в размере до 750 тыс. руб. Авария, связанная с необходимостью ремонта валопровода, может привести к затратам судовладельца от 3,5 млн руб. до 5 млн руб. Серьезная авария может повлечь за собой не только ремонт валопровода, но и ГД, что приведет к затратам (с учетом простоя), равным примерно половине стоимости судна (до 12 млн руб.). Минимальная цена находящегося в эксплуатации буксира типа «ОТ» на 2022 г. составила порядка 25 млн руб., что соответствует стоимости потери судна при катастрофе без учета возможных человеческих жертв и ущерба для окружающей среды. При таких исходных данных матрица рисков при авариях от развития опасных крутильных колебаний МДК буксира «ОТ» имеет вид табл. 5.

Таблица 5

Матрица рисков для буксира типа «ОТ»

Очень высокая	Вероятность события	0,1	25000	75000	500000	1200000	2500000
Высокая		0,01	2500	7500	50000	120000	250000
Средняя		0,001	250	750	5000	12000	25000
Низкая		0,0001	25	75	500	1200	2500
Очень низкая		0,00001	2,5	7,5	50	120	250
Двухмерная матрица рисков для буксира типа «ОТ»			250000	750000	5000000	12000000	25000000
		Уровень последствий					
		Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа	

Качественную матрицу рисков можно скорректировать с учетом табл. 6, в которой приведена количественная оценка рисков. Соответственно недопустимой величиной в количественном выражении является риск при $R > 100\,000$ руб. При $R < 10\,000$ риск можно считать ничтожным, а при условии $10\,000 < R < 100\,000$ руб. он будет управляемым.

Таблица 6

Количественная оценка рисков для буксира «ОТ»

Количественная оценка рисков, руб.		
Степень риска	Очень низкий	До 10000
	Низкий	От 10000 до 25000
	Средний	От 25000 до 100000
	Высокий	От 100000 до 1000000
	Очень высокий	Свыше 1000000

Результаты, приведенные в табл. 6, свидетельствуют о том, что в большинстве случаев для судовладельца будут недопустимыми экономические риски, связанные с аварией, серьезной аварией и катастрофой при условии их очень высокой вероятности возникновения для одного судна в год. Если принять стоимость системы мониторинга, равной 250 тыс. руб. (это установлено авторами по итогам выполнения гранта «Старт-1» [4], предоставленного «Фондом содействия инновациям» в 2021 г.), то экономическая выгода для судовладельца от ее установки очевидна уже при риске возникновения аварии (при условии ее высокой вероятности). Однако при оценке тяжести последствий в табл. 6 не рассмотрен ущерб от воздействия на людей и окружающую среду. Также ущерб может быть в разных случаях неоднозначным, что подразумевает учет данной неоднозначности при определении риска. Поэтому следует выполнить дополнительную оценку рисков при помощи методики, предложенной в работах [1], [5], [6].

Универсальный подход для оценки ущерба при наступлении аварийной ситуации предполагается как при формализованной оценке безопасности, так и в программе Condition Assessment Program для комплексной оценки фактического состояния судна, рекомендованной ведущими классификационными обществами, включая РС [7], что позволяет избежать ошибок при построении матрицы рисков. Оценка возможного ущерба от возникновения аварийной ситуации C может быть выполнена по формуле

$$C = C_0 \cdot 10^{-(S_{\max} - S)}, \quad (2)$$

где S_{\max} — максимальное значение степени ущерба;

S — степень ущерба, определенная при помощи экспертной оценки по результатам расследования.

В работе [1] приведена таблица, которая объединяет качественное описание развития аварийных ситуаций и их последствий со степенью ущерба S . Используя данные, полученные в рассматриваемой работе, была составлена таблица степени ущерба в зависимости от тяжести последствий применительно к тем аварийным ситуациям, которые могут произойти в результате развития крутильных колебаний (табл. 7). При этом в ней не рассматриваются события нулевого ранга при $R_s = 0$ и такие ситуации, как пожар, трещины в корпусе судна и другие, напрямую не зависящие от развития крутильных колебаний.

Таблица 7

Номер ранга R_s и степень ущерба S в зависимости от тяжести последствий аварийных ситуаций

R_s	Масштаб последствий	Последствия	Средние, S_{cp}	Минимальные, S_1	Максимальные, S_2
1	Незначительный	Незначительное ухудшение характеристик управления или допустимых условий эксплуатации	1,22	0,5	1,5
2		Умеренные повреждения без утраты мореходных качеств; кратковременная потеря мореходных качеств с проведением аварийно-ремонтных работ силами экипажа или нахождение на мели 24 ч; умеренные повреждения лопастей гребного винта	2,14	1,5	2,5
3	Значительный	Потеря хотя бы одного мореходного качества или посадка на мель на срок свыше 24 ч; существенное ухудшение эксплуатационных характеристик и характеристик управления, позволяющих закончить рейс; облом лопасти гребного винта; отказ ГД или редуктора в МДК из двух и более ГД; отказ валопровода и винторулевого комплекса двух и более вальной движительной установки	3,13	2,5	3,6
4		Необходимость буксировки; поступление воды с сохранением плавучести судна	4,33	3,6	4,87
5	Опасный	Повреждение судна, повлекшее гибель людей; значительные повреждения, создающие угрозу безопасности судна; затопление машинного отделения с сохранением плавучести	5,10	4,87	5,32
6	Катастрофический	Гибель судна, единичные смерти, загрязнение окружающей среды	5,8	5,32	6,27
7	Катастрофический	Гибель судна и людей; серьезный экологический ущерб	6,47	6,27	6,81

При использовании данных табл. 6 и 7 была получена матрица при средней степени ущерба S_{cp} для каждого уровня последствий аварийной ситуации (табл. 8). Как видно из таблицы, в большинстве случаев для владельца буксира типа «ОТ» будут недопустимыми экономические риски, связанные со всеми уровнями последствий при условии их высокой и очень высокой вероятности

возникновения для одного судна в год. Если (как отмечалось ранее) ориентировочная стоимость системы мониторинга составляет 250 тыс. руб., то ее экономическая выгода для судовладельца очевидна уже при риске возникновения любого уровня последствий при условии их очень высокой вероятности возникновения.

Таблица 8

Матрица рисков при средней степени ущерба S_{cp} буксира типа «ОТ»

5	Очень высокая	Вероятность события	0,1	1312018,7	1091289,6	847110,4	721007,9	1506399,0	847110,4	1142720,5
4	Высокая		0,01	131201,9	109129,0	84711,0	72100,8	150639,9	84711,0	114272,0
3	Средняя		0,001	13120,2	10912,9	8471,1	7210,1	15064,0	8471,1	11427,2
2	Низкая		0,0001	1312,0	1091,3	847,1	721,0	1506,4	847,1	1142,7
1	Очень низкая		0,00001	131,2	109,1	84,7	72,1	150,6	84,7	114,3
				13120187	10912895,8	8471104	7210079	15063990	8471104	11427205
				Уровень (масштаб) последствий						
				1	2	3	4	5	6	7
Двухмерная матрица рисков для буксира типа «ОТ» по семиранговой классификации				Незначительный 1	Незначительный 2	Значительный 3	Значительный 4	Опасный	Катастрофический 6	Катастрофический 7

Как отмечалось в работе [1], защитные меры (в данном случае — предупредительные меры в виде системы мониторинга) могут сместить распределение тяжести последствий в область низких значений степени ущерба S . Если рассмотреть использование в качестве защитной меры от риска потери хода и управляемости судна применение двухвальной установки, то, согласно данным [5], степень ущерба для отказов отдельных элементов МДК будет определяться в соответствии с табл. 9, из которой видно, что подобная защитная мера позволяет в среднем снизить степень ущерба на 0,835.

Таблица 9

Сравнение степени ущерба при потере хода и управляемости для одновального и двухвального судна

Наименование отказа	Степень ущерба S	Снижение степени ущерба защитной мерой ΔS
Отказ среднеоборотного ГД в МДК из одного ГД	4,503	0,857
Отказ среднеоборотного ГД в МДК из двух и более ГД	3,646	
Отказ редуктора в МДК из одного ГД	4,046	0,815
Отказ редуктора в МДК из двух и более ГД	3,231	
Отказ валопровода с одной линией вала	4,029	0,834
Отказ валопровода с двумя и более линиями вала	3,195	
	Среднее	0,835

Определение снижения степени ущерба S при использовании системы мониторинга крутильных колебаний является весьма сложной задачей и фактически требует серьезных исследований на основе статистики и математического моделирования, поскольку для разных видов масштабов последствий это снижение будет разным. Конечно, можно принять, что установка системы мониторинга в идеале приведет к переходу от средней величины степени ущерба к минимальной, но это не всегда будет возможно в реальных условиях. Если, например, принять, что система мониторинга

позволит снизить даже на 0,01 среднюю степень ущерба S_{cp} , то применительно к буксиру «ОТ» можно получить табл. 10, в которой отмечается снижение возможного ущерба при мониторинге крутильных колебаний.

Таблица 10

**Снижение величины возможного ущерба
при установке системы мониторинга крутильных колебаний**

Ранг	Масштаб последствий	S_{max}	S_{cp}	$S_{без}$	$S_{сист}$	Возможный ущерб		Снижение ущерба при установке системы, млн руб.
						Без системы, млн руб.	С системой, млн руб.	
1	Незначительный	1,5	1,22	1,22	1,21	13,12	12,822	0,299
2	Незначительный	2,5	2,14	2,14	2,13	10,91	10,664	0,248
3	Значительный	3,6	3,13	3,13	3,12	8,47	8,278	0,193
4	Значительный	4,87	4,33	4,33	4,32	7,21	7,046	0,164
5	Опасный	5,32	5,1	5,1	5,09	15,06	14,721	0,343
6	Катастрофический	6,27	5,8	5,8	5,79	8,47	8,278	0,193
7	Катастрофический	6,81	6,47	6,47	6,46	11,43	11,167	0,260

Полученная экономия свидетельствует об одном уровне ее величины с указанной ориентировочной стоимостью системы мониторинга крутильных колебаний, равной 250 тыс. руб. для опасных ситуаций, имеющих ранги 1, 2, 5 и 7. Однако, на наш взгляд, система мониторинга крутильных колебаний как предупреждающая мера может приводить не только к снижению уровня последствий, но и к снижению частоты возникновения аварий.

Обсуждение (Discussion)

Матрица рисков, согласно рекомендациям ИМО и DNV, относится в большей степени к качественной, чем к количественной оценке рисков. Кроме того, рекомендованные ИМО вероятности событий могут отличаться от реальных статистических данных для каждого типа судов и каждого типа аварийной ситуации. Это требует проведения дальнейших исследований в указанной области с имитационным моделированием и анализом дерева неисправностей. При проведении дальнейших исследований планируется применение не только теории марковских случайных процессов, но других методов моделирования, в том числе на основе реальных статистических данных аварий от крутильных колебаний.

Отдельным направлением исследований является анализ рисков аварий от крутильных колебаний для пассажирских судов, так как в этом случае количественным показателем риска будут являться не экономические потери, а человеческие жизни. В то же время полученные результаты проведенного исследования свидетельствуют об экономической целесообразности установок систем мониторинга для буксиров типа «ОТ» даже при средней тяжести последствий аварий от развития опасных крутильных колебаний и частоте событий, приведенных в рекомендациях ИМО. В реальных условиях частота событий может быть выше, что также снизит экономические потери судовладельца при установке системы мониторинга крутильных колебаний. Кроме того, установка системы мониторинга способствует снижению рисков отказов силиконовых и пружинных демпферов в период между процедурами оценки их технического состояния, что подробно рассмотрено в исследовании [8]. При этом будет учитываться риск возникновения как постепенных, так и внезапных отказов демпферов, опасность которых рассмотрена и обоснована в работе Л. В. Ефремова [9]. В конечном итоге установка системы мониторинга позволяет перейти к разработке «цифрового двойника» демпфера крутильных колебаний и возможности оценки его технического состояния в режиме реального времени [10], [11].

Выводы (Summary)

На основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установка систем мониторинга крутильных колебаний судовых МДК может быть научно обоснована.

2. Качественный анализ для предварительной оценки целесообразности установки системы мониторинга может быть выполнен при помощи базового метода матрицы рисков с предложенной конкретизацией по количественным показателям.

3. Факты сохраняющихся поломок элементов судовых МДК от крутильных колебаний свидетельствуют об их опасности и серьезных экономических потерях судовладельцев.

4. Применение существующего метода оценки технического состояния и назначения остаточного ресурса демпферов крутильных колебаний не дает полной гарантии сохранения его работоспособности и отсутствия опасного роста крутильных колебаний в межинспекционный период.

5. Использование метода оценки ущерба может быть более эффективным по сравнению с методом оценки рисков по точности прогнозирования возникновения аварий и расчета возможных экономических потерь.

6. Для буксиров типа «ОТ» установка систем мониторинга крутильных колебаний целесообразна, так как может снизить риски возникновения аварий МДК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов М. Д. Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3–4 (22–23). — С. 40–45.

2. Гаврилов В. В. Выявления опасностей объектов водного транспорта методом формализованной оценки безопасности / В. В. Гаврилов, Д. С. Семионичев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 124–131.

3. Егоров Г. В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории рисков / Г. В. Егоров. — СПб.: Судостроение, 2008. — 384 с.

4. Покусаев М. Н. Результаты разработки и испытания прототипа системы мониторинга крутильных колебаний судовых валопроводов в рамках реализации научного гранта «СТАРТ-1» / М. Н. Покусаев, К. О. Сибряев, М. М. Горбачев // 66-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета: материалы конференции. — Астрахань: Астраханский гос. технический ун-т, 2022. — С. 466–468.

5. Емельянов М. Д. Критичные элементы морских судов (в порядке обсуждения) / М. Д. Емельянов // Судостроение. — 2008. — № 6 (781). — С. 16–22.

6. Емельянов М. Д. Безопасность морского транспорта России / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 2 (15). — С. 38–43.

7. Евенков В. И. Методологические основы обеспечения безопасной и рентабельной эксплуатации судов старше 15 лет на базе процедуры РС САР / В. И. Евенков, Г. В. Егоров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2002. — № 25. — С. 17.

8. Сибряев К. О. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания / К. О. Сибряев, М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев, А. Д. Ибадуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 1. — С. 35–41. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41.

9. Ефремов Л. В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с.

10. Pokusaev M., Gorbachev M., Sibryaev K., Ibadullaev A. “Problems of diagnostics of technical condition of torsional vibration dampers of modern marine diesel engines.” *Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies*, 2023, no. 2 (2), pp. 137-145.

11. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N., Rudenko M. F. “Development of a digital twin of a marine diesel engine torsional vibration damper using a monitoring system.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2023. № 4. С. 62–71.

REFERENCES

1. Emelyanov, M.D. "Use of conventional risks in estimation of security of seaborne ships." *Transport of the Russian Federation* 3–4(22–23) (2009): 40–45.
2. Gavrilov, V.V., and D. S. Semionichev. "Revelation of hazards of the water transport facilities by the formal safety assessment." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2012): 124–131.
3. Egorov, G. V. *Proektirovanie sudov ogranichennykh raionov plavaniya na osnovanii teoriiya riskov*. SPb.: Sudostroenie, 2008.
4. Pokusaev, M.N., K. O. Sibryaev, and M. M. Gorbachev. "Rezul'taty razrabotki i ispytaniya prototipa sistemy monitoringa krutil'nykh kolebaniy sudovykh valoprovodov v ramkakh realizatsii nauchnogo granta «START-1»." *66-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Materialy konferentsii*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. 466–468.
5. Emelyanov, M.D. "Critical elements of sea crafts." *Shipbuilding* 6(781) (2008): 16–22.
6. Emel'yanov, M.D. "Bezopasnost' morskogo transporta Rossii." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 2(15) (2008): 38–43.
7. Evenko, V. I., and G. V. Egorov. "Metodologicheskie osnovy obespecheniya bezopasnoi i rentabel'noi ekspluatatsii sudov starshe 15 let na baze protsedury RS SAR." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 25 (2002): 17.
8. Sibryaev, K. O., M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev, and A. D. Ibadullaev. "Efficiency of mechanical dampers of torsional vibration of marine internal combustion engines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2022): 35–41. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41.
9. Efremov L. V. "Teoriia i praktika issledovaniy krutil'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technology]." Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2007. 276 p.
10. Pokusaev M., Gorbachev M., Sibryaev K., Ibadullaev A. "Problems of diagnostics of technical condition of torsional vibration dampers of modern marine diesel engines." *Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies*, 2023, no. 2 (2), pp. 137-145.
11. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N., Rudenko M. F. "Development of a digital twin of a marine diesel engine torsional vibration damper using a monitoring system." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2023;4:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-4-62-71>. EDN LDLHFQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Покусаев Михаил Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: evt2006@rambler.ru
Горбачев Максим Михайлович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: max9999_9@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pokusaev, Mikhail N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: evt2006@rambler.ru
Gorbachev, Maksim M. —
PhD
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: max9999_9@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2023 г.
Received: February 14, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-121-133

FEATURES OF CALCULATING THE STRENGTH OF GANTRY AND SHIP CRANES GEAR UNITS IN THE PROBABILISTIC ASPECT

E. V. Matveeva, A. K. Afanasyev, A. N. Ivanov

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

The performed study is the result of collecting statistical data on failures of port transshipment and floating cranes. It is found that many accidents of components and parts of crane mechanisms can be associated with an erroneous determination of design loads. In order to increase the strength reliability, numerous field tests were carried out in river and sea ports under various modes of transshipment for different types of cargo. Tests have shown that operational loads are random in nature, and their laws of distribution over time of individual crane mechanisms can be approximated by truncated normal Gauss laws, accounting for which at the stage of new design developments, as shown by the practice of performing strength fatigue calculations, is not possible. In the article, in order to use the obtained laws at the design stage, it is proposed to replace the representation of operational loads with initial moments that are common to the entire crane mechanism, and transfer individual characteristics consideration such as stress concentration coefficients, fatigue curve parameters, operating time or test base, to subsequent stages of machine components development. For practical testing of the operational loads representation by the normal Gauss laws, a critical analysis of their initial moments, which makes it possible to identify inconsistencies in the representations of variable loads proposed for strength calculation, is given. For the corrected truncated normal load distribution law, the initial moments, the value of the order of which corresponds to the formulas structure used in calculating fatigue resistance at variable load amplitudes (in particular, under alternating loading modes), are determined. The presentation of corrected normal distribution laws with initial moments complements the normative documents used in practice when performing strength calculations under variable loading conditions, significantly simplifies calculations and makes it possible to take it into account at the stage of new design developments in accordance with the formulas established in the current normative documents.

Keywords: operating mode, calculated load combinations, load diagrams, load distribution laws, truncation coefficient, initial moments.

For citation:

Matveeva, Elena V., Andrey K. Afanasyev, and Anatoly N. Ivanov. "Features of calculating the strength of gantry and ship cranes gear units in the probabilistic aspect." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 121–133. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-121-133.

УДК 621.873.019.3

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ УЗЛОВ РЕДУКТОРОВ ПОРТАЛЬНЫХ И СУДОВЫХ КРАНОВ В ВЕРОЯТНОСТНОМ АСПЕКТЕ

Е. В. Матвеева, А. К. Афанасьев, А. Н. Иванов

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

Выполненное исследование является результатом сбора статистических данных по отказам порталных перегрузочных и плавучих кранов. Установлено, что многие аварии узлов и деталей крановых механизмов могут быть связаны с ошибочным определением расчетных нагрузок. С целью повышения прочностной надежности в речных и морских портах были проведены многочисленные натурные испытания при различных режимах перегрузки разных видов грузов. Испытания показали, что эксплуатационные нагрузки носят случайный характер, а их законы распределения во времени отдельных крановых механизмов могут быть аппроксимированы усеченными нормальными законами Гаусса, учет которых на стадии новых конструкторских разработок, как показала практика выполнения прочностных усталостных расчетов, не является

возможным. В статье с целью использования на стадии проектирования полученных законов предложено представление эксплуатационных нагрузок заменить начальными моментами, которые являются общими для всего механизма крана, а учет индивидуальных особенностей, таких как коэффициенты концентрации напряжений, параметры кривой усталости, наработка или база испытаний, перенести на последующие этапы разработки узлов машины. Для практической апробации представления эксплуатационных нагрузок нормальными законами Гаусса выполнен критический анализ их начальных моментов, который позволил выявить несоответствия в представлениях переменных нагрузок, предлагаемых для расчета на выносливость. Для откорректированного усеченного закона нормального распределения нагрузок определены начальные моменты, значение порядка которых соответствует структуре формул, используемых в расчете на сопротивление усталости при переменных амплитудах нагрузок (в частности, при переменных режимах нагружения). Представление откорректированных нормальных законов распределения начальными моментами дополняет нормативные документы, используемые на практике в процессе выполнения расчета на выносливость при переменных режимах нагружения, существенно упрощает расчеты и делает возможным его учет на стадии новых конструкторских разработок в соответствии с формулами, установленными в действующих нормативных документах.

Ключевые слова: режим работы, расчетные сочетания нагрузок, нагрузочные диаграммы, законы распределения нагрузок, коэффициент усеченности, начальные моменты.

Для цитирования:

Матвеева Е. В. Особенности расчета прочности узлов редукторов порталных и судовых кранов в вероятностном аспекте / Е. В. Матвеева, А. К. Афанасьев, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 121–133. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-121-133.

Введение (Introduction)

Выполненные работниками кафедры подъемно-транспортных машин ЛИВТа (ныне ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) исследования, показали, что распределения нагрузок в механизмах порталных, судовых и плавучих кранов достаточно близки друг к другу. В результате сбора статистических данных по отказам кранов исследуемого типа было установлено, что многие аварии узлов и деталей крановых механизмов связаны с ошибочным определением расчетных нагрузок. Это объясняется тем, что силовой процесс в деталях и узлах механизмов порталных и судовых кранов, в частности по технологическим причинам, изменяется в широких пределах. Для расчета прочности нагруженность подобных крановых механизмов задается максимальной нагрузкой и характеристиками спектра относительных нагрузок. Учитывая случайный характер нагрузок, действующих в узлах подобных машин, обе эти величины рассматривают в вероятностном аспекте.

Ввиду отсутствия точных сведений о вероятностных эксплуатационных нагрузках для конкретного типа машин при наличии непрерывных спектров нагрузок и характеристик, используемых, в соответствии со структурой формул расчета на прочность, для учета случайного процесса нагруженности применяются различные способы и условные спектры нагрузок. Последние дают приближенное представление о характеристиках нагруженности и поэтому способность конструкций выполнять свои функции в течение заданного периода времени без разрушений устанавливаются с малой долей вероятности.

В статье исследованы изменения в подходе к оценке прочностной надежности деталей и узлов механизмов порталных, плавучих и судовых кранов в условиях нерегулярной нагруженности на базе использования материалов многочисленных натурных испытаний, выполненных в речных и морских портах в различных условиях эксплуатации и перегрузки различных видов грузов. Выполнен анализ спектра эксплуатационных нагрузок машин исследуемого типа, который показал необходимость корректировки законов, принятых к использованию. Для откорректированных усеченных законов нормального распределения нагрузок определены начальные моменты, значение порядка которых соответствует структуре формул, используемых в расчете на сопротивление усталости при переменных амплитудах нагрузок, в частности при переменных режимах нагружения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Многочисленные наблюдения за работой редукторов показали, что данные механизмы выходят из строя в основном вследствие разрушения поверхностного слоя и реже — поломок зубьев, а также в редукторах нового поколения наблюдаются отказы подшипниковых опор. Причиной отказа часто являются *технологические дефекты* [1], которыми, естественно, не исчерпывается их полный перечень. Например, в механизме подъема судового крана КЭ39-2 ОМ1 (рис. 1, а) в результате проведенного исследования прогрессивное выкрашивание зубьев колес (рис. 1, б) редуктора РСС-1050В является следствием ошибочного задания как максимальной нагрузки, так и характеристик спектра относительных нагрузок ввиду больших контактных напряжений. Проявились также и технологические дефекты, о чем свидетельствует наличие на нерабочей стороне следов контакта из-за малого бокового зазора (рис. 1, в). Известно также, что без учета таких важных факторов, как максимальная нагрузка и спектр нагрузок, невозможно достоверно оценить остаточный ресурс редуктора в целях своевременного проведения обследования и диагностики узлов крана [2]–[4].

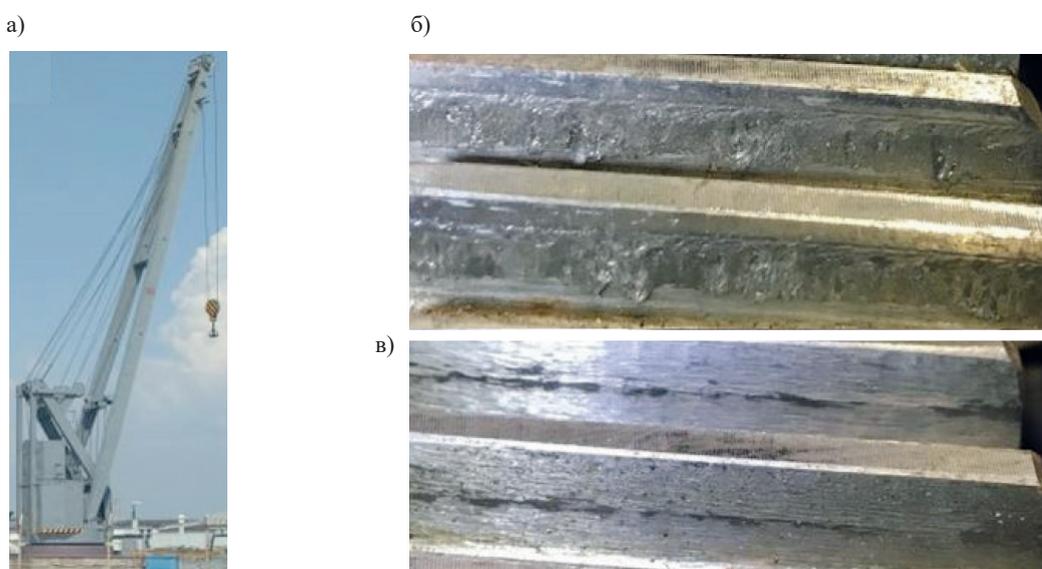


Рис. 1. Конструкция крана (а), прогрессирующее выкрашивание в сочетании со схватыванием (б); дефекты на нерабочей стороне вследствие ошибок изготовления (в)

Традиционно расчет деталей и узлов перегрузочной техники, работающей в условиях нестационарной нагруженности, выполняют по *расчетным сочетаниям нагрузок*¹ [5], [6], принципы формирования которых определены также ГОСТом 32579.1–2013². Следует отметить, что в настоящее время стандарт не отражает положений ГОСТа 34017–2016³ в части установления группы классификации режимов работы механизмов. Поэтому необходимый учет переменности нагружения узлов крана выполняется в силу объективных причин разными способами.

I расчетный случай — это расчет по нормальным нагрузкам рабочего состояния и работа с грузами, массы которых соответствуют технологическому процессу при плавных пусках и торможениях механизма (детали вращения, испытывающие циклические напряжения, рассчитывают на выносливость, подшипники качения — на долговечность).

II расчетный случай — расчет по максимальным нагрузкам рабочего состояния, которые могут возникать при работе в наиболее тяжелых условиях эксплуатации крана с номинальным грузом при резких пусках и торможениях механизма (при максимальных нагрузках производится проверка деталей на статическую прочность).

¹ Справочник по кранам / Под ред. А. И. Дукельского. М.; Л.: Машиностроение, 1971. Т. 1. 399 с.

² ГОСТ 32579. 1–2013. Краны грузоподъемные принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 1: Общие положения. М.: Стандартинформ, 2015.

³ ГОСТ 34017–2016. Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы. М.: Стандартинформ, 2017.

III расчетный случай — расчет по максимальным нагрузкам нерабочего состояния. Для систематизации переменных нагрузок установлен перечень расчетных комбинаций, соответствующий определенным типичным ситуациям, возникающим в процессе эксплуатации машины определенного типа. К сожалению, способ расчетных сочетаний нагрузок не устанавливает нормативные параметры, характеризующие интенсивность режима эксплуатации машины.

Определенное место в проектировании порталных и судовых кранов и крановых механизмов получили режимы эксплуатации, регламентированные российскими и международными нормами: ГОСТом 34017–2016 и стандартом ISO 4301/1. В соответствии с указанными нормами группу режима работы механизма определяет сочетание *класса использования* ($T_0 — T_9$) в течение нормативного срока службы машины, характеризуемого потребным ресурсом в часах, и *режима нагружения* ($L1 — L4$), характеристикой которого является *коэффициент распределения нагрузок* [6], [7]:

$$K_3 = \sum \left[\frac{t_i}{t_T} \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где t_i — средняя продолжительность использования механизма с нагрузкой R_i ;

t_T — общая продолжительность работы привода в течение срока службы.

В указанных нормах представлены также типовые графики эксплуатационной загруженности (рис. 2), за максимальную нагрузку принята номинальная: $R_{\max} = R_{\text{ном}}$, обозначенная на рис. 2 как 100 %.

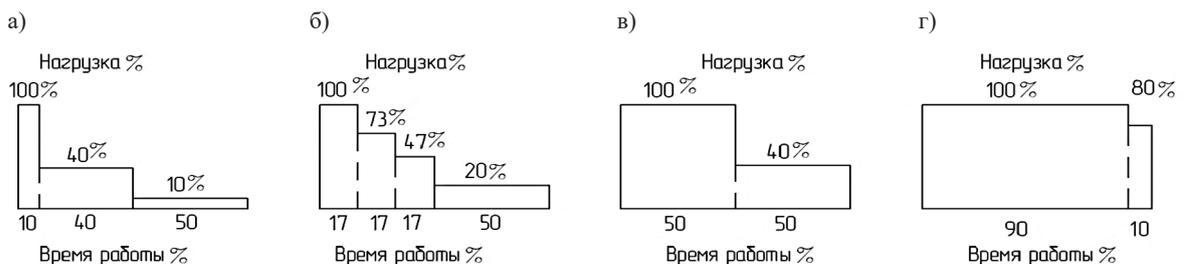


Рис. 2. Типовые графики эксплуатационной загруженности механизма:
а — легкий L1; б — средний L2; в — тяжелый L3; г — весьма тяжелый L4

Установив класс использования, например, T6 (число часов работы за срок службы до 12500 ч) и класс нагружения, например, L2 (коэффициент распределения нагрузки больше 0,125, но не более 0,25), по табл. 1 устанавливают режим работы механизма — M6. В данном случае режим работы механизма запишется в виде M6 (L2, T6).

Таблица 1

Группы классификации механизмов по ГОСТу 34017–2016 (ISO 4301/1)

Номинальный коэффициент распределения нагрузки K_3 в зависимости от режима нагружения	Класс использования механизмов и число часов работы в течение срока службы									
	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
	До 200	До 400	До 800	До 1600	До 3200	До 6300	До 12500	До 25000	До 50000	До 100000
$K_3 < 0,125$ L1 — легкий	—	—	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
$0,125 < K_3 < 0,25$ L2 — умеренный	—	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
$0,25 < K_3 < 0,5$ L3 — тяжелый	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	—
$0,5 < K_3 < 1$ L4 — весьма тяжелый	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	—	—

Определенного ответа на вопрос, какой режим нагружения из табл. 1 характеризует механизмы данной конкретной перегрузочной машины, нет. Однако учитывая значительный имеющийся опыт эксплуатации в конкретных условиях применения порталных перегрузочных кранов, разработчики, например, классифицировали их режим нагружения следующим образом: крюковые грузоподъемностью до 50 т относят к классу М6(L2, T6), грейферные — к классу М8(L3, T7). Естественно, отнесение конкретной рабочей машины к тому или иному режиму работы является в известной мере условным, так как сохраняет долю субъективности как в связи с осреднением условий работы и непосредственно нагрузок, так и отсутствием достоверных сведений о вероятностных эксплуатационных нагрузках и их характеристиках для конкретной машины. Для редукторов установлены условные расчетные распределения, выполненные аналогично рис. 2 [8].

Расчет по нагрузочным диаграммам. Для удобства на диаграмме все нагрузки располагают в убывающем порядке либо в абсолютных (рис. 3, а), либо в относительных координатах (рис. 3, б, в). Данный способ расчета позволяет определить параметры, характеризующие интенсивность процесса нагружения привода¹ (см., например, [7]).

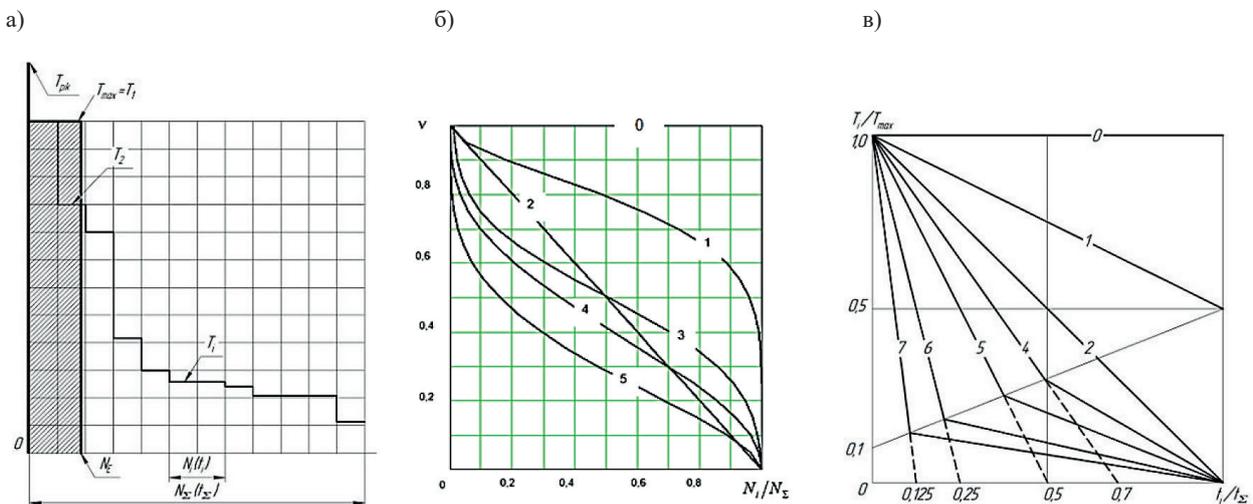


Рис. 3. Нагрузочные диаграммы:
 а — нестационарный ступенчатый режим нагружения;
 б — типовые режимы нагружения
 (0 — постоянный; 1 — тяжелый; 2 — средний равновероятный;
 3 — средний нормальный; 4 — легкий; 5 — особо легкий); в — типовые графики

Установлено, что режимы нагружения большинства реальных машин укладываются в типовые режимы, аппроксимированные одной из непрерывных функций (рис. 3, б), которые приведены в прил. 10 ГОСТа 21354–87² с указанием начальных моментов μ_k (табл. 2). Индекс $k = 1, 2, 3$ в обозначении соответствует порядку начального момента. Значения последних позволяют определить эквивалентное число циклов N_E (рис. 3, а) с помощью выражения

$$N_E = \mu_k N_{\Sigma}, \quad (2)$$

где N_{Σ} — суммарное число циклов нагружения за весь срок службы;

k — показатель степени ($k = m$, где m — показатель степени кривой усталости, если напряжения пропорциональны нагрузке, $k = 0,5m$ — в расчете по напряжениям в линейчатом контакте).

При данном подходе нерегулярный режим нагружения заменяется регулярным режимом нагружения с максимальной нагрузкой, действующей в течение эквивалентного числа циклов.

¹ Детали машин: учеб. для вузов / под ред. О. А. Ряховского. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 544 с.

² ГОСТ 21354–87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Изд. офиц. М.: Изд-во стандартов, 1988.

Значения коэффициентов, характеризующих типовой режим нагружения (ГОСТ 21354–87)

Номер режима на рис. 3, б	Режим нагружения	$\mu_3 / K_{д3}$	$\mu / K_{д6}$	$\mu / K_{д9}$
0	Постоянный	1,0/1	1,0/1	1,0/1
1	Тяжелый	0,5/0,8	0,3/0,82	0,200/0,84
2	Средний равновероятный	0,25/0,63	0,143/0,72	0,100/0,77
3	Средний нормальный	0,18/0,56	0,065/0,63	0,063/0,69
4	Легкий	0,125/0,5	0,038/0,58	0,016/0,63
5	Особо легкий	0,063/0,4	0,013/0,48	0,004/0,54

В табл. 2 не указан возможный типовой режим нагружения конкретной машины. В работе [9] отмечается, что режим 1 является характерным для горных машин, режим 3 — для первых валов коробок передач автомобилей, режим 4 — для универсальных металлорежущих станков, указаний на возможный режим нагружения перегрузочной машины нет. Типовой режим нагружения перегрузочной техники не характеризуют также и типовые графики схематизации процесса нагружения проф. Г. А. Снесарева, приведенные в ГОСТе 21354–87⁵, два из которых: 6-й и 7-й, не нашли в нем применения. Здесь процесс нагружения характеризуется коэффициентом $K_{д} = \sqrt[k]{\mu_k}$ (указан в табл. 2 в графе $\mu / K_{д6}$), посредством которого определяют эквивалентную нагрузку, используя выражение

$$T_E = T_{\max} K_{д}^m \sqrt[m]{N_{\Sigma} / N_{\lim}} \leq T_{\max}, \quad (3)$$

где T_{\max} — максимальная нагрузка спектра;

N_{\lim} — базовое число циклов;

T_E — постоянная нагрузка, эквивалентная по усталостному повреждению спектру рассматриваемой нагрузочной диаграммы.

Графики аппроксимированы прямыми наклонными линиями, которые позволяют реальный график работы машины просто соотносить с типовым, но в то же самое время усложняют расчет значений коэффициентов, характеризующих типовой режим нагружения. Для облегчения расчета коэффициентов дополнительно предложена серия специальных графиков нагрузки, эквивалентных типовым графикам по значению коэффициента μ_3 . При иных показателях степени эквивалентность графиков не подтверждена.

Более достоверным способом оценки условий нерегулярной нагруженности работы узлов машины является *вероятностный подход к определению нагрузок*. Учитывая важность характера и величин нагрузок для подъемно-транспортных машин, научными работниками Ленинградского института водного транспорта (ныне ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова), под руководством проф. В. И. Брауде, в течение многих лет проводилось изучение режимов работы механизмов порталных и плавучих кранов. В результате многочисленных натурных испытаний в речных и морских портах при различных режимах эксплуатации и перегрузки различных видов грузов кафедрой подъемно-транспортных машин вуза были получены законы распределения нагрузок во времени для кранов указанного вида.

Натурные тензометрические испытания показали, что эксплуатационные нагрузки порталных перегрузочных кранов носят случайный характер, а законы нагружения отдельных крановых механизмов могут быть описаны законом Гаусса [10], [11]. В частности, в механизме подъема имеет место усеченный нормальный закон распределения приведенных к симметричному циклу нагрузок. Этот двухпараметрический закон с математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением нагрузки в усредненном виде представлен уравнением [12]:

$$f(v_i) = \frac{3,2}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{v_i - 0,44}{0,35} \right)^2 \right\}. \quad (4)$$

Нагрузки механизма поворота и изменения вылета стрелы, как показали натурные тензометрические испытания, хорошо описываются усеченным нормальным законом с математическим ожиданием равным нулю. В этом случае данный закон является однопараметрическим усеченным нормальным законом с функцией плотности распределения:

$$f(v_i) = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \cdot v_\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v_i}{v_\sigma}\right)^2\right\}, \quad (5)$$

где $v_i = T_i/T_{\max}$ — относительная случайная нагрузка;

T_{\max} — максимальная (расчетная) нагрузка на механизм перегрузочного крана;

$v_\sigma = \sigma_s/T_{\max}$ — относительное значение среднеквадратического отклонения нагрузки, которое для механизма поворота $v_\sigma = 0,3$, для механизма вылета $v_\sigma = 0,2$;

σ_s — среднеквадратическое отклонение нагрузки.

В отличие от норм ISO 4301/1, в которых за максимальную нагрузку принята номинальная, в функции (5) в максимальную включены внешние динамические нагрузки. В механизме поворота максимальная расчетная нагрузка определена формулой

$$T_{\max} = 2\left[(M_{\text{п}} + M_{\text{тр}})I_{\text{п}}\beta/(I_1 + I_{\text{п}})\right] - M_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{тр}}$ — приведенный момент трения в опорно-поворотном устройстве;

$M_{\text{п}}$ — среднепусковой момент двигателя;

$I_{\text{п}}$ — момент инерции поворотной части;

I_1 — момент инерции ротора двигателя;

β — коэффициент затухания упругих колебаний.

В механизме изменения вылета стрелы максимальная расчетная нагрузка определяется следующим образом:

$$T_{\max} = 2(M_{\text{т}} + M_{\text{с}})\frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{м}} + I_{\text{с}}}\beta_v \sin\frac{\pi t_{\text{т}}}{\tau} + 2\beta_v(M_{\text{п}} - M_{\text{с}})\frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{м}} + I_{\text{с}}} + M_{\text{с}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{т}}$ — тормозной момент;

$M_{\text{с}}$ — неуравновешенный момент;

$t_{\text{т}}, \tau$ — соответственно время торможения и период собственных колебаний;

$I_{\text{с}}$ — момент инерции стрелы на среднем вылете;

$I_{\text{м}}$ — приведенный момент инерции механизма;

β_v — коэффициент затухания упругих колебаний.

Значения коэффициентов затухания упругих колебаний приведены в Справочнике по кранам и в издании [13].

В дальнейшем для вновь проектируемых кранов законы распределения были перестроены в относительной системе координат с использованием ранее полученных законов плотности $f(v_i)$. Значения относительных математических ожиданий и средних квадратичных отклонений текущих значений ординат процессов нагружения, используемых для расчета валов на изгиб, зубчатых передач и подшипников, а также характеристик процессов нагружения, систематизированных по экстремумам, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики процессов нагружения

Механизмы	Текущие значения ординат			Систематизация по экстремумам		
	a	v_σ	c	$\langle v_\tau \rangle$	v_τ	c
Крюковой подъем	0,50	0,20	1,55	0,25	0,14	1,5
Грейферный подъем:	—	0,4	—	0,21	0,1	1,05
– поворота	—	0,3	—	—	0,24	—
– вылета	—	0,2	—	—	0,15	—

Примечания: 1. c — коэффициент усеченности нормального закона.

2. Параметр, указанный в скобках — значение относительного математического ожидания текущих значений координат процесса нагружения.

Для практического использования рассматриваемых законов распределения нагрузки в расчетах усталостной прочности металлоконструкций, подшипников качения, валов, зубчатых передач был предложен метод эквивалентной нагрузки (рис. 4, а):

$$T_E = \varphi_E T_{\max}$$

где φ_E — коэффициент эквивалентности, определяемый методом последовательных приближений (на что указывают пределы интегрирования).

Коэффициент эквивалентности рассчитывается по формуле

$$\varphi_E = \sqrt[m]{\frac{N}{a_1 N_{\lim} T_{\max}} \int_{T_E}^{T_{\max}} f(T_{\text{пр}})^m dT} \quad (8)$$

где N — расчетное число циклов нагружения детали;

a_1 — коэффициент повреждающих воздействий ниже предела выносливости;

$T_{\text{пр}}$ — значение нагрузки, приведенной к симметричному циклу;

m — показатель степени кривой усталости.

Для упрощения определения значения φ_E построены графики. В качестве примера на рис. 4, б показан график, определяющий коэффициент эквивалентности однопараметрических законов (см. табл. 3) при $m = 9$ [11].

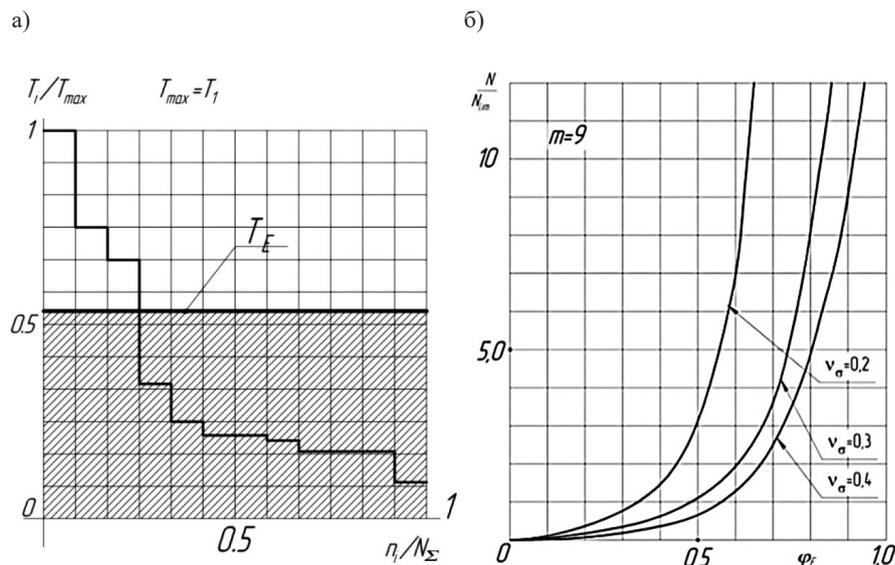


Рис. 4. Метод эквивалентной нагрузки:

а — замена нерегулярного режима нагружения постоянной нагрузкой;

б — графики для расчета коэффициента эквивалентности

Как видно из формулы (8), коэффициент эквивалентности находится в зависимости не только от параметров функции плотности распределения, общей для всего механизма машины, но и от индивидуальных параметров кривой усталости, которые являются разными для каждой детали механизма. В частности, согласно использованию методики, $N_{\lim} = 2 \cdot 10^6$ при коэффициенте концентрации напряжений $K < 2$ и $N_{\lim} = 5 \cdot 10^6$ при $K \geq 2$ (при расчете металлоконструкций) можно принимать $K_m = 12$; для механических деталей в среднем можно $m = 8-9$, $N_{\lim} = 10 \cdot 10^6$. При расчете контактной выносливости зубчатых передач $N_{\lim} = 20 \cdot 10^6$, $m = 6$ [10] следует отметить, что в настоящее время указанные параметры имеют иные значения: $N_{\lim} = 30\text{HB}^{2.4}$, $m = 6$ или $m = 20$, в зависимости от отношения N / N_{\lim} . При разработке редукторов нового поколения имеют в виду, что их нагрузочная способность определяется не только контактной выносливостью зубчатых передач, но и в большей мере долговечностью подшипников качения в опорах валов [14].

Установка индивидуальных параметров кривой усталости, различных для металлоконструкций и каждой детали механизма, на стадии разработки конструкций, не представляется возможным. Поэтому расчет на выносливость по эксплуатационным нагрузкам, являясь проверочным, не используется в проектно-конструкторских бюро, занимающихся разработкой приводов новых порталных и судовых кранов.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для устранения отмеченного ранее недостатка предложено изменить методику расчета, положив в основу представления эксплуатационных нагрузок начальными моментами, которые являются общими для всего механизма крана, а учет наработки или базы испытаний, параметров кривой усталости и коэффициентов концентрации напряжений перенести на последующие этапы разработки узлов машины. Для практической апробации представленных функций (4) и (5) выполнен критический анализ их начальных моментов k -го порядка. Поскольку усеченное нормальное распределение получается из нормального при ограничении интервала изменения случайной величины, значения начальных моментов вычислялись при усечении плотности распределения с одной стороны (со стороны нуля).

Исследования показали, что имеются несоответствия в представлениях переменных нагрузок, используемых при расчете сопротивления усталости при переменных амплитудах нагрузок. Так, обращаясь к закону (4), выраженному через функцию плотности вероятности вида

$$f(v_i) = \frac{2}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{v_i - a}{\sigma_v} \right)^2 \right\}, \quad (9)$$

интегрированием которой по формуле

$$\mu_k = \int_0^{\infty} v^k f(v_i) dv, \quad (10)$$

при $a = 0,44$; $\sigma_v = 0,35$ получим для $k = 1, 2, 3, 6, 9$ следующие значения начальных моментов: $\mu_1 = 0,512$; $\mu_2 = 0,348$; $\mu_3 = 0,279$; $\mu_6 = 0,262$; $\mu_9 = 0,447$. При этом отмечается наличие неравенств $\mu_9 > \mu_6$, которое недопустимо.

Аналогично интегрированием функции (5) по формуле (10) получаем для порядка $k = 1, 2, 3, 6, 9$ следующие значения начальных моментов: $\mu_1 = 0,319$; $\mu_2 = 0,160$; $\mu_3 = 0,102$; $\mu_6 = 0,061$; $\mu_9 = 0,08$, где имеет место неравенство $\mu_9 > \mu_6$, которое также недопустимо.

Проведем верификацию законов распределения проверкой выполнения условия

$$\int_0^1 f(v_i) dv = 1, \quad (11)$$

поскольку величина нагрузки рассматривается относительно максимальной при усечении интервала переменной с двух сторон: со стороны нуля и единицы.

Для нагрузки с плотностью распределения, выраженной функцией (9), выявлена вероятность превышения нагрузкой максимума:

$$1 - \left(\int_0^1 f(v) dv \right) = 0,0582,$$

т. е. превышение значения 5,82 %, что недопустимо.

Значение коэффициента усеченности при $v_{\max} = 1$ определяется по формуле

$$c_1 = 1/\Phi(v_{\max}), \quad (12)$$

где $\Phi(v)$ — интегральная функция распределения.

Используя формулу (12), для функции (4) получим $c_1 = 1/\Phi(v_{\max}) = 1,062$. Преобразованная функция (4) примет вид

$$\Phi(v_i) = \frac{3,398}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{v_i - 0,44}{0,35} \right)^2 \right\}, \quad (13)$$

с начальными моментами, определенными по формуле $\mu_k = \int_0^1 v^k f(v) dv$ для $k = 1, 2, 3, 6, 9$. Соответственно $\mu_1 = 0,544$; $\mu_2 = 0,370$; $\mu_3 = 0,193$; $\mu_6 = 0,090$; $\mu_9 = 0,056$ (кривые 1 на рис. 5).

Интегральные графики непрерывных распределений в координатах ранжированного спектра показаны на рис. 5, а, где по оси ординат отложена нагрузка, а по оси абсцисс, соответственно, функция $I - \Phi(v_i)$, которая означает долю продолжительности действия нагрузки больше данной величины или соответствующую вероятность.

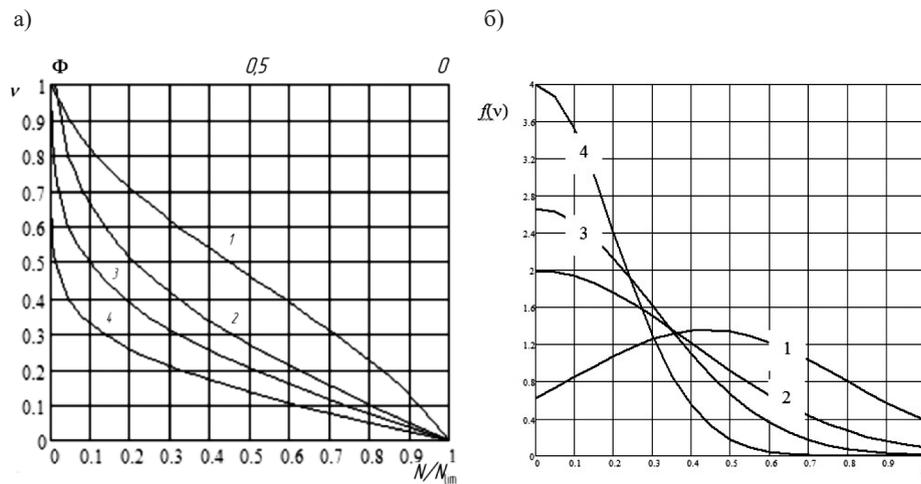


Рис. 5. Законы распределения нагрузок в крановых механизмах:
а — функция распределения; б — плотность распределения
(f — плотность распределения v ; Φ — функция распределения v)

Полученные значения при среднеквадратическом отклонении нагрузки, равном 0,35, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов, характеризующих режим нагружения механизмов порталных, плавучих и судовых кранов

Крановый механизм	Параметры распределения		$\mu / K_{ДЗ}$	$\mu_6 / K_{Д6}$	$\mu_9 / K_{Д9}$
	a	σ_v			
Подъема крюком	0,44	0,35	0,193/0,578	0,090/0,669	0,056/0,726
Подъема грейфером	0	0,4	0,085/0,440	0,03/0,557	0,017/0,636
Поворота	0	0,3	0,042/0,348	0,009/0,456	0,004/0,541
Изменения вылета	0	0,2	0,0128/0,234	0,001/0,316	0,00016/0,379

Аналогично для плотности распределения, выраженной функцией (5) при среднеквадратическом отклонении нагрузки, равном 0,4, вероятность превышения нагрузкой максимума составляет

$$1 - \left(\int_0^1 f(v) dv \right) = 0,012,$$

т. е. 1,2 %, что свидетельствует о неточности математической модели представления распределения нагрузок в механизмах поворота кранов.

Для исправления функции (5), интегральная функция распределения которой имеет вид

$$\Phi(v) = \frac{2}{\sqrt{2\pi} v_{\sigma}} \int_0^v \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v_i}{v_{\sigma}}\right)^2\right\}, \quad (14)$$

определим коэффициент усеченности при $v_{\max} = 1$ с использованием формулы (12). В результате найдем $C1 = 1/\Phi(v_{\max}) = 1,012576$. Преобразованную функцию (5) представим формулой

$$f(v_i) = \frac{C1}{\sqrt{2\pi} \cdot v_{\sigma}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v_i}{v_{\sigma}}\right)^2\right\}, \quad (15)$$

где $C1 = 2,0252$ — кривые 2 на рис. 5.

Проверка условия $\int_0^1 f(v)dv = 1$ показывает, что оно выполнено. Начальные моменты для функции (15), определенные по формуле $\mu_k = \int_0^1 v^k f(v_i)dv$ для $k = 3, 6, 9$, имеют значения: $\mu_3 = 0,0,085$; $\mu_6 = 0,0,03$; $\mu_9 = 0,017$ (см. табл. 4).

В результате выполнения аналогичных действий было получено $C1 = 2,0017$ при среднеквадратическом отклонении нагрузки, равном 0,3 (кривые 3 на рис. 5) и $C1 = 2$ (кривые 4 на рис. 5) при среднеквадратическом отклонении нагрузки, равном 0,2, — начальные моменты для данных представлений нагрузки также сведены в табл. 4. Полученные данные позволяют проводить учет переменных нагрузок на ранней стадии проектирования в соответствии с формулами, установленными в ГОСТе 21354–87.

Заключение (Conclusions)

В соответствии со структурой формул, используемых при расчете сопротивления усталости при переменных амплитудах нагрузок (в частности при переменных режимах) распределение нагрузок, обычно выраженных в долях от максимальной, после выполненной апробации их параметров задают начальными моментами, которые являются общими для механизма машины. Предложено также установление индивидуальных параметров кривой усталости, учет наработки или базы испытаний и коэффициентов концентрации напряжений перенести на последующие этапы разработки узлов машины. Это позволяет использовать усеченные законы нормального распределения, полученные для порталных, плавучих и судовых кранов на ранней стадии проектирования как в новых конструкторских разработках, так и при их реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров В. А. Технологические причины износа крупномодульных зубчатых передач / В. А. Сидоров, В. П. Цокур // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2023. — № 2 (81). — С. 45–50.
2. Хорешок А. А. Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния / А. А. Хорешок, А. В. Кудреватых, А. С. Ащеулов [и др.] // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 4. — С. 267–276. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-267-276.
3. Панасенко Н. Н. Экспертиза надежности зубчатых передач грузоподъемных кранов морских портов и транспортных терминалов / Н. Н. Панасенко, П. В. Яковлев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 1. — С. 105–118.
4. Токарев А. О. Отказы деталей машин. Анализ причин, техническая диагностика и профилактика / А. О. Токарев, И. Г. Мироненко. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. — 220 с.
5. Дукельский А. И. Портовые и судовые грузоподъемные машины / А. И. Дукельский. — Л.: Морской транспорт, 1960. — 511 с.

6. Соколов С. А. Строительная механика и металлические конструкции подъемно-транспортных машин / С. А. Соколов. — СПб.: Политехника, 2011. — 448 с.
7. Барышников С. О. Основы расчета и конструирования деталей машин крановых устройств: учеб. пособие / С. О. Барышников, А. Н. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 307 с.
8. Решетов Д. Н. Развитие теории расчета и конструирования деталей машин и требования к подготовке инженеров-механиков / Д. Н. Решетов // Сборник научно-методических статей по деталям машин. — 1977. — Вып. 2. — С. 3–12.
9. Кораблев А. И. Повышение нагрузочной способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов. — М.: Машиностроение, 1968. — 288 с.
10. Брауде В. И. Нагрузки порталных кранов / В. И. Брауде, Н. В. Звягинцев, Ю. В. Силиков // Труды ЛИВТ`а. — Л.: Транспорт, 1969. — Вып. 123. — С. 100–116.
11. Андрианов Е. Н. Эксплуатационные нагрузки порталных перегрузочных кранов / Е. Н. Андрианов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 4. — С. 9–16.
12. Андрианов Е. Н. Актуальные вопросы проектирования и расчета механизмов подъема порталных кранов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 52–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-2-52-60.
13. Григорьев Н. И. Нагрузки кранов / Н. И. Григорьев. — М. — Л.: Машиностроение, 1964. — 168 с.
14. Барышников С. О. Крановые и судовые редукторы и зубчатые передачи: учеб. пособие / С. О. Барышников, А. Н. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. — 344 с.

REFERENCES

1. Sidorov, V. A., and V. P. Tsokur. “Technological causes of wear of large-module gears.” *Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering* 2(81) (2023): 45–50.
2. Khoreshok, A. A., A. V. Kudrevatykh, A. S. Ashcheulov, A. V. Vinidiktov, and L. I. Kantovich. “Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing the monitoring of the actual technical condition.” *Mining Science and Technology (Russia)* 6.4 (2021): 267–276. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-267-276.
3. Panasenko, N. N., and P. V. Yakovlev. “Reliability examination transmission gears of lifting cranes in sea ports and transport terminals.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2019): 105–118. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-105-118.
4. Tokarev, A. O., and I. G. Mironenko. *Otkazy detalei mashin. Analiz prichin, tekhnicheskaya diagnostika i profilaktika*. Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020.
5. Dukel'skii, A. I. *Portovye i sudovye gruzopod'emnye mashiny*. L.: Morskoi transport, 1960.
6. Sokolov, S. A. *Stroitel'naya mekhanika i metallicheskie konstruksii pod'emno-transportnykh mashin*. SPb.: Politekhnik, 2011.
7. Baryshnikov, S. O., and A. N. Ivanov. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya detalei mashin kranovykh ustroystv: ucheb. posobie*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.
8. Reshetov, D. N. “Razvitie teorii rascheta i konstruirovaniya detalei mashin i trebovaniya k podgotovke inzhenerov-mekhanikov.” *Sbornik nauchno-metodicheskikh statei po detalyam mashin*. Vyp. 2. 1977. 3–12.
9. Korablev, A. I., and D. N. Reshetov. *Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti i dolgovechnosti zubchatykh peredach*. M.: Mashinostroenie, 1968.
10. Braude, V. I., N. V. Zvyagintsev, and Yu. V. Silikov. “Nagruzki portal'nykh kranov.” *Trudy LIVT`a*. Vol. 123. L.: Transport, 1969. 100–116.
11. Andrianov, E. N. “Workloads of gantry unloaders.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2009): 9–16.
12. Andrianov, E. N., and A. N. Ivanov. “Current issues of design and calculation of lifting cranes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 52–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-2-52-60.
13. Grigor'ev, N. I. *Nagruzki kranov*. M–L.: Mashinostroenie, 1964.
14. Baryshnikov, S. O., and A. N. Ivanov. *Kranovye i sudovye reduktory i zubchatye peredachi*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеева Елена Владимировна —

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

Афанасьев Андрей Константинович —

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

Иванов Анатолий Николаевич —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matveeva, Elena V. —

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

Afanasyev, Andrey K. —

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

Ivanov, Anatoly N. —

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

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 2023 г.
Received: November 26, 2023.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-134-140

FEATURES OF USING OZONE FOR CLEANING MARINE POLLUTION

V. I. Reshnyak, E. A. Negrutsa, E. P. Chikov

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

The subject of the research is issues related to the field of ship power plants and their elements, as well as the operation of water transport and its environmental safety. Studying the processes of ballast water purification and disinfection, as well as oil-containing water that are formed during the ships operation, shows the possibility of increasing the efficiency of these processes. It is proposed to consider these processes, starting from the stage of supplying the ozone-air mixture to the flow of treated water, without limiting ourselves to the study of the actual process of oxidation by ozone of a contaminated, including bacteriologically hazardous, substance. This approach makes it possible to establish the limiting stages of the contaminated water purification and disinfection process, which includes the stage of ozone dissolution in water during its transition from the ozone-air mixture, as well as the stage of subsequent diffusion of ozone dissolved in water into the reaction contact zone. It has been shown that the kinetic characteristics of the limiting stages depend on the conditions of their implementation, which can reduce the efficiency of ozone use due to the limited time of its existence. A technological proposal that makes it possible to increase the efficiency of ozone use and the reliability of ensuring the requirements for the quality of cleaning and disinfection of marine pollution has been developed. Technological proposals provide for the preliminary saturation with ozone of a specially allocated water stream for this purpose, the supply of this stream to the concentration zone of the oxidized and disinfected substance. A device in which the developed technological fragment, including a pump supplying a water flow to a contact column, an ozone generator, a device for supplying an ozone-saturated water flow to a filter, is implemented is also proposed.

Keywords: marine pollution, ballast water, oily water, ozone, purification and disinfection, technology, device.

For citation:

Reshnyak, Valery I., Evgenii A. Negrutsa, and Egor P. Chikov. "Features of using ozone for cleaning marine pollution." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 134–140. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-134-140.

УДК 656.62:504.054

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОНА ДЛЯ ОЧИСТКИ СУДОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

В. И. Решняк, Е. А. Негруца, Е. П. Чиков

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

Предметом исследования являются вопросы, относящиеся к области судовых энергетических установок и их элементов, а также эксплуатации водного транспорта и его экологической безопасности. Отмечается, что исследования процессов очистки и обеззараживания балластной и нефтесодержащей воды от вредных примесей, образующихся в процессе эксплуатации судов, показывают наличие возможности повышения эффективности этих процессов. Предложено рассматривать указанные процессы начиная со стадии подачи озono-воздушной смеси в поток обрабатываемой воды, не ограничиваясь исследованием собственно процесса окисления озонem загрязненной, в том числе бактериологически опасной субстанции. Такой подход позволил установить лимитирующие стадии процесса очистки и обеззаражи-

вания загрязненной воды, к которым можно отнести стадию растворения озона в воде при его переходе из озono-воздушной смеси, а также стадию последующей диффузии растворенного в воде озона в зону реакционного контакта. Приведены доказательства того, что кинетические характеристики лимитирующих стадий зависят от их условий, что может снижать эффективность использования озона вследствие ограниченного времени его существования. В процессе проведения данного исследования разработано технологическое предложение, позволяющее повысить эффективность использования озона и надежность обеспечения требований к качеству очистки и обеззараживания судовых загрязнений. Данное решение предусматривает предварительное насыщение озоном специально выделенного для этой цели потока воды и его подачу в зону концентрации окисляемой и обеззараживаемой субстанции. Рассмотрено устройство, позволяющее реализовать новое технологическое предложение, включающее насос, подающий поток воды в контактную колонну, и генератор озона для подачи насыщенного озоном потока воды в фильтр.

Ключевые слова: судовые загрязнения, балластная вода, нефтесодержащая вода, озон, очистка и обеззараживание, технология, устройство.

Для цитирования:

Решняк В. И. Особенности применения озона для очистки судовых загрязнений / В. И. Решняк, Е. А. Негруца, Е. П. Чиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 134–140. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-134-140.

Введение (Introduction)

Известно, что в процессе эксплуатации судов и их энергетических установок образуются такие загрязнения, как балластная и нефтесодержащая вода. В соответствии с требованиями основных международных правовых актов в области защиты моря от загрязнения: Конвенции по защите моря от загрязнения с судов (ИМО)¹ и Международной конвенции по контролю судовых балластных вод (BWMС)², направленными на защиту морской среды от загрязнения опасной субстанцией, которая может находиться в балластной и нефтесодержащей воде, применение судовых установок для очистки и обеззараживания балластной и нефтесодержащей воды является *обязательным*. При этом судовые установки должны обеспечивать требуемое для сброса за борт качество различного рода судовых загрязнений.

В целом отрицательное воздействие на водную среду балластной воды характеризуется следующими факторами:

- возможностью загрязнения остатками груза;
- отрицательным влиянием инвазивных организмов, переносимых с балластной водой из одних областей Мирового океана в другие;
- возможностью загрязнения патогенными веществами.

Наиболее показательным примером загрязнения моря остатками грузов является эксплуатация танкеров, в процессе которой большое количество нефти, при попадании в Мировой океан приводит к его загрязнению. Эта часть проблемы защиты морской среды от отрицательного воздействия балластной воды была решена при переходе к эксплуатации судов, имеющих отдельные балластные емкости (танки). Другие аспекты проблемы вначале решались принятием требований, регулирующих правила смены балласта, затем — применением судовых систем балластной воды. Анализ содержания требований, предъявляемых к таким установкам, показывает, что их выполнение обеспечивается очисткой балластной воды и ее обеззараживанием. Для этих целей чаще всего используются *очистка фильтрованием и обеззараживание озоном или гипохлоритом натрия* [1], [2]. Например, такие технологии применяются в установках (системах): Ballast ace (компания JFE) РАСТ Marine Ballast Water Management System Hyde Guardian (производитель: компания Hyde Marine (США), Hitachi Clear Ballast System (производитель: Hitachi, Ltd. (Япония), NK-O3 Blue Ballast System/Nutech O3 (производитель: компания NK Company, Ltd. (Южная Корея) [3]–[7]. Для очистки

¹ Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года и Протокол 1978 года. СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 2008. 706 с.

² International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments. London, UK: International Maritime Organization, 2004. 36 p.

нефтедержательной воды чаще всего применяется *седиментация и адсорбция* в фильтрах с загрузкой из активированного угля.

Целью настоящего исследования является разработка новых технологических и технических предложений, направленных на повышение надежности обеспечения очистки и обеззараживания судовых загрязнений — балластной и нефтедержательной воды.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ технологий очистки и обеззараживания балластной и нефтедержательной воды в существующих судовых установках указывает на одну из основных особенностей, а именно распространение озона в виде озono-воздушной субстанции во всем объеме балластной воды, в котором одновременно находится обеззараживаемая субстанция. При больших объемах балластной воды возникают неблагоприятные условия для организации процесса обеззараживания балластной воды из-за короткого срока существования озона. Кроме того, в процессе очистки в фильтрах накапливаются загрязняющие балластную и нефтедержательную воду вещества в виде дисперсных частиц, которые одновременно являются бактериологически опасными, что приводит к снижению эффективности процесса очистки и обеззараживания балластной воды.

В качестве методов исследования использован анализ процесса окисления озонoм бактериологически опасной субстанции, а также процесса очистки фильтрованием и адсорбцией. Результатом такого исследования является разработка технологического и технического предложения в области организации процессов эффективного окисления (обеззараживания) озонoм загрязняющей субстанции и очистки фильтрованием и адсорбцией. При этом процесс применения озона необходимо рассматривать от момента переноса его из озono-воздушной смеси в объем обрабатываемой воды, а его окончанием считать окисление загрязняющей воду субстанции.

Основными стадиями такого процесса (рис. 1) являются: поступление озono-воздушной смеси в поток или объем очищаемой и обеззараживаемой воды, растворение озона в воде, диффузия растворенного в воде озона в зону контакта с обеззараживаемой субстанцией, собственно реакция обеззараживания [8], [9]. Лимитирующими стадиями этого общего процесса, включающего указанные стадии, в отличие от собственно процесса окисления, который начинается после наступления контакта озона с обеззараживаемой субстанцией, могут быть процесс перехода озона из озono-воздушной смеси в воду, а также диффузия озона в зону контакта и возникновение такого контакта. Когда озono-воздушная смесь подается и затем распространяется во всем объеме балластной воды, может оказаться, что расстояние от молекул озона до частиц обеззараживаемой субстанции будет таким большим, что время до наступления их реакционного контакта будет превышать время существования озона до его распада.

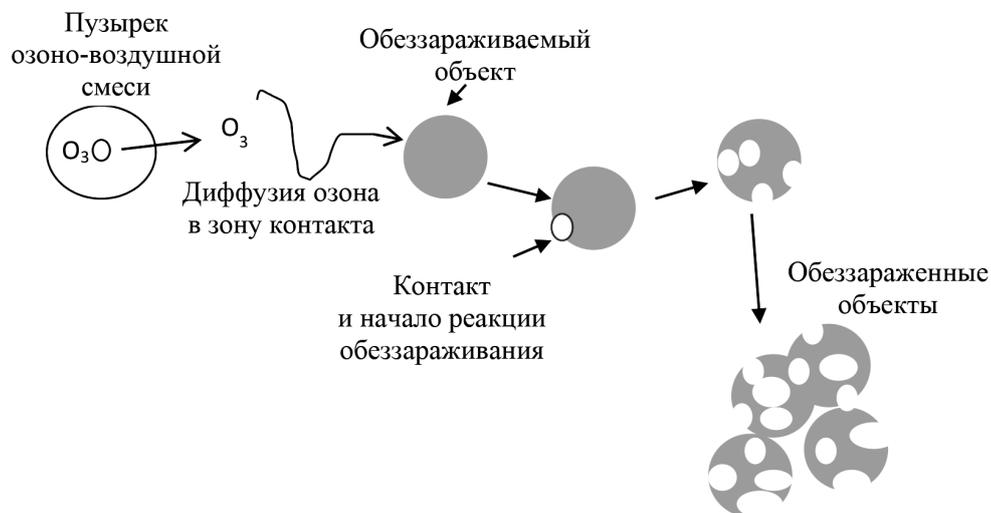


Рис. 1. Стадии процесса обеззараживания бактериологической субстанции в балластной воде

Такой характер развития процесса обеззараживания не позволит эффективно его осуществлять. Сократить лимитирующее влияние указанных стадий и тем самым повысить эффективность использования озона, а также надежность обеспечения очистки и обеззараживания судовых загрязнений возможно в случае организации подачи озона в место накопления загрязнений.

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Повышение эффективности использования озона в процессе обеззараживания бактериологически опасной субстанции в балластной воде и очистки нефтесодержащей воды может быть достигнуто при подаче озона в зону высокой концентрации субстанции-загрязнителя двумя способами. В одном случае подача озона должна быть организована в то место системы очистки и обеззараживания, в котором наблюдается накопления обеззараживаемой субстанции в результате использования технологии, принятой в данной системе. В другом случае концентрирование загрязнителя может обеспечиваться дополнительными или новыми технологическими мероприятиями. Кроме того, в зону реакции окисления целесообразно подавать озон не в виде озono-воздушной смеси, а уже растворенным в некотором объеме воды. Один из вариантов реализации такого подхода, который был разработан и описан авторами настоящего исследования в работах [10], [11], состоял в организации процесса очистки балластной воды от взвешенных веществ при использовании седиментации и коагуляции. После этого выпавший осадок, который одновременно содержал высокую концентрацию бактериологически опасных веществ, перемещался в отдельную емкость, куда одновременно при необходимости может подаваться озон.

В качестве еще одного варианта использования такого подхода в настоящей работе предлагается технологический прием и устройство для его осуществления, который заключается в организации подачи воды предварительно насыщенной озонем в поток обрабатываемой балластной воды на входе в фильтр. Попадая в фильтрующий материал, озон практически сразу вступает реакционный контакт с бактериологически опасной субстанцией, которая содержится в фильтрующем материале, и обеззараживает ее. Эти процессы происходят в узле, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Насос 1 балластной воды подает последнюю в фильтр 2, часть воды из подающего трубопровода направляется в контактную колонну 3 через регулятор потока и давления 4.

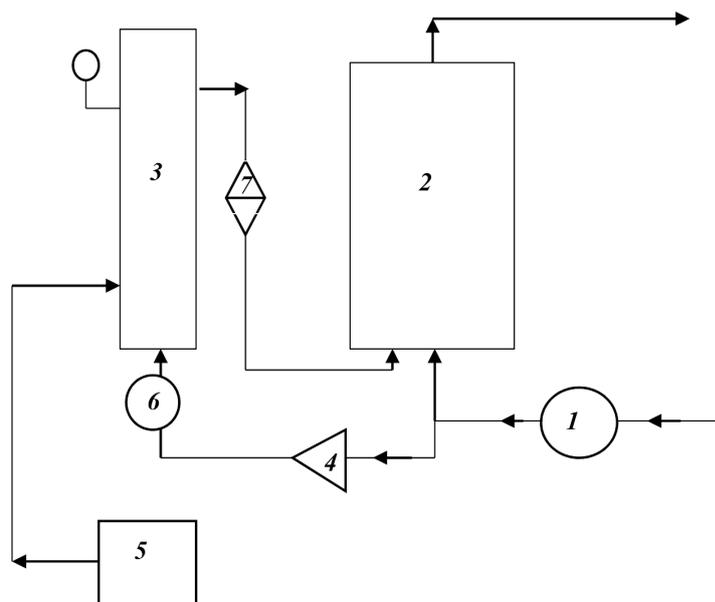


Рис. 2. Принципиальная схема узла очистки и обеззараживания балластной воды

В указанную контактную колонну одновременно подается озono-воздушная смесь от генератора озона 5. Поступивший в контактную колонну озон растворяется в воде, которая с помощью

насоса *b* подается в фильтр, где озон начинает окислять субстанцию, накопившуюся в фильтрующей загрузке, а также в потоке балластной воды, протекающей внутри этой загрузки. Требуемые параметры работы контактной колонны, необходимые для эффективного растворения озона в воде, обеспечиваются дроссельным устройством 7. При такой организации процесса обеззараживания озон очень быстро поступает к обеззараживаемой субстанции и с наступлением их контакта начинается собственно реакция обеззараживания (окисления).

Предварительное растворение озона в воде, осуществляемое в контактной колонне исключает потери времени на этапе стадии растворения озона в обрабатываемой балластной воде, т. е. в момент перехода (растворения) озона из озоно-воздушной смеси в водную среду. Этот же технологический прием может быть применен в технологии очистки нефтесодержащей воды, например, на плавучих станциях или в береговых очистных сооружениях.

Заключение (Conclusion)

Проведенное в работе исследование показало, что применение озона в судовых системах для очистки и обеззараживания судовой загрязненной воды представляет собой многоступенчатый процесс, лимитирующими стадиями которого являются растворение озона в обрабатываемой воде при подаче в нее озоно-воздушной смеси, а также диффузия растворенного в воде озона в зону реакционного контакта.

Эффективность исследуемого процесса будет зависеть от условий, в которых этот процесс осуществляется: объема и конфигурации танков балластной воды, места подачи озоно-воздушной смеси в балластную воду и ее количества, конструкции устройств для подачи озоно-воздушной смеси в воду. Указанные условия будут определять кинетические характеристики лимитирующих стадий процесса, тем самым оказывая влияние на их эффективность. При этом кинетические характеристики могут быть такими, при которых эффективность процесса обеззараживания в целом будет недопустимо низкой.

Решение этих проблем может быть достигнуто с помощью соблюдения следующих условий:

- насыщение озоном отдельного потока воды, которое осуществляется в контактной колонне;
- подача насыщенного озоном потока воды в фильтр, в котором концентрируются загрязнения, например, бактериологически опасная субстанция, содержащаяся в балластной воде или загрязнения, выделенные из нефтесодержащей воды.

Таким образом, рассмотрены варианты, позволяющие реализовать данное технологическое предложение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решняк В. И. Обеспечение эффективности технологий по очистке и обеззараживанию балластной воды / В. И. Решняк, Е. А. Негруза // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 3 (108). — С. 144–150. DOI: 10.34046/aumsuomt108/20.
2. Решняк В. И. Применение озона в процессах очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды / В. И. Решняк, А. Е. Пластинин, В. С. Наумов, А. С. Слюсарев // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 4–2 (46). — С. 168–173.
3. Parsons M. G. Considerations in the design of the primary treatment for ballast systems / M. G. Parsons // Marine technology and SNAME news. — 2003. — Vol. 40. — Is. 01. — Pp. 49–60. DOI: 10.5957/mtl.2003.40.1.49.
4. Tsolaki E. Technologies for ballast water treatment: a review / E. Tsolaki, E. Diamadopoulos // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. — 2010. — Vol. 85. — Is. 1. — Pp. 19–32. DOI: 10.1002/jctb.2276
5. Jing L. A review of ballast water management practices and challenges in harsh and arctic environments / L. Jing, B. Chen, B. Zhang, H. Peng // Environmental Reviews. — 2012. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 83–108. DOI: 10.1139/a2012-002.
6. Tamburri M. N. Ballast water deoxygenation can prevent aquatic introductions while reducing ship corrosion / M. N. Tamburri, K. Wasson, M. Matsuda // Biological Conservation. — 2002. — Vol. 103. — Is. 3. — Pp. 331–341. DOI: 10.1016/S0006-3207(01)00144-6.

7. *Albert R. Availability and Efficacy of Ballast Water Treatment Technology: Background and Issue Paper* [Электронный ресурс] / R. Albert, R. Everett, J. Lishman, D. Smith. — Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e654f4fa44f60504f592d434d17940cc2fd444e6> (дата обращения: 12.01.2016).
8. *Решняк В. И. Очистка нефтесодержащей подсланевой воды озоном* / В. И. Решняк, А. И. Каляуш, К. В. Решняк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 135–140.
9. *Решняк В. И. Разработка технологии очистки и обеззараживания балластных вод* / В. И. Решняк, А. И. Каляуш, К. В. Решняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 365–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-365-373.
10. *Решняк В. И. Технология очистки и обеззараживания балластной воды* / В. И. Решняк, А. И. Каляуш, Д. И. Рочев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 32–38. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-32-38.
11. Пат. 2761347 Российская Федерация, МПК C02F 1/78, B63J 4/00, C02F 1/32. Устройство обезвреживания балластной воды / В. И. Решняк, Д. И. Рочев; заяв. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2021108053; заявл. 25.03.2021; опубл. 07.12.2021, Бюл. № 34.

REFERENCES

1. Reshnyak, V.I., and E. A. Negruca. “Ensuring the effectiveness of technologies for cleaning and disinfection of ballast water.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(108) (2023): 144–150. DOI: 10.34046/aumsuomt108/20.
2. Reshnyak, Valery I., Andrey E. Plastinin, Viktor S. Naumov, and Anatoliy S. Slyusarev. “Slyusarev the application of ozone in the processes of oil-containing bilge water purification.” *Marine Intelligent Technologies* 4–2(46) (2019): 168–173.
3. Parsons, Michael G. “Considerations in the design of the primary treatment for ballast systems.” *Marine technology and SNAME news* 40.01 (2003): 49–60. DOI: 10.5957/mtl.2003.40.1.49.
4. Tsolaki, Efi, and Evan Diamadopoulos. “Technologies for ballast water treatment: a review.” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 85.1 (2010): 19–32. DOI: 10.1002/jctb.2276.
5. Jing, Liang, Bing Chen, Baiyu Zhang, and Hongxuan Peng. “A review of ballast water management practices and challenges in harsh and arctic environments.” *Environmental Reviews* 20.2 (2012): 83–108. DOI: 10.1139/a2012-002.
6. Tamburri, Mario N., Kerstin Wasson, and Masayasu Matsuda. “Ballast water deoxygenation can prevent aquatic introductions while reducing ship corrosion.” *Biological Conservation* 103.3 (2002): 331–341. DOI: 10.1016/S0006-3207(01)00144-6.
7. Ryan, Rich Everett, John Lishman, and Daniel Smith. “Availability and Efficacy of Ballast Water Treatment Technology: Background and Issue Paper.”. Web. 12 Jan. 2016 <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e654f4fa44f60504f592d434d17940cc2fd444e6>>.
8. Reshnyak, V.I., A. I. Kalyaush, and K. V. Reshnyak. “Cleaning oily bilge water with ozone.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 135–140.
9. Reshnyak, Valerii I., Aleksandr I. Kaliaush, and Ksenia V. Reshnyak. “Development of ballast water purification and disinfection technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 365–373. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-365-373.
10. Reshnyak, Valeriy Ivanovich, Alexander Ivanovich Kalyaush, and Dmitry Igorevich Rochev. “Technology of purifying and disinfecting ballast water.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 32–38. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-32-38.
11. Reshnyak, V. I., and D. I. Rochev. RU 2 761 347 C1, IPC C02 F 1/78, B63 J 4/00, C02 F 1/32. *Ustroistvo obezvezhivaniya ballastnoi vody*. Russian Federation, assignee. Publ. 7 Dec. 2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решняк Валерий Иванович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: rv53@mail.ru, kaf_chemistry@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reshnyak, Valery I. —
 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: rv53@mail.ru, kaf_chemistry@gumrf.ru

Негруца Евгений Александрович — аспирант

Научный руководитель:

Решняк Валерий Иванович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: cuidichnrich@rambler.ru,

kaf_chemistry@gumrf.ru

Чиков Егор Павлович — аспирант

Научный руководитель:

Решняк Валерий Иванович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: melkor_mor_bauglir@mail.ru,

kaf_chemistry@gumrf.ru

Negrutsa, Evgenii A. — Postgraduate

Supervisor:

Reshnyak, Valery I.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: cuidichnrich@rambler.ru,

kaf_chemistry@gumrf.ru

Chikov, Egor P. — Postgraduate

Supervisor:

Reshnyak, Valery I.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: melkor_mor_bauglir@mail.ru,

kaf_chemistry@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2023 г.

Received: November 29, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153

USING THE THERMODYNAMIC PROCESSES FEATURES TO ASSESS THE DIESEL POWER PLANTS TECHNICAL CONDITION

V. I. Kochergin, S. P. Glushkov, E. S. Zinchenko

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

The results of studying the thermodynamic processes features and analyzing the prospects for using their characteristics to assess the technical condition of diesel power plants are contained in the paper. A structural diagram of a ship power plant, which is proposed to be considered consisting of separate components of mechanical part, thermodynamic part, fuel supply system and automatic speed control system equal in degree of influence on efficiency is proposed. The theoretical analysis results of the joint operation of the mechanical and thermodynamic components of the diesel power function have shown that the temperature of the working surfaces is an important characteristic of the power plant technical state. The concept of the thermodynamic component in this case refers to a combination of fuel combustion processes and combustion product expansion. To improve the design and efficiency of power plants operation, it is necessary to further study the in-cylinder fuel combustion processes and develop operational methods for monitoring the thermal state of diesel internal combustion engines. Control of changes in functional dependencies of working medium temperature on operating conditions and technical condition can in practice contribute to increase the efficiency of ship power plants operation. The experimental studies of the thermal imaging methods prospects to assess the diesel engines technical condition are carried out. It is found that the control reliability increases with an increase in the size of the diesel engine frame due to a decrease in the intensity of the dynamics of temperature equalization of individual cylinders. At the same time, the most expedient and informative is the control of the temperature of the diesel engine exhaust manifold, carried out during the heating of the cold engine or immediately after its completion.

Keywords: power plant, marine diesel, thermodynamic process, fuel combustion, thermomentering, thermal imager.

For citation:

Kochergin, Victor I., Sergei P. Glushkov, and Evgenii S. Zinchenko. "Using the thermodynamic processes features to assess the diesel power plants technical condition." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.

УДК 62–971

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Российская Федерация

В статье проанализированы результаты исследования особенностей термодинамических процессов и анализ перспектив использования их характеристик для оценки технического состояния дизельных энергетических установок. Приведена структурная схема судовой энергетической установки, которую предлагается считать состоящей из отдельных, равных по степени влияния на эффективность работы, составляющих: механической части, термодинамической части, системы топливоподачи и системы автоматического регулирования частоты вращения. Результаты теоретического анализа совместной работы механической и термодинамической составляющих силовой функции дизеля показали, что температура рабочих поверхностей является важной характеристикой технического состояния энергетической установки. К понятию «термодинамическая составляющая» в данном случае относится сочетание процессов горения топлива и расширения продуктов сгорания. Для совершенствования конструкции и повышения

эффективности эксплуатации энергетических установок необходимо более глубокое изучение внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния дизельных двигателей внутреннего сгорания. Контроль изменения функциональных зависимостей температуры рабочего тела от условий эксплуатации и технического состояния может способствовать на практике повышению эффективности эксплуатации судовых энергетических установок. Проведены экспериментальные исследования перспективности методов тепловизионных исследований для оценки технического состояния дизелей. Установлено, что достоверность контроля повышается при увеличении размеров остова дизеля ввиду уменьшения интенсивности динамики выравнивания температур отдельных цилиндров. При этом наиболее целесообразным и информативным является контроль температуры выпускного коллектора дизеля, выполняемый в процессе прогрева холодного двигателя или непосредственно после его завершения.

Ключевые слова: энергетическая установка, судовый дизель, термодинамический процесс, сгорание топлива, термометрирование, тепловизор.

Для цитирования:

Кочергин В. И. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок / В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.

Введение (Introduction)

Термодинамические процессы дизельных энергетических установок можно представить в виде функций непрерывного изменения эффективного давления и температуры рабочего тела в зависимости от времени или угла поворота коленчатого вала. На характер данных функциональных зависимостей главным образом оказывают влияние показатели внутрицилиндровых кинетических процессов сгорания топлива: скорость сгорания топлива, скорость изменения объема рабочего тела и величина угла опережения воспламенения.

Известно, что процесс горения топлива в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является сложным и многостадийным. Разделение физико-химических преобразования горючей смеси в цилиндре дизеля на отдельные периоды позволяет более точно представить общую картину термодинамических процессов и разработать практические мероприятия по их совершенствованию или оптимизации [1]. При любом изменении качественного и количественного состава дизельного топлива или топливовоздушной смеси, а также изменении температуры или влажности топлива изменяется величина задержки воспламенения, что приводит к вариации скорости распространения пламени в камере сгорания дизеля и в итоге к изменению текущих значений скорости поршня.

Политропные процессы сгорания топлива в цилиндрах ДВС описываются, как правило, известным уравнением термодинамики $pV^n = \text{const}$. Данное выражение характеризуют термодинамику процессов в цилиндрах ДВС лишь приближенно, так как предполагается, что скорость поршня является постоянной величиной, равной среднему расчетному значению, а рабочее тело в цилиндре двигателя расширяется равномерно и за равный промежуток времени, соответствующий определенной величине угла поворота коленчатого вала. В действительности, на величину показателя политропы расширения и на характер индикаторной диаграммы оказывают влияние ряд факторов, а именно: количество и качество поступившего в цилиндры топлива, характер процессов распространения пламени по объему камеры сгорания, отклонения величин степени сжатия и периода задержки воспламенения от номинальных значений вследствие изменения технического состояния систем двигателя. Поэтому принятое схематичное представление изменения параметров состояния рабочего тела в течение процесса сгорания не дает реального представления об истинной динамике термодинамических процессов дизельных энергетических установок, оказывающей существенное влияние на характеристики рабочих процессов и внешние характеристики ДВС.

Известны предложенные И. И. Вибе достаточно адекватные и совершенные модели процессов сгорания топлива и методики расчета основных параметров указанных процессов. В частности, в по-

луэмпирическом уравнении выгорания топлива в ДВС используется показатель характера сгорания, влияющий на относительную величину отвлеченного времени, соответствующего максимальным значениям скорости сгорания топлива [2]. Среди факторов, оказывающих влияние на величину данного показателя применительно к дизельным двигателям, можно выделить следующие [3]:

- степень задержки воспламенения;
- тип смесеобразования (пленочное или объемное);
- параметры протекания процесса впрыска топлива и наличие многофазного впрыска;
- наличие газотурбинного или механического наддува воздуха;
- качество используемого дизельного топлива (увеличение доли парафинов в топливе приводит к увеличению показателя характера сгорания).

Следовательно, в процессе исследования влияния технического состояния на эффективные показатели работы дизеля необходимо более тщательное изучение изменения во времени термодинамических процессов и учет взаимосвязей между параметрами топливоподачи, кинетикой горения топлива и выходными параметрами дизельного двигателя. Более точное представление о модели внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния позволят обеспечить реализацию комплекса мероприятий по совершенствованию конструкции энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания и повышению эффективности их эксплуатации. К таким мероприятиям можно отнести практическую реализацию перспектив применения альтернативных видов топлива, повышение экологичности энергетических установок, предотвращение возникновения неустойчивых режимов работы двигателя, а также обеспечение оптимизации внутрицилиндровых процессов и динамических показателей судовых дизелей [4], [5].

Целью настоящей работы является исследование возможности использования характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При анализе моделей развития сложных технических систем наиболее рациональным является использование принципа равнозначности их составляющих. Предположим, что судовая энергетическая установка (СЭУ) как единая система получения эффективной мощности и крутящего момента состоит из отдельных, условно равных по степени влияния на эффективность ее работы составляющих, таких как механическая часть, термодинамическая часть, система топливоподачи и система автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ). Такой подход к дифференциации структуры СЭУ позволяет предположить, что для достижения оптимального сочетания экономических, мощностных, экологических и иных потребительских качеств судового дизеля необходимо обеспечение равного внимания к исследованию и обеспечению качества всех происходящих в дизеле рабочих процессов. Это положение соответствует представлению об эффективном КПД судового дизеля как характеристике совокупности процессов преобразования химической энергии топлива в энергию механическую, описываемому произведением термического КПД идеального цикла (цикла Тринклера), относительного индикаторного КПД, оценивающего приближение процессов параметров действительного цикла к идеальному, а также механического КПД [6].

Особенно важным выполнение данного условия является в связи с необходимостью обеспечения необходимых динамических характеристик и параметров неравномерности вращения энергетической установки и иных судовых механизмов. На основе известных примеров схематичного представления динамики двигателей внутреннего сгорания, учитывающих процессы тепловыделения и наличия термодинамической образующей крутящего момента [7], [8], предлагается структурная схема СЭУ, в которой СЭУ представлена в виде отдельных, равных по степени влияния на эффективность работы дизеля, составляющих с учетом влияния внешних факторов и условий эксплуатации (рис. 1) [9].

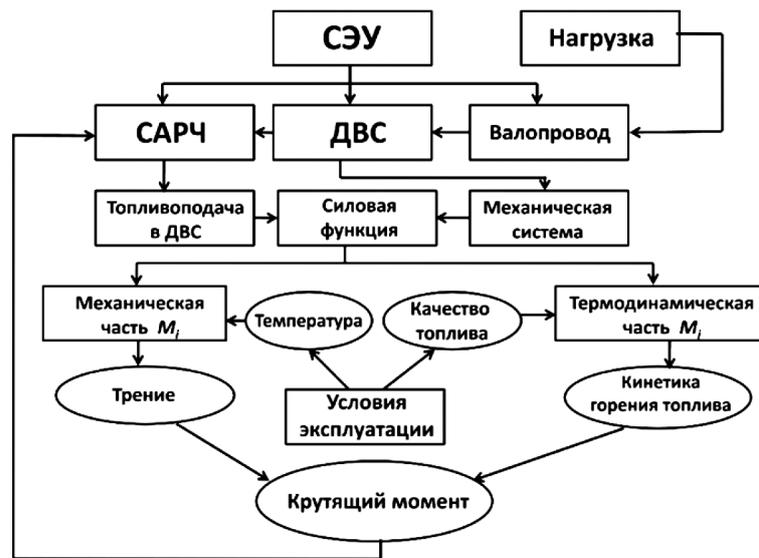


Рис. 1. Структурная схема СЭУ

Современные исследования в области совершенствования моделирования топливоподачи и закономерностей сгорания топлива в ДВС указывают на необходимость учета влияния взаимосвязи динамики процессов сгорания с динамикой иных рабочих процессов. Функция, характеризующая зависимость давления газов p_z в цилиндре ДВС от угла поворота коленчатого вала φ [10] представлена в виде

$$p_r = \begin{cases} \frac{\mu}{\vartheta} e^{-\frac{\chi^2}{0,09}}, & \text{если } \chi < 0; \\ \frac{\mu}{\vartheta} e^{-\frac{\chi^2}{(\vartheta/2)^2}}, & \text{если } \chi \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\chi = \varphi + \alpha - \theta$, рад.;

α — угол опережения впрыска;

θ — величина задержки от начала горения топлива до точки максимального нарастания давления;

μ — коэффициент, характеризующий интенсивность сгорания топлива;

ϑ — коэффициент, характеризующий продолжительность горения.

На величину нормальной скорости распространения пламени при горении топливовоздушной смеси в камере сгорания оказывают влияние состав топлива, температура, влажность и ряд иных факторов (например, наличие предварительного подогрева смеси). Можно утверждать, что величина скорости распространения пламени с достаточной степенью достоверности коррелируется с квадратом абсолютной температуры горючей смеси. Даже с учетом достаточно малой величины времени сгорания топлива учет влияния данного показателя на скорость нарастания давления в цилиндрах двигателя следует считать целесообразным и значимым для исследования фактором, так как степень динамичности изменения внешней нагрузки в итоге влияет на показатели надежности и долговечности энергетической установки. Это объясняется, в частности, повышением напряжений и уменьшением толщины масляной пленки в подшипниках коленчатого вала.

Эффективность, долговечность и даже экологичность энергетических установок во многом определяются качественными и количественными характеристиками теплообмена. Это в полной мере относится и к двигателям внутреннего сгорания, где значения индикаторного и среднего эффективного давления в цилиндрах представляют собой универсальные критерии теплотворной способности и технического состояния двигателя [11]. Температурные режимы работы цилиндровой группы определяют и тепловую напряженность деталей двигателя, т. е. значения абсолютной

температуры на поверхности стенок гильз цилиндров, а также возникающие вследствие неравномерности температуры в различных точках деталей температурные напряжения. Именно характер температурных нагрузений зачастую приводит к аварийным износам и разрушениям критерияльных деталей ДВС, что особенно характерно для высокофорсированных двигателей [12]. К таким деталям можно отнести поршневые кольца ДВС и являющуюся, по сути, элементом энергетической установки, масляную пленку между поршневым кольцом и внутренней поверхностью втулки цилиндра. Процессы теплообмена в масляных пленках тесно связаны с параметрами рабочих процессов энергетической установки, влияющих как на механическую нагруженность элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, так и на процессы прогрева и испарения масляной пленки [13], [14].

Особенно актуальным представляется необходимость исследований термодинамических процессов, сопровождающих горение топлива в цилиндрах дизеля и производство эффективной мощности с учетом существующей тенденции более широкого применения альтернативных видов топлива [15]. Требования Международной конвенции МАРПОЛ-73/78 фактически ведут к запрету на использование мазута и традиционного дизельного топлива [16], а применение новых видов источников энергии влечет изменение динамических характеристик всего комплекса процессов теплообмена, движения элементов кривошипно-шатунного механизма и регулирования частоты вращения.

При известных геометрических и термодинамических параметрах камеры сгорания, таких как радиус сферы горения и величина давления в цилиндре, возможно определение скорости выделения теплоты, пропорциональной приращению радиуса сферы горения. Между термодинамическими процессами, определяемыми в данном случае величиной суммарного коэффициента теплоотдачи α_{Σ} , и параметрами рабочего процесса ДВС (скоростью нарастания давления и скоростью поршня), согласно известным исследованиям процессов теплоотдачи стенок цилиндра, существует устойчивая связь [17]:

$$\alpha_{\Sigma} = 130d^{-0,2} p^{0,8} T^{0,53} \left[c_1 v_{cp} + c_2 \frac{V_h T_1}{p_1 V_1} (p_0 - p) \right], \quad (2)$$

где d — диаметр цилиндра;

c_1 и c_2 — поправочные коэффициенты;

v_{cp} — средняя скорость поршня;

p_0 — текущее значение давления прокрутки;

V_h — рабочий объем цилиндра;

p и T — текущие значения параметров рабочего тела: давления и температуры;

p_1 , V_1 и T_1 — параметры рабочего тела, соответствующие моменту закрытия впускных клапанов.

Таким образом, для анализа и исследования особенностей термодинамических процессов дизельных энергетических установок необходимо математическое моделирование динамики отдельных элементов уточненной структурной схемы СЭУ.

Результаты (Results)

Исходя из утверждения о равной значимости механической и термодинамической составляющих силовой функции дизельной энергетической установки для ее эффективной работы, представим выражения, описывающие процессы, происходящие одновременно в этих, по сути, разнородных с физической точки зрения системах. Характеристиками механической системы дизеля выступают преимущественно геометрические параметры кривошипно-шатунного механизма, а к понятию термодинамической составляющей в данном случае следует относить сочетание процессов горения топлива и расширения продуктов сгорания. Происходящие в цилиндрах ДВС термодинамические процессы и непосредственно связанные с ними компрессионные процессы (наполнение цилиндров дизеля свежим зарядом, сжатие заряда и очистка цилиндров) в итоге порождают суммарную силовую функцию, характеризующуюся величиной крутящего момента M_r , дискретно распределенного по длине коленчатого вала [7], [9].

При использовании безразмерных характеристик термодинамической $Q(\varphi)$ и компрессионной $K(\varphi)$ составляющих силовой функции M_i можно описать для отдельно взятого цилиндра дизеля следующим выражением:

$$M_i(\varphi) = V_h [p_c K(\varphi) + p_i Q(\varphi)], \quad (3)$$

где V_h — рабочий объем цилиндра;

p_c и p_i — функции давления газов в цилиндре, определяющие, соответственно, скоростной и нагрузочный режимы двигателя.

Применительно к многоцилиндровому дизелю, имеющему j цилиндров, суммарная силовая функция может быть представлена совокупностью j силовых функций M_i , действующих на соответствующие участки коленчатого вала, расстояния между которыми определяются расстояниями между отдельными кривошипами двигателя:

$$M_i = \sum_0^{j-1} V_h [p_c K(\varphi - \beta) + p_i Q(\varphi - \beta)], \quad (4)$$

где β — угол поворота коленчатого вала между вспышками в j -м и первом цилиндрах.

Входящие в выражения (3) и (4) составляющие p_c и p_i , являются также функциями от угловой скорости коленчатого вала ω , мгновенные значения которой в свою очередь находятся в зависимости от скорости перемещения поршня и степени нечувствительности регулятора частоты вращения. Силовая функция каждого из цилиндра двигателя зависит от координаты органа управления топливоподачей ψ , особенно в современных системах топливоподачи с электронным управлением многофазным впрыском топлива. В итоге регулирующее воздействие в момент времени t , обеспечивающее необходимое изменение величины цикловой подачи топлива, осуществляется с некоторым запаздыванием:

$$\psi_i = \psi(t_k - t), \quad (5)$$

где t_k — предшествующий момент времени, в который происходит изменение координаты ψ ($k=1, 2, \dots, n$).

В общем случае крутящий момент одного цилиндра дизеля можно представить в виде $M_{ij} = M_K + M_Q$. Текущие значения эффективного крутящего момента на установившихся режимах работы без учета механических потерь определяются известным выражением:

$$M_{e_0} = \frac{jV_h p_i}{2\pi\tau}, \quad (6)$$

где τ — тактность двигателя;

j — количество цилиндров ДВС,

p_i — среднее индикаторное давление.

В динамике изменение эффективного крутящего момента описывается зависимостью

$$M_{e_{cp}} = \frac{\partial M_{e_{cp}}}{\partial \psi} + M_{e_0}. \quad (7)$$

Процесс изменения термодинамической образующей крутящего момента в выражении (3) с учетом прямой связи величины крутящего момента и индикаторного давления можно приближенно описать выражением следующего вида:

$$M'_Q(\varphi, \psi) = V_h Q(\varphi) \frac{\partial p_i}{\partial M_{e_{cp}}} M_{e_{cp}}. \quad (8)$$

Представим значения индикаторного давления в цилиндре дизеля в виде суммы:

$$p_i = p_0 + \Delta p_Q + \Delta p_\psi, \quad (9)$$

где p_0 — давление сжатия топливовоздушной смеси;

Δp_Q — приращение давления от сгорания топлива и последующего расширения рабочей смеси;

Δp_{ψ} — изменение давления по сравнению с необходимым при текущем значении угла поворота коленчатого вала φ вследствие несвоевременной либо некачественной работы систем управления подачей топлива.

Помимо величины индикаторного давления p_i на текущие значения термодинамической образующей крутящего момента в равной степени влияет и величина температуры рабочего тела T_i в цилиндрах двигателя. Следовательно, для описания процесса изменения M_Q можно использовать следующее выражение:

$$M'_Q(\varphi, \psi) = V_h Q(\varphi) \frac{mR\partial(T_i / V)}{\partial M_{e_{cp}}} M_{e_{cp}}; \quad (10)$$

где m — количество молей газовой смеси;

R — газовая постоянная.

Представленные выражения дают основание сделать вывод о наличии взаимосвязи между внешними характеристиками и параметрами термодинамики дизельных энергетических установок и, следовательно, о наличии возможности практического применения методов анализа параметров термодинамических процессов для оценки технического состояния СЭУ.

Обсуждение (Discussion)

Ввиду того, что величина термодинамической образующей и, соответственно, величина суммарного крутящего момента являются функциями от температуры сгорания топлива в цилиндрах дизеля, температура представляет собой функциональную зависимость от текущих значений крутящего момента, определяемых комплексом условий эксплуатации и техническим состоянием СЭУ: $T_i = f(M_Q)$. Поскольку в цилиндре дизеля происходит не только пропорциональное изменение температуры и давления в соответствии с известными физическими законами, но и стохастические процессы горения топлива, динамику рабочих процессов энергетической установки с позиций изменения рабочей температуры в цилиндрах дизеля, в соответствии с (8), также можно представить в виде аналогичных составляющих:

$$T_i = T_0 + \Delta T_Q + \Delta T_{\psi}. \quad (10)$$

Выражения (1)–(10) могут служить приблизительным описанием термодинамики дизельных энергетических установок. Если пренебречь дискретностью регулирования угловой скорости, описание и возможные решения уравнений динамики рабочих процессов ДВС существенно упрощаются. Характеристики термодинамических процессов, представляющие собой функциональные зависимости температуры рабочего тела от угла поворота и угловой скорости коленчатого вала, могут использоваться для оценки изменений параметров технического состояния дизельных энергетических установок. Отклонение величины индикаторного давления от оптимальных значений, одной из наиболее вероятных причин которого может быть изменение термодинамической составляющей образующей крутящего момента, приводит к изменению параметров технического состояния СЭУ. Такими параметрами в первую очередь являются износ деталей цилиндропоршневой группы и газораспределительного механизма, отказы систем топливоподачи и автоматического регулирования частоты вращения, а также изменение параметров цикловой подачи и качественного состава топлива. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок может на практике способствовать повышению эффективности эксплуатации основных и вспомогательных СЭУ.

Основными направлениями перспективных направлений использования термодинамических характеристик в данных целях являются:

- совершенствование термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания;
- исследование влияния термодинамической составляющей образующей крутящего момента на эффективные показатели работы дизелей;
- разработка технологий диагностирования энергетических установок на основе анализа отклонений температуры в цилиндрах дизеля при различных режимах работы от номинальных значений.

Разработка технологий диагностирования технического состояния СЭУ в эксплуатационных условиях представляется наиболее важным направлением использования термодинамических процессов в практических целях. Осуществление контроля изменения в процессе эксплуатации технического состояния дизельных СЭУ, сопровождающегося варьированием характеристик термодинамических процессов, возможно путем использования косвенных методов (например, посредством анализа топливно-экономических и динамических характеристик дизеля). Однако такой подход не позволяет в полной мере дифференцировать влияние термодинамической составляющей на эффективные показатели работы энергетических установок.

В стандартных технологических процессах технического диагностирования предусмотрены процедуры поиска неисправностей, приводящих к изменению эффективных показателей двигателя, в том числе возникающих по причине нарушения процессов сгорания топлива и расширения рабочего тела. В связи с этим при осуществлении мониторинга технического состояния СЭУ обязательно должен быть предусмотрен контроль температурного режима отдельных элементов энергетической установки. Одним из способов контроля температурного режима двигателя, наиболее близких к прямым методам оперативной оценки технического состояния, следует считать не нашедшее в настоящее время широкого распространения *дистанционное термометрирование*. Использование термограмм позволяет контролировать тепловой режим работы дизеля в целом и его отдельных агрегатов.

Экспериментальные исследования с целью оценки перспектив использования особенностей протекания термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок были выполнены на вспомогательной дизель-генераторной энергетической установке, оснащенной двигателем 4ЧН 9,5/11,5, с использованием тепловизора Testo 875. На рис. 2 приведены результаты термометрирования, полученные в процессе прогрева и выхода дизеля на рабочий режим в ходе проведения настоящего исследования. На основе анализа данных термограмм можно утверждать, что для уменьшения влияния нивелирования разности температур боковых поверхностей остова двигателя термометрический контроль целесообразно применять в процессе прогрева СЭУ либо непосредственно после его завершения.

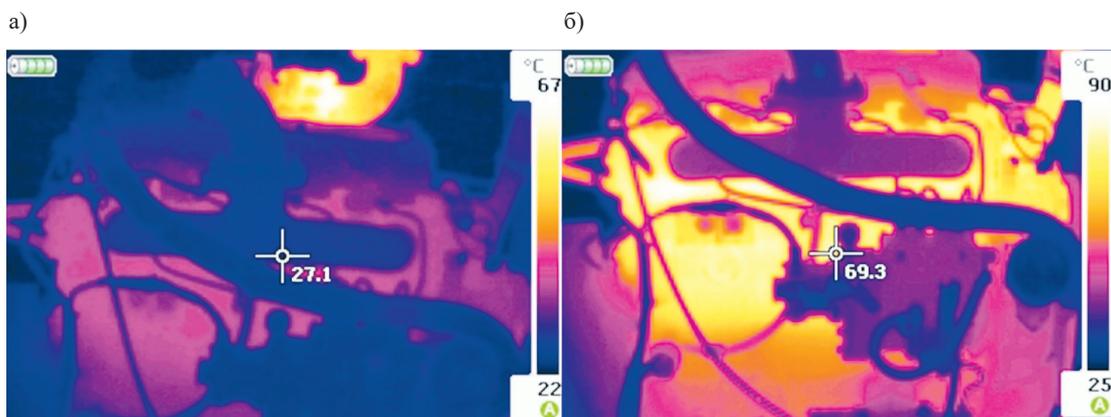


Рис. 2. Термограммы дизеля 4ЧН 9,5/11,5:
а — прогрев холодного двигателя; б — прогретый двигатель

Процесс теплообмена горячего рабочего тела через стенку втулки цилиндра с охлаждающей жидкостью и в дальнейшем с окружающей средой состоит по меньшей мере из трех последовательно протекающих процессов: теплоотдачи, теплопроводности и вновь теплоотдачи. Оптимизация этих процессов, например, путем подбора конструкционных материалов, позволяет повысить надежность энергетических установок [18].

Втулку цилиндра судового дизеля можно условно считать *эллиптическим цилиндрическим отверстием*, вписанным в параллелепипед блока цилиндров. Уменьшение температуры при охлаждении цилиндра после окончания такта рабочего хода происходит по линиям пересечения концентрических сфер с эллиптическими цилиндрическими поверхностями по мере увеличения радиусов этих

сфер [19]. Поскольку в процессе эксплуатации втулка цилиндра приобретает эллипсность, наибольшей температурой остова двигателя следует считать его боковые поверхности, что создает предпосылки для успешного использования методов термометрирования при оценке технического состояния энергетических установок

Моделирование неисправностей топливоподающей аппаратуры показало, что интенсивный прогрев используемого в качестве экспериментальной установки и обладающего достаточно компактными размерами дизеля 4ЧН 9,5/11,5 затрудняет дифференцирование теплового состояния отдельных цилиндров после выхода на рабочий режим. Достоверность диагноза повышается при увеличении размеров остова дизельной энергетической установки, так как уменьшается интенсивность теплоотдачи и выравнивание температур отдельных цилиндров. Наиболее информативным следует считать контроль температурного режима в районе выпускного коллектора дизеля. На рис. 3 приведены результаты выполненного в процессе настоящего исследования термометрирования выпускного коллектора дизеля 4ЧН 9,5/11,5 с неисправной плунжерной парой топливного насоса высокого давления четвертого цилиндра.

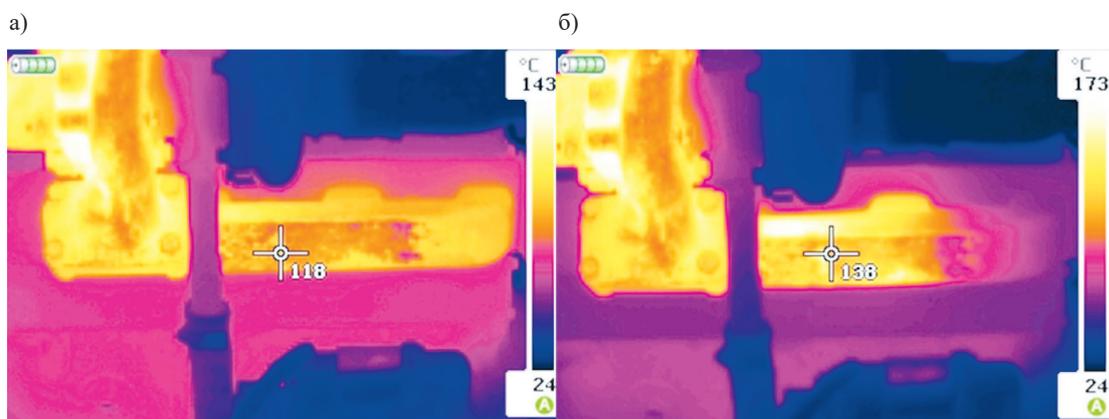


Рис. 3. Результаты термометрирования выпускного коллектора дизеля 4ЧН 9,5/11,5:
 а — исправный двигатель; б — двигатель с неисправной плунжерной парой
 топливного насоса высокого давления четвертого цилиндра

Приведенный пример наглядно показывает, что вследствие недостаточного количества поступающего в четвертый цилиндр дизельного топлива и снижения температуры в цилиндре температура коллектора в этом районе существенно ниже средних значений остальной части поверхности выпускного коллектора. Из этого следует, что оценка наличия отклонений мощности и крутящего момента дизеля от номинальных значений в связи с изменением величины термодинамической образующей крутящего момента, в соответствии с выражением (10), может быть выполнена на основе использования тепловизионного оборудования. Бесспорно, такое изменение температуры коллектора может быть вызвано также вариацией иных параметров технического состояния дизеля и, возможно, для поиска конкретной неисправности потребуются проведение углубленного диагностирования. Однако для оперативной оценки технического состояния СЭУ характеристики термодинамических процессов могут быть рекомендованы к практическому применению при условии использования термограмм, полученных в процессе прогрева холодного двигателя либо непосредственно после его завершения для уменьшения влияния выравнивания разности температур боковых поверхностей горячего дизеля.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Термодинамические процессы дизельных энергетических установок, зависящие от характеристик внутрицилиндровых кинетических процессов сгорания топлива, таких как скорость сгорания, скорость изменения объема рабочего тела и величина угла опережения воспламенения,

оказывают существенное влияние на термодинамическую составляющую образования крутящего момента. Таким образом, СЭУ следует считать системой, состоящей из равных по степени влияния на эффективность ее работы составляющих, таких как механическая часть, термодинамическая часть, а также система топливоподачи и система автоматического регулирования частоты вращения. Наиболее активно термодинамические процессы влияют на величину и характер силовой функции на стадиях сжатия рабочего тела, сгорания топлива и расширения продуктов сгорания.

2. Исходя из утверждения о равной значимости механической и термодинамической составляющих силовой функции дизеля для обеспечения его эффективной работы, приведены выражения, представляющие приближенное описание суммарного влияния данных составляющих на эффективные показатели работы энергетической установки. Поскольку величина термодинамической образующей и, соответственно, величина суммарного крутящего момента являются функциями от температуры сгорания топлива в цилиндрах дизеля, то и температура представляет собой функциональную зависимость от текущих значений крутящего момента, определяемых комплексом условий эксплуатации и техническим состоянием СЭУ. Динамика рабочих процессов энергетической установки может быть описана процессами изменения рабочей температуры рабочего тела в цилиндрах дизеля, величина которой в равной степени зависит от термодинамической и механической составляющих причин ее изменения. Более глубокое изучение внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния СЭУ позволят обеспечить совершенствование конструкций и повышение эффективности эксплуатации энергетических установок.

3. Наиболее важным направлением использования термодинамических процессов в практических целях следует считать разработку технологий диагностирования технического состояния СЭУ в эксплуатационных условиях. Косвенные методы оценки соответствия термодинамических процессов оптимальным значениям на основе анализа топливно-экономических и динамических характеристик дизеля не обеспечивают в полной мере дифференциацию причин отказов и неисправностей СЭУ. В процессах мониторинга технического состояния обязательно должен быть предусмотрен контроль температурного режима отдельных элементов энергетической установки.

4. С наибольшей вероятностью возможность практического использования характеристик термодинамических процессов для оперативной оценки технического состояния дизельных энергетических установок может быть достигнута посредством дистанционного термометрирования. Использование полученных с помощью тепловизионного оборудования термограмм позволяет контролировать тепловой режим работы дизеля в целом и его отдельных агрегатов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что термометрический контроль наиболее целесообразно применять в процессе прогрева холодного двигателя либо непосредственно после его завершения, чтобы обеспечить уменьшение влияния выравнивания разности температур боковых поверхностей горячего дизеля. Достоверность диагностирования возрастает также при увеличении размеров остова дизеля, так как при этом уменьшается интенсивность динамики выравнивания температур отдельных цилиндров. Приведенный в статье пример моделирования неисправности плунжерной пары топливного насоса высокого давления показал, что наиболее целесообразным и информативным является контроль температурного режима работы дизеля в районе выпускного коллектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрусенко С. Е. Механизмы управления рабочим процессом дизельного двигателя / С. Е. Андрусенко, О. Е. Андрусенко, В. В. Колыванов, Ю. И. Матвеев // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 68. — С. 98–108. DOI: 10.37890/jwt.v68.206.
2. Вибе И. И. Теория двигателей внутреннего сгорания / И. И. Вибе. — Челябинск: ЧПИ, 1974. — 252 с.
3. Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев. — Челябинск: Изд-во Южно-Уральского гос. ун-та, 2004. — 344 с.

4. *Ладоша Е. Н.* Имитация рабочего процесса поршневых двигателей на основе моделей химических реакций, турбулентности и теплообмена / Е. Н. Ладоша // Инженерный вестник Дона. — 2008. — № 2 (4). — С. 21–33.

5. *Бурков А. Ф.* Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханшин, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

6. *Ерофеев П. А.* Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

7. *Добролюбов И. П.* Динамический метод диагностики автотракторных двигателей. Часть 1. Принципы построения диагностических моделей переходных процессов / И. П. Добролюбов, В. М. Лившиц. — Новосибирск: Сиб. отделение ВАСХНИЛ, 1981. — 86 с.

8. *Леонов Г. Н.* Некоторые особенности моделирования динамики двигателя внутреннего сгорания / Г. Н. Леонов, А. В. Фролов, И. С. Шустов // Ползуновский вестник. — 2012. — № 3–1. — С. 123–128.

9. *Кочергин В. И.* Обеспечение эффективности процессов регулирования частоты вращения эксплуатируемых судовых энергетических установок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.05 / В. И. Кочергин. — Новосибирск, 2020. — 44 с.

10. *Тырловой С. И.* К определению цикловой подачи топлива ТНВД при неустановившихся режимах высокооборотного автомобильного дизеля / С. И. Тырловой // Двигатели внутреннего сгорания. — 2010. — № 1. — С. 21–24.

11. *Ерофеев В. Л.* Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

12. *Глушков С. П.* Обеспечение безопасности эксплуатации транспортных средств на основе анализа динамических температурных нагрузений / С. П. Глушков, Б. О. Лебедев, С. С. Глушков, В. И. Кочергин, В. О. Жидких // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 2 (49). — С. 51–56.

13. *Лебедев Б. О.* Влияние параметров рабочих процессов судовых дизелей на процессы теплообмена в камерах сгорания / Б. О. Лебедев, С. П. Глушков, В. И. Кочергин // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–3 (43). — С. 42–46.

14. *Glushkov S.* Study of Dynamic Temperature Loads for Power Plant Elements / S. Glushkov, V. Kochergin, B. Lebedev // International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC. — Cham: Springer International Publishing, 2022. — Pp. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_40.

15. *Лебедев Б. О.* Особенности использования альтернативных видов топлива для судовых энергетических установок / Б. О. Лебедев, С. П. Глушков, В. И. Кочергин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–4 (42). — С. 139–143.

16. *Хорошев В. Г.* Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках / В. Г. Хорошев, Л. Н. Попов, Р. И. Гатин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4 (390). — С. 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202.

17. *Серегин А. С.* Методика расчета рабочего процесса при моделировании кинетики сгорания газообразного топлива в поршневых ДВС / А. С. Серегин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2008. — № 1. — С. 37–44.

18. *Рассторгуева О. В.* Исследование проблем теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания опасных производственных объектов / О. В. Рассторгуева, Д. О. Седельников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. — 2016. — № 5. — С. 62–70.

19. *Расулов С. Р.* Распределение температуры при охлаждении деталей, ограниченных поверхностями в виде параллелепипеда и эллиптического цилиндра / С. Р. Расулов, В. А. Ибрагимов, Д. А. Керимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2016. — Т. 18. — № 3. — С. 146–159. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.11.

REFERENCES

1. Andrusenko, S. E., O. E. Andrusenko, V. V. Kolyvanov, and Yu. I. Matveev. "Work process control mechanisms of diesel engine." *Nauchnye problemy vodnogo transporta* 68 (2021): 98–108. DOI: 10.37890/jwt.v68.206.
2. Vibe, I. I. *Teoriya dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. Chelyabinsk: ChPI, 1974.
3. Sharoglazov, B. A., M. F. Farafontov, and V. V. Klement'ev. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov*. Chelyabinsk: Izd-vo Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta, 2004.
4. Ladoshka, E. N. "Imitatsiya rabocheho protsessa porshnevykh dvigatelei na osnove modelei khimicheskikh reaktzii, turbulentsnosti i teploobmena." *Inzhenernyi vestnik Dona* 2(4) (2008): 21–33.
5. Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhanoshin, and Nguyen Khan Ha. "Improving the management efficiency of combined power plants of ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
6. Erofeev, Pavel A., Vladimir A. Zhukov, and Sergei G. Chernyi. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.
7. Dobrolyubov, I.P., and V. M. Livshits. *Dinamicheskii metod diagnostiki avtotraktornykh dvigatelei. Chast' I. Printsipy postroyeniya diagnosticheskikh modelei perekhodnykh protsessov*. Novosibirsk: Sib. otdelenie VASKhNIL, 1981.
8. Leonov, G. N., A. V. Frolov, and I. S. Shustov. "Nekotorye osobennosti modelirovaniya dinamiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya." *Polzunovskii vestnik* 3–1 (2012): 123–128.
9. Kochergin, V. I. Obespechenie effektivnosti protsessov regulirovaniya chastoty vrashcheniya ekspluatiruemyykh sudovykh energeticheskikh ustanovok. Abstract of PhD diss. Novosibirsk, 2020.
10. Tyrlovoy, S. I. "To determine the cycle fuel supply of the fuel injection pump under unsteady modes of high-speed automobile diesel." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2010): 21–24.
11. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. "Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.
12. Glushkov, S. P., B. O. Lebedev, S. S. Glushkov, V. I. Kochergin, and V. O. Zhidkikh. "Vehicles safety operation on the basis of the dynamic temperature tension analysis." *Siberian Transport University Bulletin* 2(49) (2019): 51–56.
13. Lebedev, B. O., S. P. Glushkov, and V. I. Kochergin. "Influence of parameters of working processes of ship diesels on of heat exchange processes in combustion chambers." *Marine Intellectual Technologies* 1–3(43) (2019): 42–46.
14. Glushkov, Sergey, Victor Kochergin, and Boris Lebedev. "Study of Dynamic Temperature Loads for Power Plant Elements." *International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC*. Cham: Springer International Publishing, 2022. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0-40.
15. Lebedev, B. O., S. P. Glushkov, and V. I. Kochergin. "Features of using alternative types of fuel in marine power plants." *Marine Intellectual Technologies* 4–4 (42) (2018): 139–143.
16. Horoshev, V. G., L. N. Popov, and R. I. Gatin. "Prospects of alternative fuels for marine power plants." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(390) (2019): 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202.
17. Seregin, A. S. "Metodika rascheta rabocheho protsessa pri modelirovanii kinetiki sgoraniya gazoobraznogo topliva v porshnevykh DVS." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* 1 (2008): 37–44.
18. Rastorgueva, O. V., and D. O. Sedelnikov. "Research problems of heat transfer in internal combustion engine." *Safety and Risk Management* 5 (2016): 62–70.
19. Rasulov, S. R., V. A. Ibragimov, and J. A. Karimov. "Temperature distribution in the cooling of parts restricted by the surfaces in the form of parallelepiped and elliptic cylinder." *Safety and Risk Management* 18.3 (2016): 146–159. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочергин Виктор Иванович —
доктор технических наук, доцент
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kochergin, Victor I. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Глушков Сергей Павлович —
доктор технических наук, профессор
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Зинченко Евгений Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Кочергин Виктор Иванович
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: askambaska@mail.ru

Glushkov, Sergei P. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru
Zinchenko, Evgenii S. — Postgraduate
Supervisor:
Kochergin, Victor I.
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: askambaska@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.
Received: November 17, 2023.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162

MODELING OF TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL PROCESSES IN AUTOMATED SYSTEMS

K. P. Goloskokov, N. B. Glebov, A. A. Astapkovich

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

The purpose of the study is to create a problem-oriented model of transport and technological processes in automated systems. To achieve this goal, it is necessary to develop methodological aspects of creating an automated modeling system. The content of the basic principles of problem-oriented modeling in the study of an integrated automated system for managing stocks and transport and technological processes is revealed in the paper. At the same time, methodological aspects of creating automated modeling systems, namely, a conceptual mathematical model for the analysis and standardization of technical and economic indicators are considered. The functioning of logistics systems, namely, system modeling (supply — transport) is also considered. The problems of interaction and relationships, optimization of resource flows, and increasing the efficiency of management decisions making have been solved. It is shown that modeling resource flows involves adjustments through iterative redistribution of interregional and intraregional supplies among suppliers and consumers. Combining product items into one delivery leads to savings in stocks formation costs by reducing the number of orders. To create effective automated control systems, it is necessary to study in detail the primary object — the logistics and technical support system itself. The creation of applied mathematical and software is a promising direction for solving this problem and developing it as an automated modeling system. In this regard, when creating such automated control systems, it is most advisable to use a model-oriented approach, which is based on the principles of system analysis, standardization, classification and modularity. Thus, it is shown that the use of the problem-oriented approach to creating an automated modeling system makes it possible to reduce the labor intensity of its development and implementation, to provide the opportunity to unify algorithms for solving a problem, but also to apply standard methods for processing experimental results.

Keywords: Mathematical model, automated system, transport and technological process, problem-oriented approach, supplies, raw materials.

For citation:

Goloskokov, Konstantin P., Nikolay B. Glebov, and Aleksey A. Astapkovich. “Modeling of transportation and technological processes in automated systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162.

УДК 338.45:65:004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

К. П. Голоскоков, Н. Б. Глебов, А. А. Астапкович

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

В статье раскрывается содержание основных принципов проблемно-ориентированного моделирования в исследовании интегрированной автоматизированной системы управления запасами и транспортно-технологическими процессами. Рассматриваются один из методологических аспектов создания автоматизированных систем моделирования: концептуальная математическая модель анализа и нормирования технико-

экономических показателей, а также функционирование систем материально технического обеспечения: моделирование системы (поставка – транспорт). Решены задачи взаимодействия и взаимосвязей, оптимизации ресурсопотоков, повышения эффективности принятия управленческих решений. Показано, что моделирование потоков ресурсов предусматривает корректировку путем итеративного перераспределения межрегиональных и внутрирегиональных поставок по поставщикам и потребителям. Отмечается, что совмещение номенклатурных позиций в одну поставку ведет к экономии издержек формирования запасов за счет уменьшения числа заказов. Подчеркивается, что для создания эффективных автоматизированных систем управления необходимо подробно исследовать первичный объект — непосредственно систему материально-технического обеспечения. Создание прикладного математического и программного обеспечения является перспективным направлением решения этой проблемы и развития его как системы автоматизированного моделирования. В связи с этим при создании таких автоматизированных систем управления наиболее целесообразным является использование модельно-ориентированного подхода, основанного на принципах системного анализа, стандартизации, классификации и модульности. Показано, что использование проблемно-ориентированного подхода при создании автоматизированной системы моделирования позволяет снизить трудоемкость ее разработки и реализации, обеспечить возможность не только унифицировать алгоритмы решения задачи, но и применить стандартные методы обработки результатов экспериментов.

Ключевые слова: математическая модель, автоматизированная система, транспортно-технологический процесс, проблемно-ориентированный подход, поставки, сырье.

Для цитирования:

Голоскоков К. П. Моделирование транспортно-технологических процессов в автоматизированных системах / К. П. Голоскоков, Н. Б. Глебов, А. А. Астапкович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 154–162. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-154-162.

Введение (Introduction)

Решение задач взаимодействия и взаимосвязей, оптимизации ресурсопотоков, повышение эффективности принятия управленческих решений с целью оптимизации может выполняться достаточно хорошо на основе моделирования в рамках автоматизированных систем управления (АСУ) транспортно-технологическим процессом, АСУ материально-техническим снабжением, АСУ запасами и др. При этом решение таких задач имеет особенности. Так, если разработан план развития промышленности и хозяйства, детализированный до отраслевой номенклатуры ресурсов, решены вопросы структурно-технологической оптимизации, рассчитаны отраслевые схемы размещения производства, возникает проблема установления четкой взаимосвязи отраслевых схем [1]–[3]. В процессе решения этой проблемы следует различать два основных случая: первый, когда существенными являются затраты на перевозки ресурсов и готовой продукции, второй, когда на первый план выдвигается не транспортный фактор, а наличие необходимых ресурсов в том или ином регионе. Следовательно, межрегиональное моделирование материальных потоков тесно связано с размещением и объемами различных видов ресурсов [4]–[7].

Необходимо иметь четкую картину сверхнормативных запасов, информировать возможных потребителей о том, *какие ресурсы, где и в каких объемах* могут быть реализованы [8]–[10]. Обменные операции следует расценивать как регулятор изменения потребности в ресурсах из-за корректировок в номенклатуре и объемах выпускаемой продукции, поэтому необходимо повысить оперативность их выполнения. Повышение запасов обусловлено несвоевременными неритмичными поставками, многоступенчатое распределение запасов (по централизованным поставкам) осложняет работу предприятий и вызывает излишний расход ресурсов. В номенклатуре планирования запасов следует выделять позиции, относящиеся к малотранспортабельным ресурсам (трудовые ресурсы, строительные мощности, некоторые виды сырья, многотоннажные и негабаритные грузы и т. д.) [11]–[13]. Избыток малотранспортабельных видов ресурсов в n -м регионе обозначен вектором R^n .

Целью исследования является создание проблемно ориентированной модели транспортно-технологических процессов в автоматизированных системах. Для достижения этого необходимо разработать методологические аспекты создания автоматизированной системы моделирования.

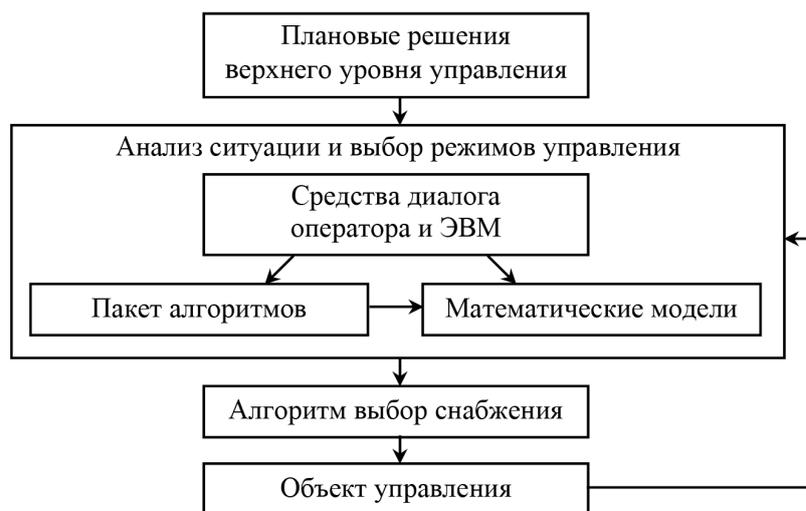
Методы и материалы (Methods and Materials)

Для создания эффективных АСУ [14]–[16] необходимо подробно исследовать первичный объект — непосредственно систему материально-технического снабжения транспортно-технологического процесса. Исследование АСУ показывает [17], [18], что они, как правило, обладают достаточно сложной эшелонированной структурой с взаимозависимыми звеньями и разнообразными функциями. Изучение таких систем с помощью аналитических методов является затруднительным, поэтому возрастает актуальность разработки эффективных линейных моделей для анализа и нормирования технико-экономических показателей функционирования системы материально-технического обеспечения. Решением данной проблемы является создание прикладного математического обеспечения автоматизированной системы моделирования, предназначенной для автоматизации процессов анализа и функционирования на основе применения средств моделирования и принятия решений, а также вычислительной техники.

Анализ возможных подходов [9], [10] к построению АСУ показывает, что это можно выполнить на хорошем качественном уровне при максимальном соблюдении различных требований к АСУ, в том числе:

- адекватное отражение специфики процессов функционирования конкретного материально-технического обеспечения;
- наличие широких функциональных возможностей моделирования процессов материально-технического обеспечения с различными уровнями их детализации;
- обеспечение поэтапного наращивания функциональных возможностей АСУ за счет включения в ее состав новых моделей;
- способствование снижению трудоемкости и стоимости, а также повышению качества выработываемых решений;
- снижение требований к математической и трудовой квалификации программистов-пользователей.

В связи с этим при создании АСУ наиболее целесообразным является использование модельно-ориентированного подхода, основанного на принципах системного анализа, стандартизации, классификации, упорядочения и модульности. Использование принципов развития и совместимости, обеспечивающих возможность расширения функциональных характеристик АСУ с минимальной трудоемкостью, приведено на схеме.



Укрупненная функциональная структура АСУ
технологическими процессами

Суть данного подхода заключается в следующем. На основе детального анализа специфики проблемной области моделирования АСУ выполняется классификация и упорядочение понятий,

объектов, процессов, функций и структур материально-технического обеспечения. Кроме того, систематизируются, обобщаются и разбиваются на классы уже существующие и вновь разработанные задачи анализа и нормирования технических показателей процессов материально-технического обеспечения, а также модели функционирования материально-технического обеспечения, обеспечивающие решение этих задач.

Формализация осуществляется на основе множества проблемных переменных, принимающих классифицируемые или числовые значения:

$$K = \langle \{P\}, \{\Pi\}, \varphi_3^k \rangle,$$

где $\{P\}$ — множество проблемных переменных концептуальных элементов, описывающих понятия, объекты, процессы и отношения проблемной области моделирования;

$\{\Pi\}$ — множество значений, принимаемых в виде проблемных переменных P ;

φ_3^k — отображение переменных P на их значения Π :

$$\varphi_3^k : P \rightarrow \Pi.$$

Сущность задачи состоит в выработке (корректировке) оценочных или нормативных значений показателей содержания запасов и снабжения ресурсами исследуемой системы материально-технического обеспечения и определяется в виде

$$Z = \langle \{U\}, \{V\}, \{E\}, \{R\}, \{\Phi\}, \{J\}, \{\varphi\} \rangle,$$

где $\{U\}$ — множество управляемых переменных, которые можно варьировать для поиска решения задачи;

$\{V\}$ — множество наблюдаемых переменных, значения которых не изменяются в условиях данной задачи;

$\{E\}$ — множество критериев оценки решения задачи;

$\{R\}$ — множество переменных описания результатов решения задачи;

$\{\Phi\}$ — множество нормообразующих факторов задачи;

$\{J\}$ — множество типов отображений между компонентами задачи;

$\{\varphi\}$ — множество отображений j -го типа между компонентами задачи ($j = 1, J$), являющихся, в частности, следующими:

$$\varphi_1 : U \times V \times E \rightarrow R;$$

$$\varphi_2 : U \times V \rightarrow E;$$

$$\varphi_3 : U \times V \times E \times R \rightarrow \Phi.$$

Множества $\{U\}$, $\{V\}$ и $\{R\}$ могут включать в зависимости от конкретной решаемой задачи различные сочетания показателей функционирования материально-технического обеспечения, формируемые, например, из следующего набора характеристик $\{V\}$: $v = 1$ — стоимость содержания запасов; $v = 2$ — ожидаемый средний объем дефицита; $v = 3$ — ожидаемый средний объем сверхнормативных запасов; $v = 4$ — издержки доставки поставок; $v = 5$ — задолженность по поставкам ресурсов; $v = 6$ — норма страхового запаса; $v = 7$ — норма максимального запаса; $v = 8$ — норма заказа (пороговый уровень запаса для заявки на пополнение); $v = 9$ — норма снабжения материалами и др.

Критериями $\{E\}$ при этом могут быть следующие показатели: стоимость содержания запасов в материально-техническом обеспечении при $e = 1$; приведенная обеспеченность ресурсами потребителей при $e = 2$; надежность снабжения потребителей при $e = 3$ и др.

Решение задач, определяемое отображением $\{\varphi\}$, осуществляется на моделях функционирования системы материально-технического обеспечения. Эти модели представляют собой концептуальное описание состава, структуры, функций и процессов функционирования в виде

$$m = \langle S, \{P\}, \{W\}, \{L\}, \{H\}, \{J\}, \{\Phi\}, Q, G, \{\varphi\} \rangle,$$

где S — структура (одноэшелонная или многоэшелонная) система материально-технического обеспечения;

$\{P\}$ — множество подразделений, складов, баз;

$\{W\}$ — множество запасов ресурсов (страховых, текущих и др.);

$\{L\}$ — множество обеспечиваемых систем внешних потребителей ресурсами;

$\{H\}$ — множество номенклатур (марок) ресурсов;

$\{J\}$ — множество типов функций хранения, наполнения, расходования, выполняемых системой материально-технического обеспечения;

$\{\Phi\}$ — множество функций i -го типа, выполняемых системой;

Q — процесс функционирования системы;

G — стратегия управления запасами в системе материально-технического обеспечения;

$\{\varphi\}$ — множество нормообразующих факторов модели.

Концептуальная модель M отображением F преобразуется в математическую модель M , определяющую структуру, состав и взаимосвязи типовых модельных компонентов, реализованных в составе автоматизированной системы моделирования задач $\{Z\}$ и моделей $\{M\}$ в виде

$$M = \langle \{\Delta\}, \{T\}, Z, \{X\}, \{Y\}, \{J\}, \{\Phi\} \rangle,$$

где $\{\Delta\}$ — множество модельных компонентов, поддерживающих задачи $\{Z\}$ и модели $\{M\}$;

$\{T\}$ — множество моментов времени, которые характеризуют процессы, описываемые модельными компонентами;

Z — пространство состояния модельных компонентов;

$\{X\}, \{Y\}$ — множества входных и выходных переменных модельных компонентов соответственно;

$\{J\}$ — множество типов отображений между компонентами модели;

$\{\varphi\}$ — множество отображений j -го типа между компонентами модели M , в частности имеющими следующий вид:

$$\varphi_1 : \{T\} \times \{Z\} \times \{Y\} \rightarrow \{\Delta\};$$

$$\varphi_2 : \{T\} \times \{X\} \times \{Y\} \rightarrow Z;$$

$$\varphi_3 : \{T\} \times \{X\} \times Z \rightarrow \{Y\}.$$

Анализ существующих моделей и задач управления запасами, используемых в практике исследования и нормирования процессов МТО, позволяет сделать вывод о необходимости построения АСУ на основе единой математической схемы. Очевидно, что общее число ограничений на потребляемые ресурсы не превышает произведения рассматриваемого количества ресурсов на количество регионов. Общее число неизвестных — это произведение числа всех размещаемых предприятий на число регионов. Известно, что при планировании выпуска и потребления материальных ресурсов достигается баланс в регионально не увязанной системе отраслевого планирования. Тем не менее при этом распределение ресурсов по регионам (базам) может оказаться настолько нерациональным, что не будет получено ни одного набора величин h_{kn} , удовлетворяющих условиям ранее сформулированной задачи.

Результаты (Results)

Для построения из типовых математических компонент моделей реальных систем материально-технического обеспечения и постановки на них задач анализа и нормирования технико-экономических показателей разрабатывается комплекс конструктивных параметров. С помощью конструктивных параметров выполняется настройка типовых математических компонент на конкретную математическую модель. Настройка может заключаться, например, в выборе стратегий пополнения запасов ресурсов, планировании отгрузки ресурсов, управлении запасами ресурсов, а также в выборе критериев оптимизации и ограничений, определении набора исследуемых и нормируемых технико-экономических показателей процессов материально технического обеспечения. Кроме

того, с помощью конструктивных параметров определяются связи между отдельными типовыми математическими компонентами. Учет связей между типовыми математическими компонентами, а также направлений передачи сигналов и видов сигналов выполняется с помощью предикатов, задающих оси выдачи и приема входных (управляющих) сигналов.

Проанализируем следующим образом систему ограничений. Пусть g — некоторый вектор оценок «транспортабельности» ресурсов (величина этих оценок зависит количества затрат на перемещение ресурсов из одного региона в другой (из одной базы в другую)); h_{kn} — целочисленные неизвестные, принимающие значения «0» или «1». Запишем значения критерия K в виде

$$K = g \sum_n (R^n - \sum_k P^k h_{kn}),$$

откуда следует, что минимум потерь за счет межрегиональных поставок материальных ресурсов достигается при условии

$$R^n < \sum_k (P^k h_{kn}).$$

Несовместимость ограничений легко выявляется решением задачи с критерием. Несовместимость означает, что при спланированном распределении ресурсов по совокупности регионов рассчитанный ранее хозяйственный план не может быть реализован. В этом случае необходимо осуществить очередную итерацию межрегионального перераспределения ресурсов с учетом некоторого возрастания затрат. При использовании итеративных методов решения задачи несовместимость ограничений выражается в том, что оценки некоторых ресурсов в одних регионах будут возрастать до бесконечности, а в других — принимать нулевые значения. Исходя из этого можно организовать итеративный процесс перераспределения материальных ресурсов, изменяя величины R^n и минимизируя хозяйственные потери от межрегиональных поставок ресурсов.

Выполнение ряда итераций приведет к совместимости ограничений задачи, что гарантируется сбалансированностью регионально не увязанной системы оптимальных отраслевых планов производства. Повторяя решение задачи для различных векторов оценок g , можно получить несколько вариантов R^n , а, следовательно, разные направления перераспределения и поставок ресурсов. Издержки при поставках по маршруту ss' для v -го ресурса примут следующий вид:

$$f_{ss}(q_{ss}) = \mu_{ss} \delta_{ss} + (C_{ss} + El_v \theta_{ss}) q_{ss},$$

где μ_{ss} — издержки организации поставки;

$$\delta_{ss} = \begin{cases} 1, & \text{при } q_{ss} > 0; \\ 0, & \text{при } q_{ss} = 0, \end{cases}$$

C_{ss} — удельные издержки реализации поставки по маршруту ss' ;

l_v — цена единицы v -го ресурса;

θ_{ss} — время реализации поставки;

q_{ss} — величина транспортируемой партии ресурса.

При создании автоматизированной системы наиболее целесообразно использовать представление объекта исследования в виде линейных моделей. Агрегат, выбранный в качестве моделирующего объекта, имеет динамический характер, наглядно представляет структурные и временные особенности, описывает обмен сигналами с внешней средой и учитывает воздействие случайных факторов.

Выделенные и стандартизованные объекты и процессы системы материально технического обеспечения, заданные в виде типовых математических компонент, представляют собой простейшие линейные системы, которые при построении моделей процессов материально-технического обеспечения вместе могут образовывать новые, более сложные линейные системы. С помощью типовых математических компонент задаются такие типовые элементы системы материально технического обеспечения, как запас, спрос, пополнение запасов, заказ на пополнение и др. Кроме того, типовые математические компоненты обеспечивает построение блоков анализа и оптимизацию параметров моделей, расчет критериев оптимизации и ограничений, а также организацию итеративного поиска оптимальных значений параметров при решении задач.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование проблемно-ориентированного подхода при создании АСУ позволяет снизить трудоемкость ее разработки и реализации, а также обеспечивает возможность с единых методологических позиций унифицировать не только алгоритмы решения задач, но и применить стандартные методы обработки результатов решения задач.
2. Совмещение номенклатурных позиций в одну поставку ведет к экономии издержек формирования запасов за счет уменьшения числа заказов (и, естественно, поставок), что в свою очередь сказывается на организации перемещения материальных потоков.
3. Моделирование потоков ресурсов предусматривает корректировку путем итеративного перераспределения межрегиональных и внутрирегиональных поставок по поставщикам и потребителям (регионам, объединениям, предприятиям) и они проверяются на возможность реализации на транспорте.
4. Качественное исследование системы материально-технического обеспечения основывается на создании проблемно-ориентированных автоматизированных систем, для разработки которых наиболее целесообразным является использование проблемно-ориентированного подхода, позволяющего снизить трудоемкость разработки и реализации ее концептуальной, математической и алгоритмической моделей; построение концептуальной модели в виде сети фреймов обеспечивает применение стандартных средств общения с пользователем системы, снижая требования к их квалификации.
5. При создании математической модели наиболее целесообразным является выбор представления процессов материально-технического обеспечения в виде систем с типовой математической схемой; введение типовой математической схемы имеет существенное значение для выработки единого методического подхода к количественному и качественному исследованию систем материально-технического обеспечения, а также позволяет стандартизовать или унифицировать процесс построения математических моделей и обеспечить его эффективную реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильченко А. А.* Автоматизированный подход к решению задачи определения района эксплуатации морского автономного надводного судна / А. А. Ильченко, Д. А. Акмайкин, А. В. Гамс // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 508–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-508-518.
2. *Федоровская Н. К.* Оценка эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок с учетом экологического фактора / Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.
3. *Кузнецов А. Л.* Технологическая трансформация универсальных причалов в малые контейнерные терминалы / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Транспортное дело России. — 2022. — № 2. — С. 243–249. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_243.
4. *Царев Р. Ю.* Модель анализа надежности распределенных вычислительных систем / Р. Ю. Царев, А. Н. Пупков, М. А. Огнерубова, М. В. Сержантова, Н. А. Бесчастная // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 1 (47). — С. 86–91.
5. *Павловская О. О.* Статические методы оценки надежности программного обеспечения / О. О. Павловская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2009. — № 26 (159). — С. 35–37.
6. *Гражданцев Е. В.* Практическая реализация надежностного анализа архитектуры программной системы / Е. В. Гражданцев, М. А. Русаков, О. И. Завьялова, Р. Ю. Царев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2008. — № 1 (18). — С. 37–40.
7. *Царев Р. Ю.* К проблеме оценки надежности сложных программных систем / Р. Ю. Царев, Е. Н. Штарик, А. В. Штарик // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2015. — Т. 8. — № 1. — С. 33–47.

8. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости склада навалочных грузов морского порта с помощью имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 3. — С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.

9. Галин А. В. Развитие сборных отправок грузов в ситуации роста стоимости контейнерных перевозок / А. В. Галин, А. Е. Слициан // Транспортное дело России. — 2022. — № 3. — С. 117–119.

10. Слициан А. Е. Особенности определения количества погруженного груза на судах типа река-море / А. Е. Слициан, А. В. Галин, Э. В. Виноградова // Транспортное дело России. — 2022. — № 4. — С. 124–126. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_124.

11. Гаскаров Д. В. Применение математического программирования в дискриминантном анализе для решения задачи прогнозирования / Д. В. Гаскаров, К. П. Голоскоков, А. В. Шкабардня // Автоматика и телемеханика. — 1988. — № 7. — С. 174–181.

12. Голоскоков К. П. Математическая модель технологии управления запасами компании / К. П. Голоскоков, К. А. Давыдов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. — 2012. — № 2 (38). — С. 9.

13. Голоскоков К. П. Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2008. — № 1 (53). — С. 164–168.

14. Голоскоков К. П. Повышение эффективности деятельности производственного предприятия / К. П. Голоскоков, Н. К. Нестеренко, М. Ю. Чиркова // Аудит и финансовый анализ. — 2014. — № 1. — С. 331–335.

15. Брусакова И. А. Математическая модель функциональной надежности автоматизированных систем управления / И. А. Брусакова, К. П. Голоскоков // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 48–51.

16. Нырков А. П. Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли / А. П. Нырков, А. А. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко; под ред. А. П. Ныркова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — 544 с.

17. Нырков А. П. Методика проектирования безопасных информационных систем на транспорте / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. В. Башмаков // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2010. — № 3. — С. 58–61.

18. Люльченко А. Н. Модель системы обеспечения информационной безопасности на транспорте / А. Н. Люльченко, А. П. Нырков, В. Г. Швед // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 184–193. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-184-193.

REFERENCES

1. Ilchenko, Anna A., Denis A. Akmaykin, and Anastasia V. Gams. “Automated approach for solving the problem of determining the maritime autonomous surface ship operation area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 508–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-508-518.

2. Fedorovskaya, Nadezhda K., and Konstantin Yu. Fedorovskiy. “Estimating the efficiency of ship power plants cooling systems taking into account the environmental factor.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.

3. Kuznetsov, A., A. Galin, S. Valkova, and A. Sampiev. “Technological transformation of universal berths into small container terminals.” *Transport business of Russia* 2 (2022): 243–249.

4. Tsarev, R. Yu., A. N. Pupkov, M. A. Ognerubova, M. V. Serzhantova, and N. A. Beschastnaya. “Model of analysis of distributed computing systems reliability.” *The Siberian Aerospace Journal* 1(47) (2013): 86–91.

5. Pavlovskaya, O. O. “Static methods of assessment of software.” *Bulletin of the South Ural State University. Series, Computer technologies, automatic control, radio electronics* 26(159) (2009): 35–37.

6. Grazhdantsev, E. V., M. A. Rusakov, O. I. Zavyalova, and R. Ju. Tsarev. “Practical realization of reliability analysis of software architecture.” *The Siberian Aerospace Journal* 1(18) (2008): 37–40.

7. Tsarev R. Yu., E. N. Shtarik, and A. V. Shtarik. “Toward the problem of estimation of the complex software system reliability.” *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 8.1 (2015): 33–47.

8. Kuznetsov, Alexander Lvovich, Alexander Valentinovich Galin, Svetlana Sergeevna Valkova, and Adam Mihaylovich Sampiev. "Analysis of seaport bulk cargo warehouse capacity by using simulation modeling." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 3 (2022): 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.

9. Galin, A., and A. Slican. "Development of LCL shipments in a situation of rising cost of container transportation." *Transport business of Russia* 3 (2022): 117–119. DOI: 10.52375/20728689_2022_3_117.

10. Slican, A., A. Galin, and E. Vinogradova. "Features of determining the amount of loaded cargo on river-sea vessels." *Transport business of Russia* 4 (2022): 124–126. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_124.

11. Gaskarov, D.V., K. P. Goloskokov, and A. V. Shkabardnya. "Mathematical programming in discriminant analysis for forecasting." *Avtomatika i Telemekhanika* 7 (1988): 174–181.

12. Goloskokov, K.P., and K. A. Davydov. "Mathematical model of technology of storekeeping of the company." *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami* 2(38) (2012): 9.

13. Goloskokov, K. P. "Prognozirovaniye i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(53) (2008): 164–168.

14. Goloskokov, K. P., N. K. Nesterenko, and M. Y. Chirkova. "Increase of efficiency of activity of the industrial enterprise." *Audit and financial analysis* 1 (2014): 331–335.

15. Brusakova, I. A., and K. P. Goloskokov. "Mathematical model of functional reliability of the automated control systems." *Vestnik INZhEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 8 (2010): 48–51.

16. Nyrkov, A. P., A. A. Nyrkov, S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Obespechenie bezopasnosti ob"ektov informatizatsii transportnoi otrasli*. Edited by A. P. Nyrkov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015.

17. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. V. Bashmakov. "Technique of designing safe information systems on transport." *Information Security Problems. Computer Systems* 3 (2010): 58–61.

18. Lyulchenko, Andrei Nikolaevich, Anatoliy Pavlovich Nyrkov, and Viktor Grigorievich Shved. "Model of the system providing information security on transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 184–193.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голоскоков Константин Петрович —

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

Глебов Николай Борисович —

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

Астапкович Алексей Александрович — аспирант
Научный руководитель:

Голоскоков Константин Петрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goloskokov, Konstantin P. —

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: goloskokovkp@gumrf.ru

Glebov, Nikolay B. —

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

Astapkovich, Aleksey A. — Postgraduate
Supervisor:

Goloskokov, Konstantin P.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.
Received: November 17, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-163-173

ANALYSIS OF BLOCKCHAIN INTRODUCTION STRATEGIES IN MARITIME BUSINESS WITH GAME THEORY MODELLING

I. A. Rusinov, M. Y. Zatolokina

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

In the last years the blockchain technology has attracted the focus of many companies in maritime business, due to its potential to make a revolution in this field. This technology became especially important in supply chains, where it offers the possibility to increase the transportation effectiveness. It is shown that currently there is no instrument to analyze the strategies on blockchain technology introduction in maritime shipping. In order to solve this problem, it is suggested to use game theory models, which allows you to simulate the relationships among maritime shipping participants. In order to create a model of such type, the description of main participants is represented in the paper and the main schemes of their interaction are analyzed. The structured schemes of the participants introduction, during the organization of maritime shipping in a traditional form and with the utilization of blockchain are suggested in the paper. The structure of basic game theory model of maritime shipping is shown. In order to show the possibilities of the analysis using the proposed model four experiments are considered. The first one is the traditional form of participants interaction. The second one is the interaction of participants fully through the blockchain. The third one is the change of attitude to blockchain depending on economic efficiency. The fourth one is the gradual introduction of blockchain technology. The results show the change of economical effectiveness of business participants in different cases. It is shown in the paper that the introduction of blockchain allows to speed up a company cash-flow, which makes the business management much easier. It is also proved that the suggested model must be improved with introduction of new conditions and motives of the participants.

Keywords: maritime shipping, sales agreement, blockchain, supply chain, game theory, game theory modelling.

For citation:

Rusinov, Igor A., and Marina Y. Zatolokina. "Analysis of blockchain introduction strategies in maritime business with game theory modelling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 163–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-163-173.

УДК 656.611

ТЕОРЕТИКО-ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРАТЕГИИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ МОРСКОЙ ПЕРЕВОЗКИ

И. А. Русинов, М. Ю. Затолокина

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

Темой исследования является технология блокчейн, которая начиная с 2008 г. привлекла к себе значительное внимание из-за ее больших потенциальных возможностей в различных отраслях, особенно в сфере управления цепочками поставок, где она может применяться для повышения прозрачности, отслеживаемости и эффективности. Приведены доказательства того, что в настоящее время не существует инструментов анализа стратегий внедрения технологии блокчейн в практику работы морских перевозок. Для устранения этого недостатка предложена теоретико-игровая модель, в рамках которой выполняется моделирование взаимодействия участников рынка морской перевозки. Для создания подобной модели приведено описание основных участников морской перевозки, а также выполнен анализ основных схем их взаимодействия. Представлены структурированные схемы взаимодействия участников в процессе организации перевозки по традиционной форме и при организации перевозки с использованием блокчейн-технологии. Приведена структура базовой теоретико-игровой модели взаимодействия участников морской перевозки, а также схема выполнения операций с применением технологии блокчейн.

В целях возможности проведения анализа с помощью предложенной модели рассмотрено четыре сценария работы модели: традиционная схема взаимодействия участников, полное взаимодействие участников через блокчейн, изменение отношения участников к технологии блокчейн в зависимости от экономической эффективности, постепенное внедрение блокчейн-технологии. Приведенные результаты показывают характер изменений экономической эффективности работы участников рынка при различных условиях. Результатами исследования подтверждено, что внедрение блокчейн-технологии позволяет ускорить оборачиваемость денежных средств компании, что существенно упрощает ведение бизнеса. Отмечается, что разработанная модель требует дополнения в части уточнения условий работы некоторых участников перевозки, а также мотивов их поведения.

Ключевые слова: морские перевозки, запродажные контракты, блокчейн, цепочка поставок, теория игр, теоретико-игровая модель.

Для цитирования:

Русинов И. А. Теоретико-игровая модель для анализа стратегии внедрения технологии блокчейн при организации морской перевозки / И. А. Русинов, М. Ю. Затолокина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 163–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-163-173.

Введение (Introduction)

Развитие транспортной отрасли обеспечивается не только созданием новых технологий организации перевозки, технических средств, методов планирования и анализа операций, но и внедрением новых методов обмена информацией. Основой морского судоходства является международная торговля. Сложная история формирования международной торговли привела к созданию общепринятых правил, которыми участники сделки и перевозки могут руководствоваться в условиях высокой неопределенности и быстро изменяющейся экономической ситуации. Важной частью этих правил является технология обмена денежных средств на товары.

В наиболее распространенном случае в международной торговой сделке участвуют продавец, покупатель, банк продавца и банк покупателя. При заключении договора продавец и покупатель договариваются об условиях выполнения сделки. Для сокращения времени на переговоры типовые условия сделок сформулированы в правилах INCOTERMS. Поскольку продавец и покупатель могут не иметь длительных доверительных отношений, они выполняют расчеты между собой по аккредитиву. В данном случае покупатель переводит деньги в банк продавца при условии, что тот сможет получить их при предъявлении документа, удостоверяющего право собственности на этот товар. В морских перевозках документом, удостоверяющим право собственности на груз / товар, без которого не могут быть выполнены операции по приемке-выдаче груза, а также по выполнению международных финансовых операций, является морской коносамент. Причем передача этого документа между участниками перевозки требует определенного времени и ресурсов. Коносамент может быть отправлен вместе с грузом на судне или самолете. В первом случае продавец сможет получить деньги только после того, как судно выполнит рейс, продолжительность которого может составлять несколько недель, во втором — несколько дней. Вместе с тем получение дохода от сделки в международной торговле зависит не только от успешности работы всего предприятия, но и от времени выполнения рейса, от задержек судна в порту, от времени доставки документов и т. д.

Отсутствие возможности надежного планирования операций приводит компании к необходимости более тщательного планирования своих финансов. В связи с этим многие судовладельцы и операторы морских контейнерных линий работают над снижением уровня неопределенности для своих клиентов. При этом важным способом достижения данной цели является сокращение времени передачи информации между участниками перевозки за счет внедрения последних достижений информационных технологий. Одним из наиболее перспективных методов решения данной задачи является *внедрение технологии блокчейн* [1], [2], преимущества которой рассматриваются в работах [3], [4]. Однако взаимодействие крупнейших участников рынка (Maersk, IBM) в значи-

тельной степени затруднено в связи с тем, что данная технология вносит значительные изменения в установившиеся правила ведения бизнеса, а также она еще не адаптирована среди участников ее применения. Кроме того, основной проблемой данной технологии является то, что она не может быть внедрена частично. Для ее успешного применения необходимо, чтобы все участники рынка были подключены к определенной информационной системе, обеспечивающей услуги по обмену информацией по технологии блокчейн. Для того чтобы как можно быстрее и обширнее распространить данную технологию, операторы морских контейнерных линий пытаются внедрить ее в крупных компаниях, однако рынок морских перевозок характеризуется высоким уровнем конкуренции. В таких условиях начинают конкурировать несколько систем блокчейн, обеспечивающих услуги того или иного перевозчика, что затрудняет внедрение технологии в бизнес.

Основной целью работы является снижение уровня неопределенности судовладельцев при внедрении технологии блокчейн. Достижение данной цели затрудняет отсутствие в научной и профессиональной литературе структурированного описания мотивов участников рынка морской перевозки при внедрении технологии блокчейн. В связи с этим основной научной задачей исследования является разработка модели взаимодействия участников перевозки, отражающая их мотивы и поведение при внедрении технологии блокчейн.

Для решения основной задачи исследования необходимо выполнить следующее:

- проанализировать технологии взаимодействия участников рынка морской перевозки при использовании технологии блокчейн;
- определить основных участников рынка морской перевозки, структурировать их мотивы и стратегии поведения;
- составить теоретико-игровую модель, позволяющую проанализировать поведение участников рынка в различных условиях;
- выявить возможные стратегии внедрения блокчейн-технологии;
- провести эксперименты с разработанной моделью для выявления наиболее эффективной модели поведения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Основным документом, структурирующим правила взаимодействия участников международной сделки, являются унифицированные правила и обычаи для документарных аккредитивов [5], [6]. В этом документе определяются основные участники торговых сделок, состав документов, которые они могут использовать при выполнении сделки, а также основные процессы их взаимодействия. Действующая редакция правил вышла в 2007 г., в то время как идея применения блокчейн-технологии к торговым сделкам появилась в 2008 г. Как следствие, в этих документах нет представления о технологии взаимодействия участников торговой сделки с использованием технологии блокчейн. Вместе с тем в ряде работ дано описание эффективности применения этой технологии в логистике [7], [8], отмечается ее основная роль, а также приводятся данные о результатах внедрения технологии блокчейн на практике. При этом зачастую особое внимание уделяется возможности оперативного получения информации о перемещении груза и его характеристиках (например, о температуре продовольственных грузов). Вместе с тем решение рассматриваемых задач мало связано непосредственно с технологией блокчейн, больше с внедрением технологии интернета вещей, под которой понимается внедрение различных датчиков и контроллеров для автоматизации выполнения отдельных операций, а также сбора данных [9]. Возможно, сбор этих данных позволит наиболее эффективно использовать технологию блокчейн, но указанные задачи необходимо рассматривать отдельно, так как они направлены на решение разных вопросов.

В исследованиях выполнен также анализ внедрения технологии блокчейн с помощью *теории игр* [10], [11], рассматривается поведение участников цепочки поставок без учета

необходимости преодоления международных границ, а также процесс поставки продовольственных грузов или материалов производства на небольшие расстояния. В связи с этим возникла необходимость исследования технологии блокчейн в международных перевозках, для проведения которого необходимо точно определить основных участников международной сделки. В самом простом случае основными участниками международной перевозки с применением технологии блокчейн являются: продавец, покупатель, морской перевозчик, банк покупателя, банк продавца, международная система банков SWIFT, поставщик услуг технологий блокчейн.

Продавец — компания, осуществляющая операции по экспорту производимой продукции. В составе этой компании имеется отдел логистики, осуществляющий взаимодействие с участниками перевозки. Одна компания может экспортировать продукцию в большое количество стран и городов, расположенных в различных точках мира. Основной целью компании является повышение эффективности бизнеса. В данном случае эффективность определяется прибылью, которую компания может обеспечить за счет ведения определенных операций. Приобретенная прибыль может быть потрачена на сокращение стоимости производства или на расширение доли компании на рынке.

Покупатель — компания, осуществляющая операции по импорту продукции для последующей продажи. В составе компании также имеется отдел логистики, осуществляющий взаимодействие с участниками перевозки. Одна компания импортирует продукцию от небольшого количества компаний. Основной целью компании является повышение эффективности бизнеса за счет сокращения стоимости приобретаемой продукции.

Морской перевозчик — компания-судовладелец, осуществляющая линейные перевозки между множеством портов мира. Основной ее целью является повышение эффективности бизнеса за счет расширения доли рынка или сокращения стоимости морской перевозки.

Поставщик услуг технологий блокчейн — компания, предоставляющая сервис для выполнения финансовых операций с технологией блокчейн. Основной целью является повышение эффективности бизнеса за счет расширения рынка. (Эти услуги могут предоставляться как отдельной компанией, так и морским перевозчиком).

Банк продавца — банк, которому доверяет продавец; основная цель — обеспечить надежность финансовых операций.

Банк покупатель — банк, которому доверяет покупатель; основная цель — обеспечить надежность финансовых операций.

Система банков SWIFT — ассоциация банков, обеспечивающая передачу финансовых средств и документов между банками мира.

Общий порядок взаимодействия участников при использовании традиционной технологии выполнения операций включает следующие этапы:

1-й этап — покупатель и продавец заключают договор купли-продажи;

2-й этап — покупатель передает перевозчику товар;

3-й этап — перевозчик передает покупателю транспортные документы;

4-й этап — покупатель отправляет транспортные документы продавцу;

5-й этап — при получении транспортных документов покупатель передает своему банку указание к переводу денежных средств покупателю;

6-й этап — если банк продавца и банк покупателя являются членом ассоциации банков SWIFT, то выполняется перевод средств (в противном случае перевод осуществляется через другие банки, являющиеся членами ассоциации SWIFT);

7-й этап — перевозчик осуществляет доставку грузов, выдавая их в обмен на транспортные документы.

Схема выполнения операций по данной технологии приведена на рис. 1.

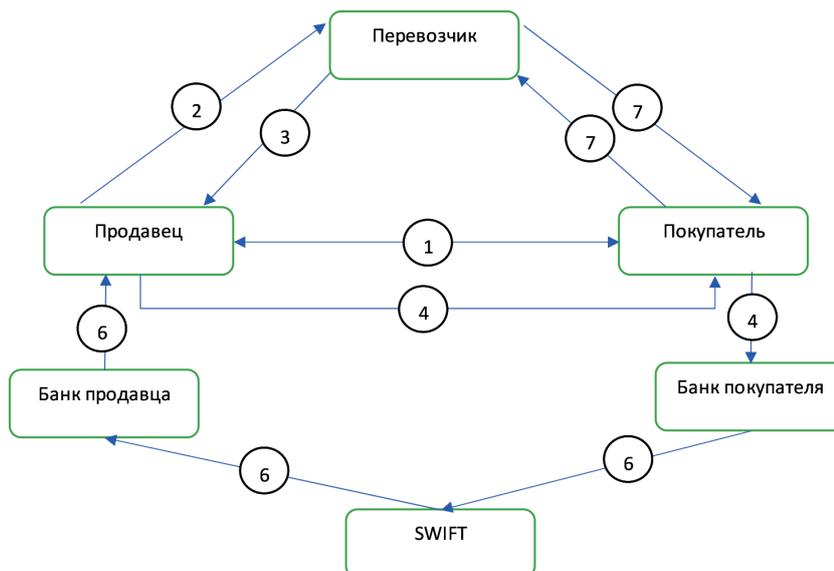


Рис. 1. Традиционная схема выполнения операций

В случае применения технологии блокчейн порядок взаимодействия участников изменяется следующим образом:

1-й этап — покупатель, продавец, их банки, а также перевозчик являются пользователями услуг одного поставщика технологий блокчейн;

2-й этап — покупатель и продавец заключают договор купли-продажи через поставщика блокчейн-технологии;

4-й этап — банк покупателя получает от поставщика услуг технологий блокчейн-поручение к переводу денежных средств при отправлении грузов;

4-й этап — продавец передает перевозчику товар;

5-й этап — перевозчик подтверждает получение груза у поставщика услуг блокчейн технологии;

6-й этап — банк покупателя переводит денежные средства; 7-й этап — перевозчик осуществляет доставку грузов и выдает груз продавцу, данные о котором указаны у поставщика технологий блокчейн.

Схема выполнения операций по данной технологии представлена на рис. 2.

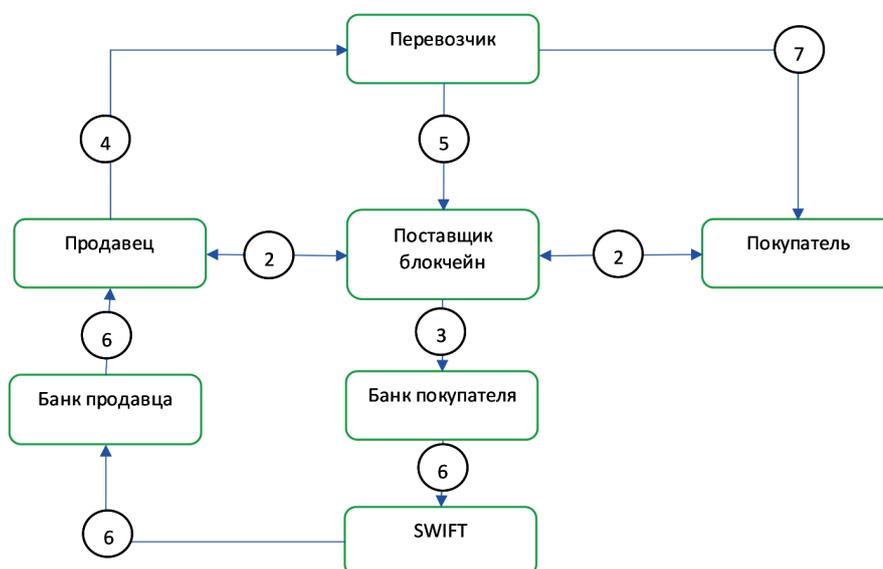


Рис. 2. Схема выполнения операций с применением технологии блокчейн

Приведенные схемы взаимодействия участников позволяют разработать следующую теоретико-игровую модель. Пусть имеется множество покупателей $\{B\}$, импортирующих определенный товар из различных стран. Каждый из покупателей характеризуется надбавкой на стоимость импортированной продукции, наличием денежных средств на банковском счету и заинтересованностью в применении технологии блокчейн. Данная заинтересованность может интерпретироваться как вероятность того, что покупатель будет готов выполнять сделку по технологии блокчейн, приняв значение от 0 до 1. Такое представление заинтересованности может отражаться не только в том, внедрила ли компания блокчейн-подход в свою работу, но и готовность общества к ее использованию — в частности, готовы ли государство, банки, таможенные органы, порты, экспедиторы и другие компании, участвующие в доставке товаров, к тому, что покупатель будет использовать эту технологию.

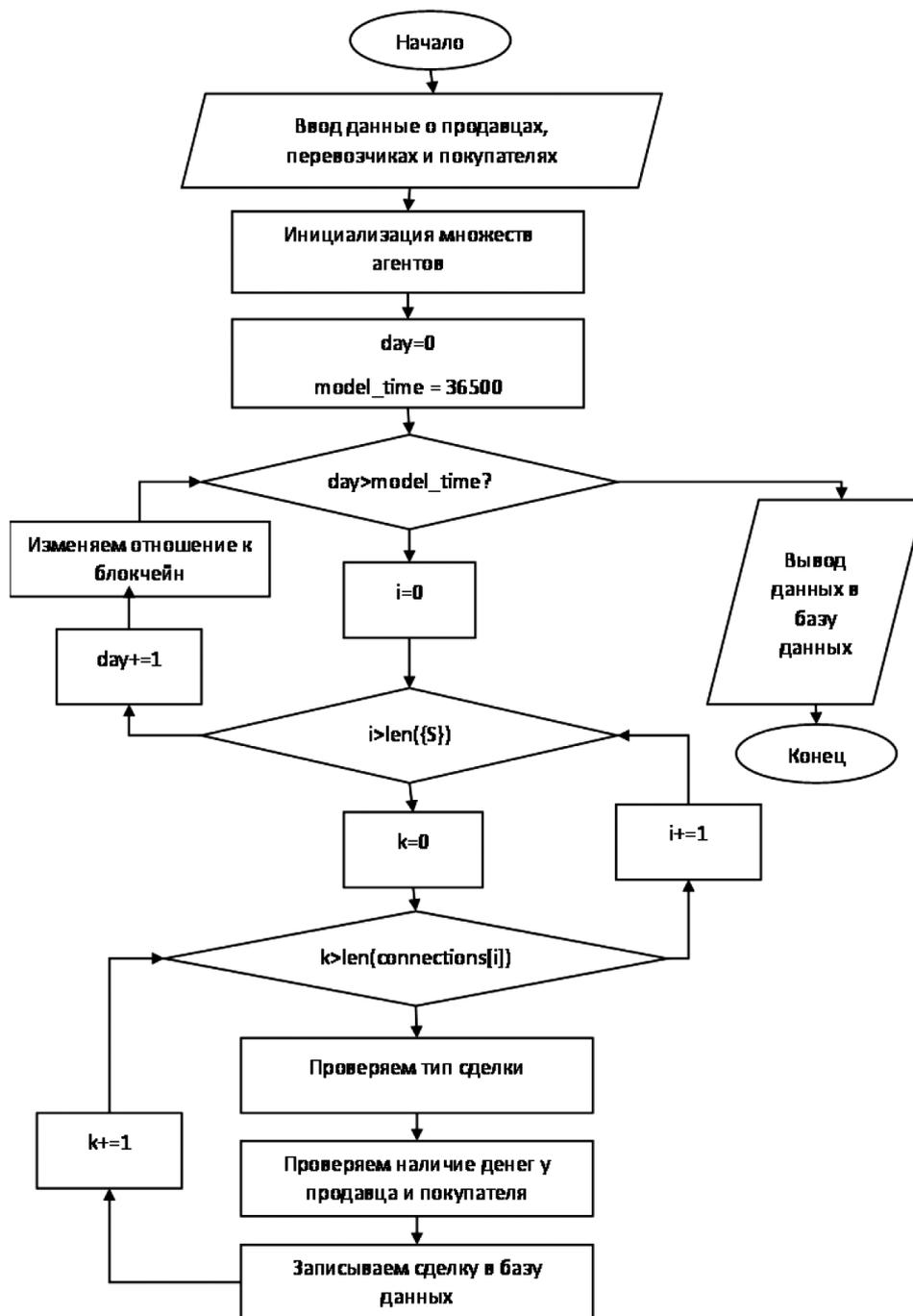


Рис. 3. Алгоритм теоретико-игровой модели

Пусть также имеется множество продавцов $\{S\}$, экспортирующих этот товар из своей страны. Каждый продавец характеризуется стоимостью и ценой товара, количеством сотрудников, средней зарплатой одного сотрудника, количеством денежных средств на банковском счету, а также заинтересованностью в применении технологии блокчейн. Кроме того, каждый продавец связан с определенным множеством покупателей, характеризующим ту долю рынка, которую занимает продавец. Количество сотрудников, которые работают в компании продавца, определяется из соотношения

$$n = \frac{qp_1}{m_1} + \frac{qp_2}{m_2},$$

где q — количество клиентов;

p_1 — доля клиентов, выполняющих контракты по традиционной технологии;

p_2 — доля клиентов, выполняющих контракты по блокчейн-технологии;

m_1 — количество контрактов по традиционной технологии, которые может выполнять один сотрудник;

m_2 — количество контрактов с технологиями блокчейн, которые может выполнять один сотрудник.

Различие в количестве контрактов, которые может обеспечивать один сотрудник, объясняется необходимостью инвестировать деньги в процессе внедрения технологии. Количество сотрудников, умноженное на среднюю заработную плату, в данном случае представляет собой постоянные затраты компании. Для успешного ведения бизнеса компании необходимо покрывать эти затраты.

Пусть также имеется множество линейных операторов $\{L\}$, осуществляющих перевозку между продавцом и покупателем. Каждый линейный оператор характеризуется множеством судов, которое может перевезти груз, временем транспортировки между портами, временем доставки коносаментов при традиционной организации перевозки, временем передачи информации при выполнении операций по технологии блокчейн, а также стоимостью перевозки между портами.

В рамках рассматриваемой теоретико-игровой модели покупатели каждый день делают заказ на доставку груза. В свою очередь продавцы при наличии денежных средств выполняют поставку груза. При выборе продавца покупатели могут руководствоваться одним из критериев: либо стоимостью товара, либо заинтересованностью в применении технологии блокчейн. Данные критерии будут являться основой для анализа различных сценариев работы с моделью, общий алгоритм которой представлен на рис. 3.

В конце каждого месяца для каждого игрока определяется *экономическая эффективность внедрения технологии блокчейн*.

Результаты (Results)

Для выявления основных преимуществ, недостатков, а также возможных способов внедрения технологии блокчейн в рассматриваемой теоретико-игровой модели необходимо проанализировать несколько сценариев.

Первый сценарий рассматривает традиционное поведение системы без технологии блокчейн. Этот сценарий будет называться *базовым*, поскольку именно с ним будут сравниваться результаты анализа следующих сценариев.

Второй сценарий рассматривает систему при 100 %-м внедрении технологии блокчейн. Он позволит определить количественно каким образом эта технология влияет на работу участников рынка. В частности, относительно базового сценария в данном случае будет понятно, насколько технология блокчейн позволяет увеличить оборачиваемость активов участников рынка.

На рис. 4 представлен график денежных потоков одного из агентов модели при первом и втором сценариях, из которого видно, что внедрение технологии блокчейн позволяет быстрее выйти на стационарный режим работы компании. В свою очередь, это позволяет привлекать меньшие инвестиции для организации работы компании и, как следствие, повышает стабильность работы компании.

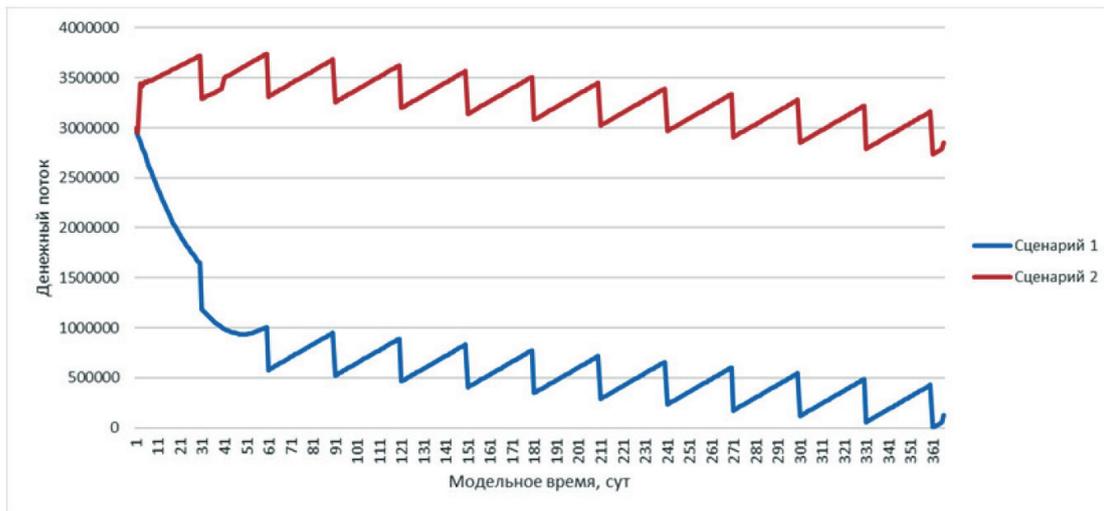


Рис. 4. Пример денежного потока при сценариях № 1 и 2

В третьем сценарии рассмотрена система, когда участники изменяют свое отношение к технологии блокчейн в зависимости от экономической эффективности контрактов. При этом интерес участников к технологии блокчейн повышается в случае, если они получили прибыль, и снижается, если потеряли деньги. В данном сценарии рассматриваются различные уровни «терпимости» к технологиям блокчейн. Последнее позволяет выявить необходимый уровень заинтересованности компания для активного внедрения данной технологии.

На рис. 5 показано изменение отношения к технологиям блокчейн после проведения эксперимента. Видно, что в большинстве случаев отмечается снижение интереса участников к блокчейну в рассматриваемом эксперименте. Это может быть связано с тем, что уровень требуемых инвестиций для внедрения данной технологии оказался выше того, к чему были готовы участники рынка.

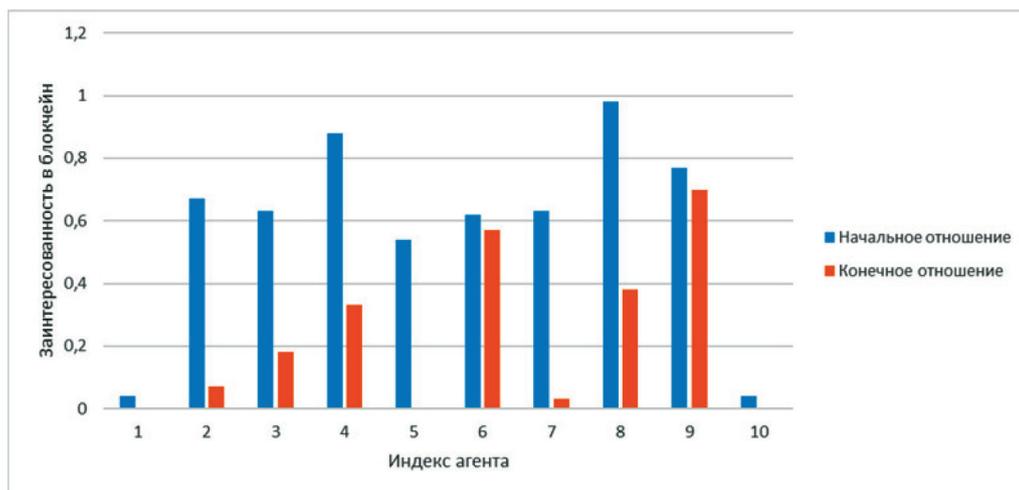


Рис. 5. Пример изменения отношения к технологиям блокчейн в сценарии № 3

Четвертый сценарий рассматривает систему, когда все участники постепенно, но уверенно внедряют технологию блокчейн. Он позволит показать, как будет изменяться финансовое состояние участников рынка при внедрении технологии и сколько времени им потребуется для того, чтобы получить возврат за свои инвестиции. На рис. 6 представлено изменение отношения к технологиям блокчейн в этом сценарии.

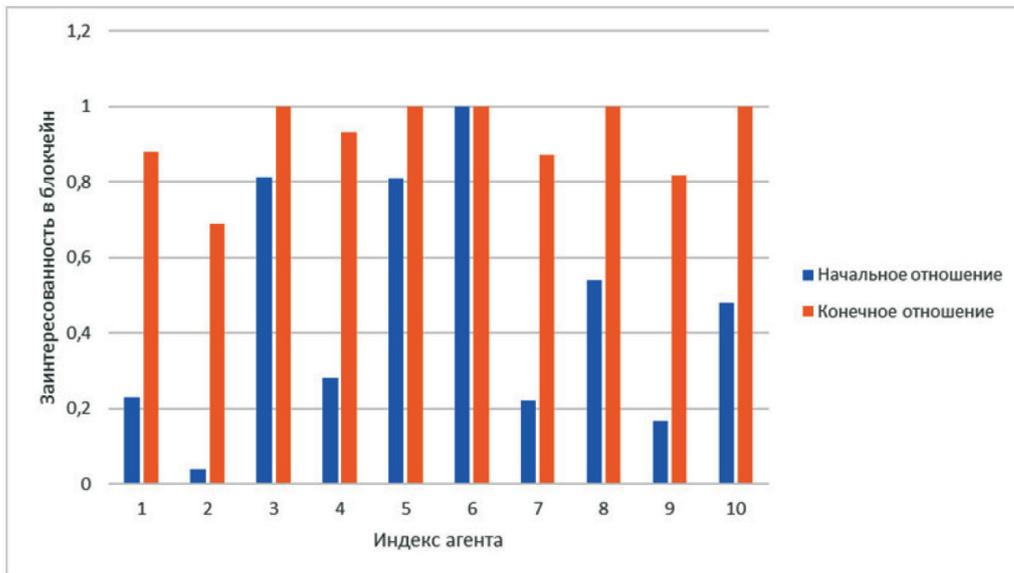


Рис. 6. Пример изменения отношения к технологиям блокчейн в сценарии № 4

На рис. 7 выполнено сравнение денежных потоков одного из участников третьего и четвертого сценариев. Как видно из этого рисунка, при постепенном внедрении технологии блокчейн экономическое положение участников улучшается.

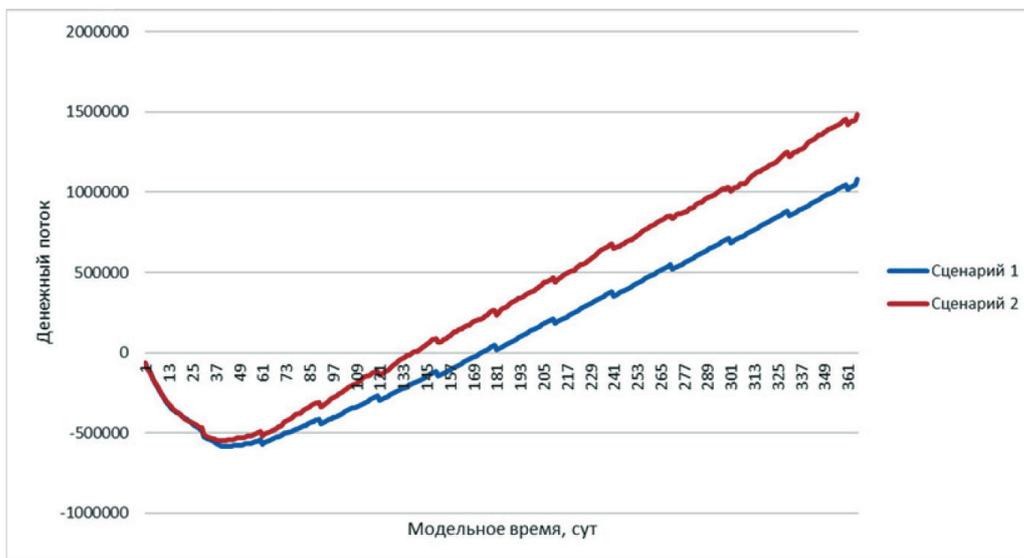


Рис. 7. Пример денежного в сценариях № 3 и 4

Таким образом, представленная в работе теоретико-игровая модель, включая начальные положения, правила и алгоритм, требует дополнительного уточнения и структуризации, поскольку является очень грубым отражением реальности, в частности дополнения состава участников, а также условий и мотивов их поведения. В связи с этим основной задачей следующих исследований является формирование более точной модели.

Выводы (Conclusions)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Структурированы взаимоотношения участников морской перевозки при выполнении операций с помощью блокчейн-технологий.

2. Доказано, что теоретико-игровой подход является эффективным инструментом анализа сложных логистических систем, в рамках которых происходит взаимодействие участников рынка.
3. Выявлено, что технология блокчейн при полном ее внедрении позволяет увеличить оборачиваемость средств компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко Ю. В. Блокчейн в логистике / Ю. В. Лысенко, М. В. Лысенко, Р. И. Гарипов // Азимут научных исследований: экономика и управление. — 2019. — Т. 8. — № 3 (28). — С. 240–242. DOI: 10.26140/anie-2019-0803-0057.
2. Сергеев В. И. Применение инновационной технологии «блокчейн» в логистике и управлении цепями поставок / В. И. Сергеев, Д. И. Кокурин // Креативная экономика. — 2018. — Т. 12. — № 2. — С. 125–140. DOI: 10.18334/ce.12.2.38833.
3. Панюкова В. В. Международный опыт применения технологии блокчейн при управлении цепями поставок / В. В. Панюкова // Экономика. Налоги. Право. — 2018. — Т. 11. — № 4. — С. 60–67. DOI: 10.26794/1999-849X-2018-11-4-60-67.
4. Мухамедова З. Г. Перспективы использования технологии блокчейн в организации перевозочного процесса и цепочке поставок / З. Г. Мухамедова, В. Д. Осадчук, А. У. Тулаев // Известия Транссиба. — 2022. — № 2 (50). — С. 142–156.
5. Кузнецов А. Л. Направления цифровизации транспортной отрасли / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.
6. Dolan J. Users Handbook for Documentary Credits under UPC 600 / J. Dolan, W. B. Baker. — International Chamber of Commerce, 2008. — 160 p.
7. Hackius N. Blockchain in logistics and supply chain: trick or treat? / N. Hackius, M. Petersen // Digitalization in Supply Chain Management and Logistics: Smart and Digital Solutions for an Industry 4.0 Environment. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 23. — Berlin: epubli GmbH, 2017. — Pp. 3–18. DOI: 10.15480/882.1444
8. Batta A. Diffusion of blockchain in logistics and transportation industry: an analysis through the synthesis of academic and trade literature / A. Batta, M. Gandhi, A. K. Kar, N. Loganayagam, V. Ilavarasan // Journal of Science and Technology Policy Management. — 2021. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 378–398. DOI: 10.1108/JSTPM-07-2020-0105
9. Tran-Dang H. The Internet of Things for logistics: Perspectives, application review, and challenges / H. Tran-Dang, N. Krommenacker, P. Charpentier, D. S. Kim // IETE Technical Review. — 2022. — Vol. 39. — Is. 1. — Pp. 93–121. DOI: 10.1080/02564602.2020.1827308.
10. Liu Z. A survey on blockchain: A game theoretical perspective / Z. Liu, N. C. Luong, W. Wang, D. Ni-yato, P. Wang, Y. C. Liang, D. I. Kim // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — Pp. 47615–47643. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909924.
11. Hall-Andersen M. Game theory on the blockchain: a model for games with smart contracts / M. Hall-Andersen, N. I. Schwartzbach // International Symposium on Algorithmic Game Theory. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — Pp. 156–170. DOI: 10.1007/978-3-030-85947-3_11.

REFERENCES

1. Lysenko, Yu. V., M. V. Lysenko, and R. I. Garipov. “Blockchain in logistics.” *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration* 8.3(28) (2019): 240–242. DOI: 10.26140/anie-2019-0803-0057.
2. Sergeev, V. I., and D. I. Kokurin. “Application of innovative technology “blockchain” in logistics and supply chain management.” *Kreativnaya ekonomika* 12.2 (2018): 125–140. DOI: 10.18334/ce.12.2.38833.
3. Panyukova, V. V. “International experience of using blockchain technology in supply chain management.” *Ekonomika. Nalogi. Pravo* 11.4 (2018): 60–67.
4. Mukhamedova, Z. G., V. D. Osadchuk, and A. U. Tulaev. “Prospects for the use of blockchain technology in the organization of the transportation process and supply chain.” *Journal of Transsib Railway Studies* 2(50) (2022): 142–156.
5. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “The directions of the transport industry digitalization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.

6. Dolan, John, and Walter Baker. *Users Handbook for Documentary Credits under UPC 600*. International Chamber of Commerce, 2008.

7. Hackius, Niels, and Moritz Petersen. “Blockchain in logistics and supply chain: trick or treat?.” *Digitalization in Supply Chain Management and Logistics: Smart and Digital Solutions for an Industry 4.0 Environment. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 23*. Berlin: epubli GmbH, 2017. DOI: 10.15480/882.1444.

8. Batta, Anuj, Mohina Gandhi, Arpan Kumar Kar, Navin Loganayagam, and Vignesh Ilavarasan. “Diffusion of blockchain in logistics and transportation industry: an analysis through the synthesis of academic and trade literature.” *Journal of Science and Technology Policy Management* 12.3 (2021): 378–398. DOI: 10.1108/JSTPM-07–2020–0105.

9. Tran-Dang, Hoa, Nicolas Krommenacker, Patrick Charpentier, and Dong-Seong Kim. “The Internet of Things for logistics: Perspectives, application review, and challenges.” *IETE Technical Review* 39.1 (2022): 93–121. DOI: 10.1080/02564602.2020.1827308.

10. Liu, Ziyao, Nguyen Cong Luong, Wenbo Wang, Dusit Niyato, Ping Wang, Ying-Chang Liang, and Dong In Kim. “A survey on blockchain: A game theoretical perspective.” *IEEE Access* 7 (2019): 47615–47643. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909924.

11. Hall-Andersen, Mathias, and Nikolaj I. Schwartzbach. “Game theory on the blockchain: a model for games with smart contracts.” *International Symposium on Algorithmic Game Theory*. Cham: Springer International Publishing, 2021. 156–170. DOI: 10.1007/978-3-030-85947-3_11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русинов Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: makarovka@inbox.ru, rusinovia@gumrf.ru
Затолокина Марина Юрьевна — аспирант
Научный руководитель:
Русинов Игорь Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: marina.zatolokina7@gmail.com,
kaf_kevt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusinov, Igor A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation
e-mail: makarovka@inbox.ru, rusinovia@gumrf.ru
Zatolokina, Marina Y. — Postgraduate
Supervisor:
Rusinov, Igor A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: marina.zatolokina7@gmail.com,
kaf_kevt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2023 г.
Received: December 4, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 16. № 1

2024 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 29.02.24. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 21,75. Тираж 500 экз. Заказ № 118/24

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7